

岩盤不連続面情報の取得・分析および 不連続性岩盤のモデル化

谷本 親伯¹・岸田 潔²・田畑 宏司³
吉津 洋一⁴・國井 仁彦⁵

¹正会員 工博 京都大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工修 京都大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

³正会員 工修 電源開発株式会社 火力部火力土木建築課 (〒104 東京都中央区銀座6-15-1)

⁴正会員 工修 関西電力株式会社 和歌山支店土木建築課 課長 (〒640 和歌山市岡山1-40)

⁵正会員 工修 株式会社ニュージェック 取締役 (〒113 東京都文京区西片1-15-15)

原位置においてボーリング孔壁観察を行い、得られた画像データをもとに不連続面の位置、走向・傾斜、開口幅等を画像処理により求めた。これらの結果を解析することにより、2種類の不連続性岩盤のモデル化を行った。一つは、方向分析によって得られる不連続面群を用いた不連続体モデルである。本研究では、頻度、面積、開口幅を考慮した不連続面群の相対重要度を比較するパラメータの提案を行い、実際の計測結果に適用を行った。もう一つは、地質構造や不連続面の開口幅を考慮に入れて求めるべき頻度をもとにした擬似連続体モデルの提案を行った。これにより、変形性や透水性を検討する解析モデルや、ジオトモグラフィー解析などの精度向上に貢献する初期モデルの構築に利用できるものとする。

Key Words: rock joints, borehole survey, image processing techniques, discontinuous model, joint frequency, equivalent continuous model

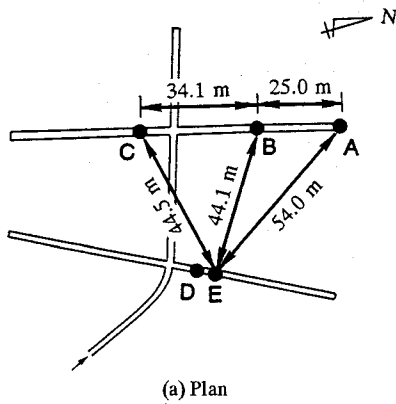
1. はじめに

不連続性岩盤中に地下空洞を建設する場合、不連続面の分布特性および性状を把握することは重要なことである。これら二つの要素は、不連続性岩盤の力学的特性や水理学的特性を支配し、設計・施工に大きな影響を与えるものである。

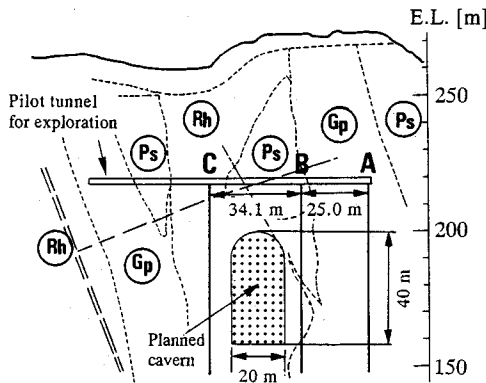
一般に、不連続性岩盤のモデル化を行い、変形挙動や透水特性を数値解析により求め、設計法や施工法を検討することが多く見られる。これらの解析を行う場合、モデルとしては、不連続体モデルと不連続面を考慮した連続体モデルのいずれかで行われる。個別剛体要素法(DEM)^{1),2)}・不連続変形法(DDA)³⁾・き裂ネットワークモデル^{4),5)}等が不連続体モデルの範疇にはいる解析手法である。一方、不連続面を考慮した連続体解析としては、不連続面をジョイント要素で表現し⁶⁾有限要素法で解析する手法が一般的によく用いられる。また最近では、不連続性岩盤を等価な連続体モデル⁷⁾⁻⁹⁾あるいは等価な多孔質モデル^{10),11)}

として扱い解析を行う手法が研究されている。

いずれの場合においても、取得された不連続面データを基にモデルを作成することになり、データの質およびモデルが解析に与える影響は大きいものとする。実際に岩盤を対象とする構造物を設計する場合、事前に変形や浸透流のシミュレーションを行うが、その際、解析に用いる断面(空間)の不連続面の分布状況は、地表面踏査、調査横坑内での壁面ジョイントマッピング、ボーリングコア観察、ボーリング孔壁観察等で得られた情報を基に作成され、解析断面全域の詳細な不連続面情報を入手することは不可能である。また、部分的に取得された情報を面的あるいは空間的なモデルにするには、何らかの推定手法を適用する必要がある。その手法の善し悪しが解析結果に影響をおよぼし、如何に優れた構成関係を用いていても意味のない結果を得ることになる。しかし、施工前に解析領域全域の情報を得ることには制約がある。したがって、より良いデータの取得と原位置の状況に基づいた推定手法の適用が必



(a) Plan



(b) Profile in A-C Section

(Ps : slate, Gp : granite porphyry, Rh : rhyolite,
A, B & C : boreholes)

Fig.1 Location of boreholes and geology

要となる。

本研究では、**Fig.1**に示すような原位置において5本のボーリング孔を設け、ボーリング孔壁観察を行い、得られた不連続面情報の解析を行った。また、あるボーリング孔で観測された結果をもとに不連続面の分布特性の推定を行い、別のボーリング孔に沿ってこの推定結果から求められるき裂頻度と実際に観測された結果の比較を行い、推定手法の妥当性や問題点の検討を行った。次に、その推定手法を用い、ボーリング孔間のき裂頻度分布を推定し、不連続性岩盤のモデル化を行った。

2. 原位置地質概況

本研究で調査を行った原位置は、丹波美濃帯に属し、火山活動により形成された陥没盆地（コールドロン）の端に位置する。**Fig.1(b)**に示すように、火山活動によって形成された流紋岩質凝灰岩、花崗岩、

花崗斑岩が多く分布し、火山活動以前に基盤を形成していた粘板岩は、陥没に際し陥落し、火山性の岩盤中に浮いているように不規則に分布している。地表付近には、風化堆積物の層が存在する。

流紋岩質凝灰岩、花崗岩、花崗斑岩では、不連続面は2~3の明瞭な卓越方向をもって存在し、卓越方向に沿った不連続面は連続性を持って生成されている。また、断層・破碎帯周辺では、その方向に沿って不連続面が連続性を持って生成されているのが確認できる。これに対し、粘板岩では、火山活動後に熱水変成を受けた影響で不規則に不連続面が生成されており、不連続面に粘土充填物が多く確認できる。

これら地質調査による知見、特に、不連続面が卓越方向に対し連続性を持って存在しているということに基づき、不連続面の広がり（連続性）を考慮したき裂頻度分布図の作成を行う。

3. ボーリング孔壁観察

(1) 不連続面データの取得

Fig.1(a)に示す5本のボーリング孔で孔壁観察を行った。ボーリング孔の長さはいずれも70mである。孔壁観察は、コア観察と比較してコア採取時の乱れや欠損の影響を受けることなく、不連続面の正確な位置・走向・傾斜・開口幅・充填物の有無・水の流れなどを観察することが可能である¹²⁾。

本研究で孔壁観察に用いた装置は、ボアホールシステム(BSS : (株)コア製)である。これは、従来より孔壁観察としてよく用いられてきたボアホールテレビ(BTV)を改良する形でリモートセンシング技術を応用し開発されたもので¹³⁾、観測速度の速さ・得られたデータの処理の容易さ・画像の鮮明さ等においてはBSSがBTVより有利である¹⁴⁾。

