

---

投稿論文

**Paper**

## 岩盤割れ目性状の評価方法に関する一考察

### A METHOD OF EVALUATION FOR TWO- AND THREE-DIMENSIONAL DISCONTINUITY NETWORKS

大西 有三\*・鍵本 広之\*\*

By Yuzo OHNISHI and Hiroyuki KAGIMOTO

It is natural that rock mass has many discontinuities. Detection of discontinuities is one of the most important factors for site characterization. Mapping of discontinuity networks along a scanline or on a defined area is an established technique for sampling the attitude and spacings of the discontinuities. However, the method to evaluate and simulate rock discontinuities is not established yet. This paper describes two- and three-dimensional modeling methods for discontinuous rock masses based on the quantitative estimation of the discontinuity distribution. Several techniques to interpret discontinuity mapping data have been proposed and evaluated.

*Keywords*: discontinuity, rock joint network modeling, joint map, sampling

#### 1. はじめに

岩盤の不連続性