BSSにより観察された画像データから不連続面の走向・傾斜・位置(深度)・開口幅という情報を以下の手順で求める。

BSSにより得られた画像は、孔壁の展開画像であり、ピクセル毎にR.G.B.値($f(x,y)$)をもったデータである。これを閾値法により不連続面の部分と岩石壁面部とに分離し、不連続面の形状を明瞭に抽出する^{15),16)}。2値化を式(1)によって行う。

$$g(x,y) = \begin{cases} 255 & \text{if } T_1 < f(x,y) \leq T_2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

すなわち、閾値 T_1 と T_2 により式(1)を用いて元の画像データ $f(x, y)$ の2値化を行い、バイナリデータ $g(x, y)$ に変換する。閾値 T_1 と T_2 は、各ピクセルのR.G.B.値をヒストグラムに示し、それにより決定する¹⁶⁾。これにより、ピクセルが岩石壁面にあれば黒、不連続面内であれば白となるようにR.G.B.の変換を行うことができる。このようにして、明瞭に抽出された不連続面は展開画像上では正弦波として現われる。そこで、式(2)を用いて不連続面の形状の近似を行う¹⁷⁾。

$$y = A \sin \frac{2\pi}{l}(x - B) + C \quad (2)$$

ここで、 l : ボーリング孔の外周

A : 振幅 ($A \geq 0$)

B : 初期位相 ($-\frac{2}{l} \leq B < \frac{2}{l}$)

C : 深度(基準面からの距離)

この式より、正弦波の振幅と初期位相を求め、式(3)および式(4)より走向 α ($0^\circ \leq \alpha < 360^\circ$) 傾斜 β ($0^\circ \leq \beta < 90^\circ$) を求める。

$$\alpha = \begin{cases} (2\pi + \frac{2\pi}{l}) \frac{360}{2\pi} & (-\frac{l}{2} \leq B < 0) \\ \frac{2\pi B}{l} \cdot \frac{360}{2\pi} & (0 \leq B \leq \frac{l}{2}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\beta = \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{2A}{d} \right) \right\} \frac{360}{2\pi} \quad (4)$$

つぎに、開口幅の算出を行う。Fig.2に鉛直ボーリング孔に現われる不連続面を示す。この図において、不連続面は2つの面(上面、下面)で構成されており、2つの面は同じ走向・傾斜を持ち、スムーズなものとする。真の開口幅は、下面の点 o と上面の点 a とを結ぶベクトル \vec{n} の大きさで決まる。しかし、BSS画像では、ボーリング孔壁と不連続面上面の交線上に点 a は現われず、ベクトル \vec{n} を決定することが出来ない。したがって、ベクトル \vec{n} を算定するための手法をほどこさねば、真の開口幅を見いだすことが出来ない。

ひとつの手法は、BSS画像で確認できる \vec{b} を求め、

$$\|\vec{n}\| = \|\vec{b}\| \cos \theta \quad (5)$$

としてベクトル \vec{n} の大きさを求めるものがある。この場合、 \vec{b} はボアホール軸と平行で、このベクトルの大きさが見かけ(BSS画像上)の開口幅を示し、 θ は傾斜角 β を用いればよい。この手法は簡便で、不連続面の走向・傾斜角が決まれば真の開口幅を求めることが出来る。

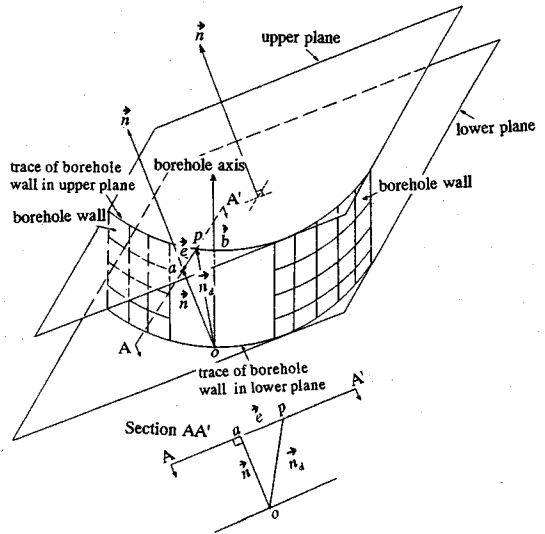


Fig.2 Aperture measurement error

しかし、この方法は不連続面の上面において Fig.2 に示す点 a と点 b の間がスムーズであるという仮定に基づいている。実際の不連続面には、ラフネス(凹凸)が存在し、本来の不連続面とは交わらない点を抽出して開口幅を算定している可能性がある。そこで本研究では、Fig.2 に示す \vec{n} を母数とするベクトル \vec{n}_d を用いて開口幅の算定を行う¹⁵⁾。プロファイルされた種々の点から Fig.2 に示すベクトル \vec{e} が最小となるようなベクトル \vec{n}_d 上の点 P を選ぶ。選択されたベクトル \vec{n}_d とベクトル \vec{e} の関係からベクトル \vec{n} を決定し、その大きさを開口幅とする。

(2) 不連続面データの解析

a) 観測方向による方向性偏向の軽減

横坑壁面やボーリング孔で観察される不連続面の頻度は、観測方向と直交する方向性をもつ不連続面が多く観察されるという偏りを生じる¹⁸⁾。言い換えれば、観測方向と平行な不連続面は観測されにくいことになる。そこで、計測方向による偏向の軽減を行うため、Terzaghiによって示された計測方向による偏向の軽減を行う手法¹⁸⁾を改良したものを本研究では観測データに適用する。

i) ボーリング孔の方向と、不連続面の法線のなす角を θ_i とする。

ii) 各不連続面に対し $w_i = \frac{1}{\cos \theta_i}$ を算出する。

iii) $W_i = \frac{w_i}{\sum w_i}$ を各不連続面が持つ荷重値(0~1)

とする。

以上の手順で求めた荷重値をもとに方向分析を行う。ここで θ_i は、不連続面（群）や観測方向により決まる変数である。実際には、不連続面を下半球投影図にプロットしコンターを描く際、プロット点に荷重値 W をプロットし、この値をもとにコンターを描くことで計測方向の偏向を軽減したコンター図を得ることができる。

ここで、Fig.3(a)の様な一定間隔で規則的に不連続面が分布しているケースを考える。この場合、真のき裂頻度が観測できる測線が一本設定される。すなわち、観測されるき裂間隔が "Spacing¹⁹⁾" と一致するような観測測線である。原位置で計測される測線と真のき裂頻度 (Spacing) が観測できる測線とのなす角 θ_i と観測されるき裂頻度の関係は、Fig.3(b)に示すような階段関数で示される。これを近似すると、

$$n = n_0 \cos \theta_i \quad (6)$$

ここで、 n : 観測されたき裂頻度
 n_0 : 真のき裂頻度
 となる。よって、真のき裂頻度は、

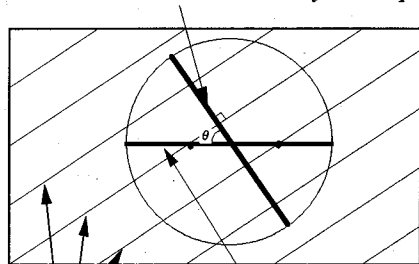
$$n_0 = \frac{n}{\cos \theta_i} \quad (7)$$

となり、観測されたき裂頻度 n に $1 / \cos \theta_i$ を乗じることにより、調査方向による出現頻度の偏向は軽減することが可能である。したがって、この手法を用いることでそれぞれの不連続面群に直交する測線で計測した場合の真のき裂頻度に、より近い値を求めることが可能となる。

b) 不連続面の方向分布に基づくセット分類

不連続面の法線を半球面上に投影することにより方向性データの図形的な解釈・解析が簡単に行える。また、それにより不連続面の集中方向やそれに伴うクラスター分析あるいはセット分類を目視的に確認することが可能となる。卓越する方向が抽出できれば、それを基に不連続モデルを作成し、DEM等により変形解析を行うことが出来る。各セットの境界を示すには、走向・傾斜角で範囲を表すか、クラスターの中心を図の輪郭から読み取り、角度を求める必要がある。この方法は、個人の技能が非常に優れていたり、調査者が調査域の不連続面の分布特性に精通している場合に大いに有効である。このアプローチを支持する意味において、Bridges²⁰⁾は、複雑でオーバーラップするようなクラスターのパターン認識において人間の能力というものを評価している。一方、個人的な誤差や能力の違いによって結果が左右されることも考えられる。特に、計測方向の偏向を正規化するための重み関数を適用する領域において、す

Scanline : to obtain joint frequency



Discontinuity Scanline in field

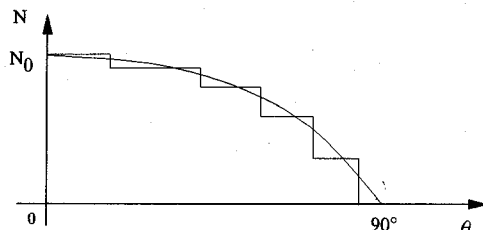
$$n = n_0 \cos (\theta_i)$$

n_0 : Joint Frequency

n : Joint Frequency by Field Measurement

θ_i : the angles formed where scanline and discontinuity cross each other

(a) Relationship between discontinuity set and scanline in regular joint model



$$n_0 = \frac{n}{\cos (\theta_i)}$$

(b) Weight function to revise the survey error

Fig.3 The concept of error in joints survey and its revise function

なわち半球面の周辺部に現われる不連続面に対しては、人間の目による判断は有効的でないと考える。

正確で個人差のないクラスター分析は、Shanley and Mahtab²¹⁾が示し、その後Mahtab and Yegulalp²²⁾が改良している。本研究で用いた手法を簡単に説明する。Mahtab and Yegulalpのアルゴリズムは、集中する不連続面、すなわち不連続面群あるいはセットとみなされるような領域は、全体のランダムな分布より集中度の高い角度（領域）として現われるという考えに基づいている。ランダムイベントと関連する確率分布は、ポアソン分布を用いて表すことが出来る。P(t,v)は、区間[0,v]においてイベントtの起こる確率を示し、

$$P(t,v) = \frac{e^{-\lambda v} (\lambda v)^t}{t!} \quad (8)$$

ここで、 t : 整数 (0, 1, 2, ...)

λ : 単位当たりの発生率

区間は、不連続面法線の方位間隔で規定される。この間隔は、走向/傾斜 (α / β) なる中心軸を持

つ立体角 ϕ の円錐によって規定される。このような円錐は、半球面上で面積 c を持つ。

$$c = 1 - \cos(\psi) \quad (9)$$

もし、半球面上ですべての方位に対し、サンプル区間が一定(単位)サイズと考えるなら、区間 v は c となる。その区間で n 個の不連続面法線がサンプル総数とするのなら、発生率 λ は、 n と等しくなり、式(8)は次のように書き換えられる。

$$P(t,c) = \frac{e^{-nc}(nc)^t}{t!} \quad (10)$$

実際には、球の中心に頂点を持つ円錐と不連続面の法線を投影した半球面の交わりで定義される計数円を用い、その内部の極を数える。立体角 ϕ は、計数円が半球表面積の1%を占める大きさを与える。また、計算に際しては出来るだけ等方・等面積の半球面上のセルを作成し、その中心をノードする。こうして求めた半球面上各ノードにおける密度分布をポアソン分布によって求める。

次にグループ化を行う。まず、ポアソン分布検定を行う。

$$P(>t,c) = 1 - \sum_{j=0}^t \frac{e^{-nc}(nc)^j}{j!} \leq s \quad (11)$$

ここで、式(11)を満足するような限界値 t_{crit} の設定を行う。その際、Shanley and Mahtab²¹⁾は、95%のポアソン分布検定 ($s=0.05$) を、Mahtab and Yegulalp²²⁾は $s=c$ として行っている。例えば、162個の不連続面に対し、立体角 10° として行う場合、式(8)より $c=0.0152$ となり、式(11)を用いて限界値は6となる。 $s=0.05$ では、同様に式(11)をもちいて限界値を5と得る。個々のノードにおいて、この限界値を越えるノードのうち、隣り合うもの同士をグループ化しクラスタリング領域を決定する。

その後、各クラスターについて確率分布(Fisher分布、Bingham分布等)を推定し、それぞれの統計量(集中方向 \vec{R} 、集中係数 κ 、偏差角 Ω)を求める。ここで、集中方向 \vec{R} とは、各不連続面の法線ベクトルの平均であり、集中係数 κ は、各不連続面セットの方向性のばらつきが小さいほど、大きな値を示すものである。偏差角 Ω は、不連続面セットのばらつきを表す角度である。

本研究では、Fig.1に示す5つのボーリング孔で観測されたデータを95%のポアソン分布検定を行い、方向分析を行った。結果をFig.4に示す。また、Fisher分布を用いて求めた統計量をTable 1に示す。Fig.4およびTable 1には、比較のため、Fig.1に示すボーリング孔AとBの区間で行ったジョイントマッピングから得られた結果も併せて示す。

Table 1 Dip direction and dip, κ , Ω and R.I. of joint sets

Borehole	set	num	Dip dir.	dip	κ	Ω	R.I.	%
A	1□	312	250	24	13.6	22.5	72.7	77.4
	2●	61	332	45	27.7	15.5	12.5	15.1
	3■	18	102	81	10.4	25.2	8.57	4.47
	4△	12	32	80	14.2	21.1	6.21	2.98
B	1□	218	237	32	9.67	26.9	55.3	61.1
	2●	113	322	40	11.8	24.2	30.7	31.7
	3■	11	112	75	8.7	27.2	6.47	3.08
	4△	12	227	70	34.1	13.4	5.73	3.36
	5▲	3	33	73	19.7	15.1	1.79	0.84
C	1□	262	120	30	10.7	25.6	58.1	59.7
	2●	161	46	38	9.37	27.4	35.9	36.7
	3■	11	125	79	4.05	42.1	4.71	2.51
	4△	5	79	64	51	10.2	1.26	1.14
D	1□	393	249	30	8.79	28.5	67.3	80.9
	2●	57	47	64	9.94	26.4	16.8	11.7
	3■	19	328	89	13.7	21.9	8.94	3.91
	4△	17	86	88	10.8	24.7	6.97	3.50
E	1□	324	247	27	11.3	24.8	60.3	67.9
	2●	136	330	57	12.1	23.9	32.6	28.5
	3■	16	272	88	2.24	66.1	6.79	3.35
	4△	1	207	77	-	-	0.31	0.21
Adit	1□	8	81	15	28.1	14.5	-	7.27
	2●	6	116	45	49.8	10.5	-	5.45
	3■	8	146	59	24.7	15.4	-	7.27
	4△	68	85	90	20.5	18.1	-	61.8
	5▲	20	331	79	80.1	29.1	-	18.2

Table 1より調査横坑の奥に位置するA, B, C孔は、卓越する不連続面群の方向性は類似しており、調査横坑入り口に近いボーリング孔D, E孔の方向性も類似する。全てのボーリング孔の解析結果で共通している点は、最も卓越している不連続面群の集中方向の傾斜が 30° 以下であり、傾斜方向についても 250° 前後である。このことから、各ボーリング孔で確認されたこの共通の不連続面群は、本研究を行った原位置で支配的であり、連続性が高く、同一の要因によって生成されているものと考えられる。

調査横坑で行ったジョイントマッピング結果(Fig.4 (f))とボーリング孔壁観察結果の比較を行う。ジョイントマッピングは、トータルステーションを用いて横坑壁に観察される不連続面の3点以上の点を計測し、不連続面の走向および傾斜を算出している。これによると、ジョイントマッピング結果では比較的調査横坑に垂直な不連続面が多く観察されている。これに対し、いずれのボーリング孔においても傾斜が 70° を越える不連続面群の出現頻度

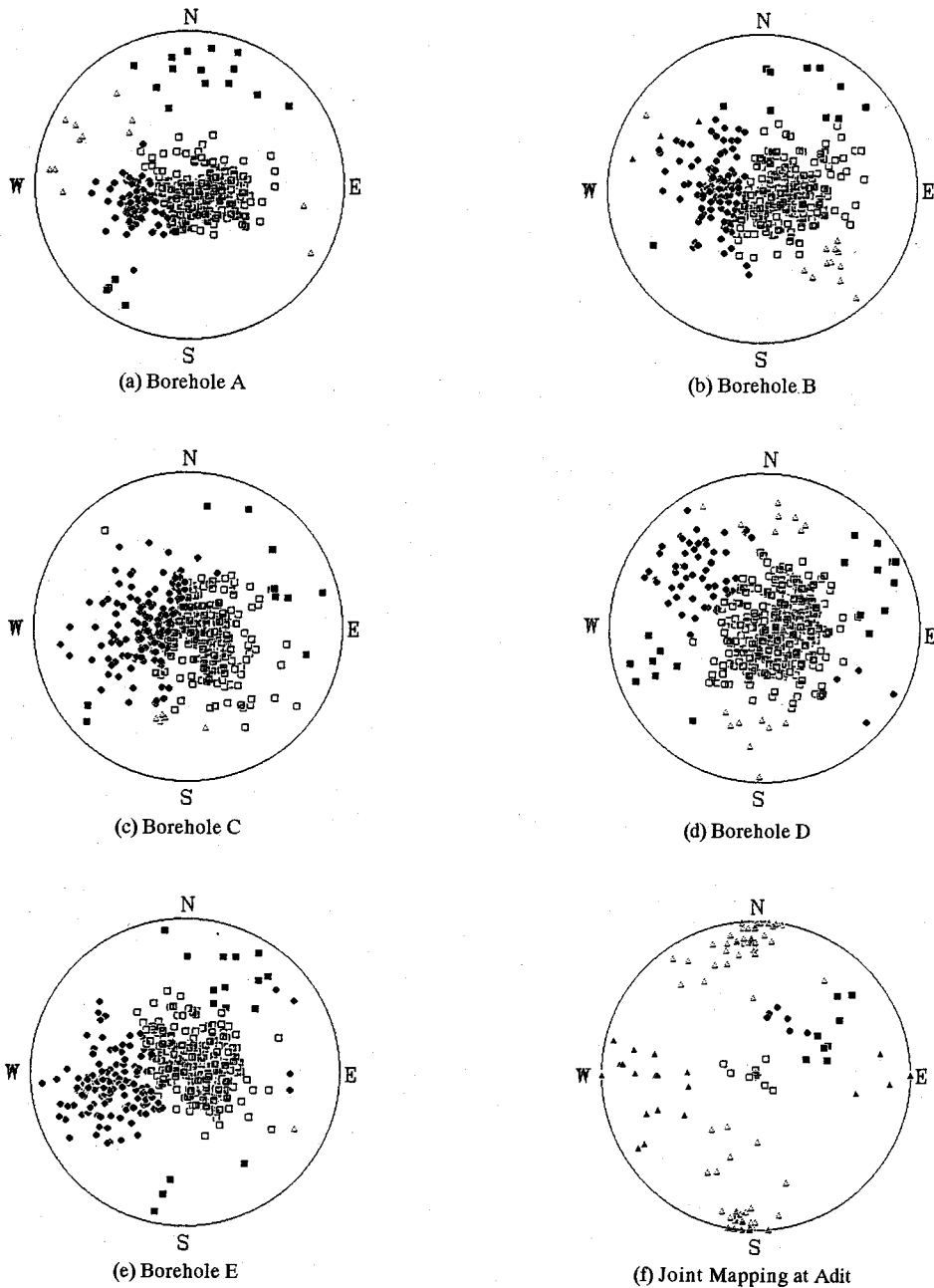


Fig.4 Lower hemisphere projection of discontinuity normals labelled

(個数)は非常に小さい。データの処理には観測方向による偏向の軽減を行い、コンターマップ等を描くが、十分に計測方向による偏向の影響を取り除くことが出来ない可能性がある。調査横坑内でのジョイントマッピング結果では、傾斜が 70° 以上の卓越する不連続面群を2方向確認した。したがって、原位置で計測を行う際、幾何学的制約および経済的制約を受けない範囲で独立する3方向について計測を

行うべきである。

c) 不連続面群の相対重要度の比較

Table 1より5つのボーリング孔で観測される卓越方向は以下の2方向である。

- ・ 傾斜方向(走向)が約 250° ($N20^\circ W$)で、傾斜が $30^\circ W$ 以下で水平に近いもの (Table 1でのSet 1)
- ・ 傾斜方向(走向)がほぼ南北方向で、傾斜

が40°Eから60°Eのもの (Table 1でのSet 2)

DEM等を用いて不連続体の解析を行う場合、要素として卓越する不連続面群を用いることがある。しかし、この結果では数の多いものが単純に卓越する方向として解析に用いることになり、数は少ないが変形や透水に影響をおよぼす不連続面を解析に組み込めない可能性がある。特に、前述したように一方向だけの観測データだけでは、結果に偏向を生じることもある。そこで、分析された不連続面群の相対重要度を比較するパラメータの提案を行う。

不連続性岩盤において、その力学的挙動および水理学的挙動は不連続面に支配され、その要因は不連続面の個数(き裂頻度)、大きさ(広がり)、開口幅(体積当たりの間隙)、ラフネス等が考えられる。そこで、どの不連続面群(セット)が、原位置岩盤に支配的な影響を与えるのかを判断するため、不連続面の個数、大きさ、開口幅を平均的に考慮したR.I.(Relative Importance)という指標を提案する。

$$R.I. = \frac{\frac{n}{n_T} + \frac{A_s}{A_{ST}} + \frac{i_v}{i_{vT}}}{3} \times 100 (\%) \quad (12)$$

ここで、R.I. : 選択した不連続面セットの相対重要度

n : 選択した不連続面セットのき裂頻度

n_T : 対象岩盤におけるき裂頻度

A_s : 選択した不連続面セットの不連続面の面積の合計

A_{ST} : 対象岩盤における不連続面の面積の合計

i_v : 選択した不連続面セットの単位体積当たりの間隙

i_{vT} : 対象岩盤における単位体積当たりの間隙

A_s , A_{ST} は、坑壁調査においてトレース長を用いる。また、 i_v , i_{vT} は不連続面の開口幅の和である。開口幅が決定できない場合や、不連続面の面積を決定できない場合には、以下のように表すことが可能である。

$$R.I. = \frac{\frac{n}{n_T} + \frac{A_s}{A_{ST}}}{2} \times 100 (\%) \quad (13)$$

$$R.I. = \frac{\frac{n}{n_T} + \frac{i_v}{i_{vT}}}{2} \times 100 (\%) \quad (14)$$

本研究では、各ボーリング孔で観察された不連続面セットについて、方向の偏向を除去するために算

出した荷重値 W_i と開口幅のデータを基に次式によってR.I.を算出した。

$$R.I. = \frac{\frac{\sum W_i}{1} + \frac{i_v}{i_{vT}}}{2} \times 100 (\%) \quad (15)$$

Table 1にR.I.を示す。また、観測されたき裂の総数に対する各セットのき裂が占める百分率(き裂百分率)も示す。これによると、C孔ではき裂百分率とR.I.の間には大きな違いがないが、他の孔では、セット1と2においてき裂百分率よりR.I.は小さい値を示している。特に、D孔では、き裂百分率よりR.I.がセット1において20ポイントも小さく、逆にセット3や4のようなき裂百分率の小さいセットのR.I.が顕著に増加していることがわかる。セット1や2だけを用いて不連続体の解析を行うと、抽出したセット方向に過大評価な結果となり、き裂数は少ないが、変形や透水に影響をおよぼすようなき裂を数値解析に挿入することが出来ない可能性がある。

観測により、2種類の不連続面セットを得たとする。両セットとも同数の不連続面が観測されていれば、同等の評価により数値解析に適用することになる。しかし、R.I.を用いて評価を行い、一方が他方より大きい値を示せば、R.I.を考慮して数値解析に適用することがより適切で原位置の状態にそくした解析が可能となると考える。当然、変形性や透水性は個々の不連続面においてそれぞれの特性を調べて評価すべきであり、開口幅や広がり大きいものが変形性や透水性に支配的であると考えますが、実際には調べる必要がある。しかし、本研究で扱ったボーリング孔で観察した不連続面は、1孔につき300以上であり、すべての変形特性や透水特性を評価することは不可能にちかい。不連続面の個数だけでなく、開口幅や広がり大きいものが、変形性や透水性に支配的であるとするならば、R.I.は原位置で観測した不連続面の情報からより有効的に不連続面を評価する指標であると考えられる。

4. 不連続性岩盤の擬似連続体モデル

前章では、不連続面の抽出およびデータの解析について述べてきた。それにより、不連続面の方向分析を行い、卓越する方向を抽出し不連続体モデルの解析を行うためのデータを作成することが可能となった。本章では、ボーリング孔で観測された不連続面データをもとに、擬似連続体モデルに属すると考えるき裂頻度分布図の提案を行い、ボーリング孔

間の未知地盤の不連続面の分布特性の推定を行う。

櫻井ら²³⁾は、地山モデルを3種類に分類し、非常に破碎された風化の進んだ地山の場合、卓越した不連続面だけでなく多くの不連続面が存在し、見掛け上、地山の挙動が連続体のような挙動をすとし、これを疑似連続体モデルと定義している。このような地山を考えると、不連続体モデルを適用することは可能であるが、実際に地山すべてのジョイントの力学特性および透水特性を調査することは不可能である。したがって、解析を行う際、不連続体の影響を考慮した連続体モデルを用いるのが有効であると考えられている。本研究で示すき裂頻度分布図は、疑似連続体モデルの範疇に属するものとする。き裂頻度分布図から要素毎にき裂頻度を得ることでそれに対応する力学定数や透水係数を定めることができ、不連続面を考慮した連続体解析ができるものとする。

(1) き裂頻度分布図の概念

原位置不連続性岩盤を調査することにより、不連続面の位置、走向・傾斜、開口幅というパラメータを取得することが可能である。従来、これらのパラメータを用いてモデル化を行う際、各パラメータを統計的に処理し不連続面を発生させる手法が多く見られた。しかし、統計的に処理してしまうことで、観測された位置に不連続面が存在するのに、その位置に不連続面がないように表現してしまうことになる場合がある。

Fig.5に示すき裂頻度分布図²⁴⁾は、観測された位置から計測した走向・傾斜をもとにして、調査対象領域に不連続面を発生させる決定論的モデルであり、確率的に不連続面の存在位置を決定しているモデルとは性格が異なるものである。以下に、き裂頻度分布図作成の基本的な手順を示す。

- 1) 調査対象域においてボーリング孔壁観察を行い、不連続面の位置、走向・傾斜、開口幅を分析し抽出する。
- 2) 得られたパラメータをもとに、2つのボーリング孔間に無限に広がる平面とし不連続面を発生させ対象領域を補間する。
- 3) 対象領域を任意の大きさのメッシュに分割し、メッシュを通過する不連続面のトレース長を累積する。
- 4) 各メッシュ毎に累積した不連続面のトレース長をメッシュの面積で除し、2次元のき裂頻度を求める。

このようにして不連続面を発生させ、対象領域内のき裂頻度分布の把握を行う。しかし、このき裂頻度

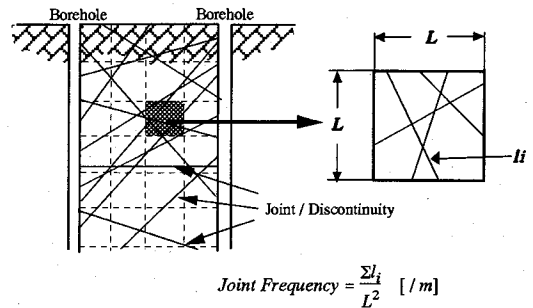


Fig.5 The concept of joint frequency map²⁴⁾

分布図の作成手順には2つの問題点が挙げられる。

- i) 同一の不連続面が両端のボーリング孔の両方で観測された場合、重複して(2重に)不連続面を表現する(数える)ことになる。
- ii) 不連続面を無限に広がるとしている。

以上のような理由のために、推定されるき裂頻度が実際の値と異なるものとなっていると考える。本研究では、この2つの問題点について検討を加える。

(2) き裂頻度分布図におけるデータ重複の除去

同一の不連続面が両端のボーリング孔で観測された場合、左右のボーリング孔から重複して不連続面を発生させてしまうという点について改良を行う。

$$W_{Lx} = 1 - \frac{x}{X_0} \quad (16)$$

$$W_{Lx} = 1 - \frac{X_0 - x}{X_0} \quad (17)$$

- ここで、
- W_{Lx} : 左ボーリング孔が情報に与える荷重値
 - W_{Rx} : 右ボーリング孔が情報に与える荷重値
 - X_0 : 2孔間の距離
 - x : 左ボーリング孔から目的メッシュまでの距離

式(16)、(17)およびFig.6に示すように、左側のボーリング孔で不連続面を観測した場合、左側のボーリング孔での荷重値を1とし、右側のボーリング孔では荷重値0を持たせる。このように、観測ボーリング孔からの距離に比例して1から0に減少する荷重値を、発生させた不連続面のメッシュ内のトレース長に乗じることにより、同一の不連続面を両端のボーリング孔から発生させても、必ず $W_{Lx} + W_{Rx} = 1$ が成り立つため、領域内では常に荷重値1を持ち、データの重複を除去する事が可能である。さらに、片方のボーリング孔でしか観測されない場合、観測

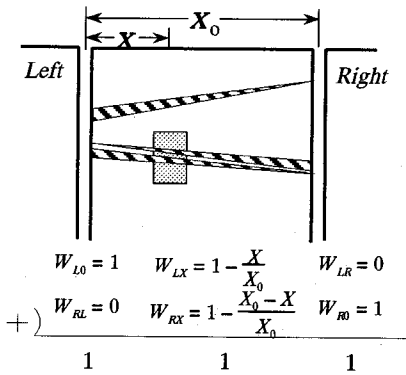


Fig.6 Set up the weight in consideration of distance

されたボーリング孔では不連続面が存在しているのは確かなので存在確率を持ち、反対側のボーリング孔では観測されないの、存在確率0を与える必要がある。これは、荷重値をそのまま存在確率として利用できる。

次に、この荷重値を与えることの妥当性を検討する。Fig.7はD孔におけるき裂頻度の実測値と、孔間の距離が4.09m離れたE孔から走向・傾斜、位置情報をもとに上述の手法を用いて推定したD孔のき裂頻度を示す。この場合、き裂頻度はボーリング孔に沿って1m幅でのき裂頻度を算定し、深さ方向に対する変化を示す。Fig.7からわかるように、ここでは非常に高い相関性が見られ、この推定手法の妥当性が確認できる。同様に、59.07m離れているA孔のき裂頻度の実測値とC孔から推定されるA孔のき裂頻度の推定値をFig.8に示す。Fig.8ではFig.7ほど高い相関性は得られない。これは、距離が離れるにしたがい3次元の広がりやボーリング孔間距離の影響があるものと考えられる。今後の検討課題である。

(3) 不連続面の広がりに関する検討

原位置岩盤では、不連続面は有限の広さを持って分布している。筆者ら²⁴⁾は、不連続面を対象領域内で無限に広がるとしてき裂頻度を算出し、き裂頻度分布図の作成を行ってきた。しかし、これでは広がりや連続性を考慮しておらず、実岩盤での不連続面分布状況と異なる。そこで、原位置の状況にそくした何らかの仮定を設け、多少でも原位置の状況に近付ける必要がある。

本研究で対象とした岩盤周辺で確認されている断層の方向と、原位置で計測した不連続面の方向は一致する傾向が見られる。このことから、原位置岩盤では断層活動に伴い規模の小さな不連続面が断層方向に沿って発生したものと考えられる。すなわち、不連続面は幾つかの卓越する方向性を有し、その方向の

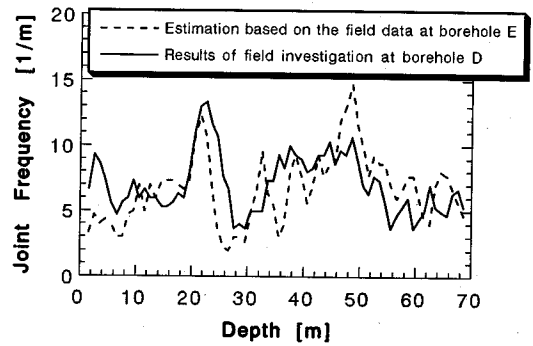


Fig.7 Investigation v.s. estimation for joint frequency

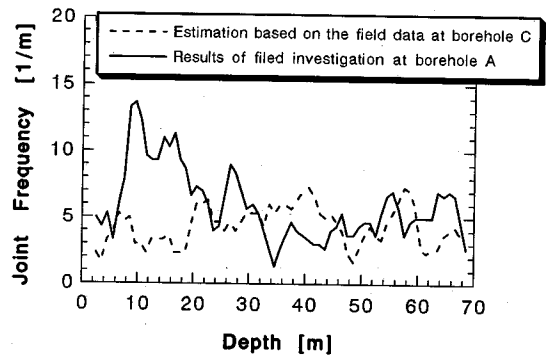


Fig.8 Investigation v.s. estimation for joint frequency

平面に沿うように不連続面は有限の広さをもって分布している。不連続面の一つ一つは、有限の大きさであるが、卓越する方向に沿っては不連続面が断続的に存在することになる。実際に、第3章に示す通りボーリング孔での観測は卓越する方向が確認できている。したがって、卓越する方向性に沿った不連続面（本研究の対象とする領域ではほとんどの不連続面がセット1か2に属している）は広がり有限であるが、非常に連続性が高いことになる。そこで、次のような仮定を設ける。

仮定1 不連続面は一つの共面上に断続的かつ周期的に不連続面群として存在する（Venezianoモデル的）²⁵⁾。

仮定2 開口幅が大きいほど不連続面の広がり大きく、不連続面の共面上での連続性は高い。

以上の仮定に基づき、以下の手順により不連続面を共面上に発生させる。

- i) 開口幅を0から1の閾値 t に変換する。
- ii) 周期的な関数 $f(x)$ を設定する。
- iii) $t > f(x)$ が成り立つ部分で不連続面が存在するとする。

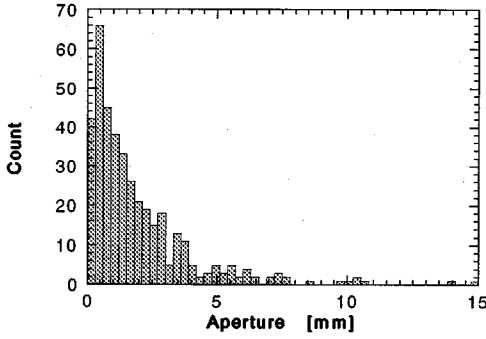


Fig.9 Histogram of joint aperture

ここで、開口幅を閾値に変換する関数は上に凸、周期性を示す関数は下に凸とする。BSSの観測結果からは、開口幅の小さな不連続面が非常に多く確認されている。一例をFig.9に示すが、開口幅が3mm以下の不連続面がほとんどである。Fig.9のヒストグラムの分布形状から、開口幅が3mm以下でも、より開口幅の小さいものが多く存在する傾向にある。このことから、開口幅の小さな範囲でもわずかな開口幅の違いで存在する不連続面の数がことなり、広がりやの違う不連続面になることになる。したがって、その部分を強調するため先に述べる関数形状を用いる。実際には、トレース長と開口幅の関係から関数形状を設定することが必要と考えるが、ボーリング孔壁観察からはトレース長を得ることが出来ない。したがって、本研究ではFig.9の分布形状をもとに関数形状の設定を行った。

a) 開口幅と閾値

開口幅を閾値に変換する関数をFig.10に示す。開口幅を0から1の閾値に変換するために次式を用いる。

$$t = \frac{m_2 - m_1}{(max)^{m_3}} ap^{m_3} + m_1 \quad (18)$$

ここで、 ap : 開口幅
 t : 閾値
 max : 最大の開口幅
 m_1, m_2, m_3 : 定数 ($0 \leq m_1 < m_2 \leq 1$)
 $(0 < m_3 < 1)$

本研究では、 $m_1=0.05, m_2=0.95, m_3=1/3, max=10$ として検討を行った。き裂の開口幅が、10mm以上のき裂はすべて10mmとして扱った。

b) 閾幅と不連続面の存在

不連続面の断続的な存在を表現する周期的な関数をFig.11に示す。周期 T で繰り返す

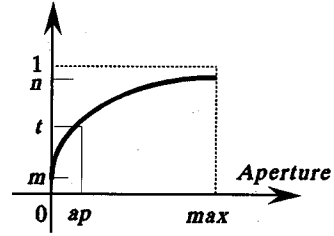


Fig.10 The function is determined by the threshold t

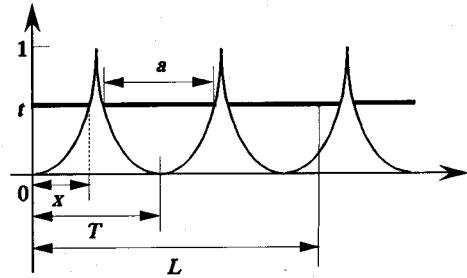


Fig.11 The shape of function represents the periodicity of joints

$$f(x) = \left(\frac{T}{2}\right)^{-q} x^q \quad (1 \leq q) \quad (19)$$

を基調とする下に凸の周期関数を設定する。Fig.11に示すように、 $f(x) < t$ が成り立つ範囲で不連続面はトレース長 a_T の広がりを持って存在する。 a_T は周期的関数 $f(x)$ の周期 T 、閾値 t 、定数 q によって表現できる。まず、 $t = f(x)$ を満たす x を求める。すなわち、

$$t = \left(\frac{T}{2}\right)^{-q} x^q \quad (20)$$

より

$$x = \frac{T}{2} t^{\frac{1}{q}}$$

となる。次に、周期的な不連続面の断続的なトレース長一つ分 a_T を閾値 t で表す。

$$a_T = 2x = T t^{\frac{1}{q}} \quad (21)$$

あるメッシュ内の一つの不連続面のトレース長は、式(21)で示す a_T が L/T 周期毎に繰り返されているので、

$$\Sigma a = \frac{L}{T} a = L t^{\frac{1}{q}} \quad (22)$$

となる。以上の方法は、トレース長 a_T は計算するメッシュ内に納まり L/T 回繰り返される場合のき裂

頻度の算出方法である。しかし、不連続面の連続性が非常に大きく、トレース長 a_T が対象とするメッシュに納まらず、幾つかのメッシュに抱える場合もある。この場合、トレース長 a_T が T/L 個のメッシュに依存していることになる。そこで、厳密な方法ではないが、 a_T を T/L 個に分割して各メッシュ内のトレース長を求めるため、 a_T を T/L で除する。結果として式(22)に帰着し、この式は周期 T が消去されるので、き裂頻度を考えるには不連続面の繰り返し周期 T の大きさは影響しない。

(4) き裂頻度分布図の作成

以上のような手順で断続的に不連続面を発生させると、き裂頻度分布図のメッシュを通る不連続面のトレース長 L' は式(23)のようになる。式(23)では観測位置からの距離による重み W_{Lx} および W_{Rx} も同時に考慮している。

$$L' = W \Sigma a_T = WL \left(\frac{m_2 - m_1}{\max^{m_3}} a_T^{m_3 + m_1} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (23)$$

ここで、 L' : メッシュ内の断続的に発生させたトレース長

$$W : W_{Lx} \text{ または } W_{Rx}$$

また、各メッシュのき裂頻度は式(24)で表せられる。

$$n = \frac{\Sigma L'}{S} \quad (24)$$

ここで、 n : き裂頻度 (2次元)

$$S : \text{メッシュ面積}$$

以上のような手順で、データの重複を除去し、開口幅により不連続面の広がりや開口幅の大きい不連続面群の分布図をFig.12に示す。

5. まとめ

本研究では、地下空洞掘削予定地において、地質調査および不連続面調査を行い、不連続面データから走向・傾斜、開口幅等を解析するとともに、卓越方向の分析による不連続体モデルとき裂頻度分布図による擬似連続体モデルの作成を行った。

不連続面調査では、ボーリング孔壁をボアホールスキャナシステムにより観察し、詳細な不連続面分布特性の把握を行った。特に、画像処理(R.G.B.による閾値法)によりラフネスを考慮した不連続面開口幅の算定を行った。

得られた不連続面の方向性に関するデータをもとに方向性分析を行い、不連続面群の抽出を行った。これにより、個別剛体要素法などの不連続体解析が可能となる。しかし、この不連続面群の抽出では数

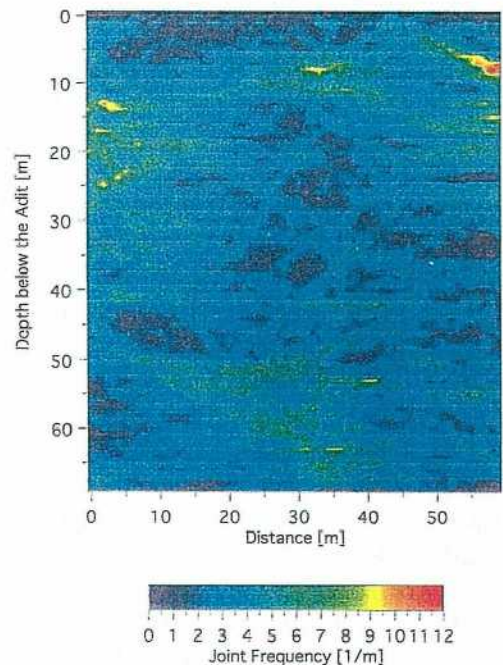


Fig.12 Joint frequency map

を考慮しただけで、力学的・水理学的影響を十分考慮した評価には至っていない。そこで、本研究では不連続面群の相対重要度を示す $R.I.$ の提案を行った。これは、不連続面の個数、大きさ(広がり)、開口幅の影響を考慮に入れたパラメータであり、広がりや開口幅の大きい不連続面群や開口幅の大きい不連続面群が、力学的および水理学的挙動に影響を及ぼすとすれば、不連続面の数だけでなくそれらの特性も考慮した不連続面群の評価を不連続面の観測結果から行えることになる。実際に、き裂の個数は少なくとも $R.I.$ の値が個数の比率より大きいものがあることが確認された。本研究では、ボーリング孔壁観察データが中心であり、広がりに関する考慮は不十分であるが、数は少ないが、開口性が比較的大きい不連続面群が存在することが確認できた。 $R.I.$ は、従来の不連続面の個数だけで卓越性を評価するよりも、不連続面群の力学的および水理学的特性を反映し、解析モデル作成に有為な情報を与えるパラメータであるとする。

擬似連続体モデルとして、き裂頻度分布図の提案を行った。作成にあたり、原位置の地質構成や断層の方向と不連続面の方向との比較を行い、原位置の地質構造を考慮に入れたモデルの適応を行った。また、不連続面の広がりについては、開口幅を指標として検討を行った。すなわち、開口幅の大きい不連続面は連続性が高い、といった考えである。このき

裂頻度分布図は、き裂頻度という定量的な値と力学定数や弾性波速度との関係を比較することで、解析モデルや解析の初期値モデルとして用いることが出来る。例えば、弾性波ジオトモグラフィにおいて初期モデルの設定は精度の良い解析を行ううえで必要なことである。ここで、池田により示されているき裂頻度と弾性波速度の関係²⁶⁾を用いると、き裂頻度分布図から、対象領域の弾性波速度分布図を求めることが出来る。それをもとにジオトモグラフィ解析を行うことで、従来の初期モデルを速度一定とするモデルより、より現実的な解析が出来うものとする。また、孔内載荷試験の結果とき裂頻度分布図より求めた載荷地点のき裂頻度を比較することにより、き裂頻度分布図から載荷試験を行っていない地点の力学定数を推定することができる。結果をFig.13に示す。これにより、力学挙動を検討する疑似連続体モデルができるものとする。

これら疑似連続体モデルとしてのき裂頻度分布図の適用は別途詳しく述べるが、疑似連続体モデルとしてのき裂頻度分布図は力学のおよび水理学的解析モデルとなるだけでなく、ジオトモグラフィなどの解析において精度向上にも貢献できうるものとする。

参考文献

- 1) Cundall, P.A. : The measurement and analysis of acceleration in rock slope, *Ph.D. Dissertation, University of London, Imperial College of Science and Technology*, 1971.
- 2) Cundall, P.A. : A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems, *Proc. of Symp. on Rock Fracture (ISRM)*, Nancy, paper II-8, 1971.
- 3) Shi, G.H. : Discontinuous deformation analysis: a new approach to the statics and dynamics of block systems, *Ph.D. Dissertation, University of California at Berkeley*, 1985.
- 4) Long, J.C.S., Remer, J.S., Wilson, C.R. and Witherspoon, P.A. : Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, *Water Resource Research*, Vol.18, No.3, pp. 645-658, 1982.
- 5) Dershowitz, W.S., Gordon, B.M. and Kafritsas, J.C. : A new three dimensional model for flow in fractured rock, *IAH Conference Jan. 7-12, 1985, Tuscon Arizona, Vol.XVII proceedings published by a committee of USA members of the International Association of Hydrologists*, pp.449-462, 1985.
- 6) Goodman, R.E., Taylor, R.L. and Brekke, T.L. : A model for the mechanics of jointed rock, *Journal of SM & FD*, Vol.94, pp.637-659, ASCE, 1968.
- 7) Oda, M. : Fabric tensor for discontinuous geological materials, *Soils & Foundations*, Vol.22, No.4, pp.96-108, JSSMFE, 1982.
- 8) 京谷孝史 : 不連続性岩盤の力学特性評価における損傷力学の適用に関する基礎的研究, 名古屋大学博士論文, 1989.
- 9) Cai, M. and Horii, H. : A constitutive model of highly jointed rock masses, *Mechanics of Materials*, Vol.13, pp.217-246, 1992.
- 10) Barenblatt, G., Zheltov, I.P. and Kochina, I.N. : Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks, *Sov. Appl. Math. Mech.* 24(5), pp.852-864, 1960.
- 11) Neuman, S.P. : Stochastic continuum representation of fractured rock permeability as an alternatives to the REV and fracture network concepts, *Proc. of 28th U.S. Rock Mechanics Symp.*, Balkema, pp.533-561, 1987.
- 12) 谷本親伯, 岸田潔, 安藤拓 : 岩盤不連続面に関するデータベース作成のための基礎的研究, *ダム工学*, pp. 35-44, 1993.
- 13) Murai, S., Tanimoto, C., Matsumoto, Y. and Nagata, K. : Development of borehole scanner for underground geological survey, *Proc. of 16th Congress of International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.26, Part B7, Commission VII, pp. 391-395, 1988.
- 14) Tanimoto, C., Murai, S., Matsumoto, Y., Kishida, K. and Ando, T. : Immediate image and its analysis of fractured/jointed rock mass through the Borehole Scanner, *Fractured and Jointed Rock Masses*, Vol.1 of 3, pp.225-232, 1992.
- 15) Thapa, B.B., Goodman, R.E., Tanimoto, C. and Kishida, K. : Analysis of in-situ joint strength anisotropy and aperture, *Proc. of the 26th Symposium of Rock Mechanics, Committee of Rock Mechanics J.S.C.E.*, pp. 549-553, 1995.
- 16) Thapa, B.B. : Analysis of *in situ* rock strength using digital borehole scanner images, *Ph.D. thesis*, University of California at Berkeley, 1994.
- 17) 谷本親伯, 堀田憲一, 安藤拓 : ボーリング孔壁観察による切羽前方地質予知に関するデータベースの構築, 第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 51-55, 1991.
- 18) Terzaghi, R.D. : Source of error in joint surveys, *Geotechnique*, Vol.15, pp.287 - 304, 1965.
- 19) Grossmann, N.F. : New Developments in the In-situ Determination of Rock Mass Parameters, *A Short Course on Dam Foundations in Rock Masses, 1993 ISRM International Symposium EUROCK '93*, pp.47 -

- 79, 1993.
- 20) Bridges, M.C. : Identification and characterisation of sets of fractures and faults in rock, *Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Loen, Norway*, N. Barton and O. Stephansson (eds), Balkema, Rotterdam, pp.19 - 26, 1990.
- 21) Shanley, R.J. and Mahtab, M.A. : Dekineation and analysis of clusters in orientation data, *Journal of Mathematical Geology*, Vol.8, No.3, pp.9 - 23, 1976.
- 22) Mathtab, M.A. and Yegulalp, T.M. : A rejection criterion for definition of clusters in orientation data, *In Issues in Rock Mechanics, Proceedings of 22nd Symposium on Rock Mechanics*, Berkeley, R.E. Goodman and F.E. Heuze (eds), American Institute of Mining Metallurgy and Petroleum, Engineers, New York, pp.116 - 123, 1982.
- 23) 櫻井春輔, Deeswasmongkol, N., 進士正人 : 現場計測結果に基づく切取り斜面の安定性の評価, 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 307 - 312, 1987.
- 24) Tanimoto, C., Kishida, K., Yoshizu, Y. and Kunii, K. : Seismic Attenuation Geotomographic Technique in Designing a Large Underground Cavern, *Proc. of the 1994 ISRM International Symposium (Van Sint Jan (eds))*, Vol.1, pp.195 - 206, 1994.
- 25) Dershowitz, W.E. and Einstein, H.H. : Characterizing Rock Joint Geometry with Joint System Models, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Springer-Verlag, Vol.21, pp.21 - 51, 1988.
- 26) 池田和彦 : 割れ目岩盤の性状および強度, 応用地質, 第20巻, 4号, pp.158 - 170, 1979.

(1995. 11. 17 受付)

THE SURVEY AND THE ANALYSIS OF ROCK JOINT AND THE DETERMINATION OF JOINTED ROCK MASS MODEL

Chikaosa TANIMOTO, Kiyoshi KISHIDA, Koji TABATA,
Yoichi YOSHIZU and Kimihiko KUNII

In order to grasp the distribution of rock joint and to construct the jointed rock mass model, we have carried out the borehole survey through the Borehole Scanner System and have analyzed the image data so as to obtain a location, orientation, aperture etc. of rock joint. Based on the analyzed joint data, we have constructed two kinds of jointed rock mass model; namely a discontinuous model and an equivalent continuous model. The former is based on the cluster analysis in addition to the relative importance which is our concept and considers of joint frequency, joint area, joint aperture. The latter consists of the joint frequency map which considers of geological structure and joint aperture and takes an advantage of not only the mechanical numerical simulation but also the application of geotomography analysis.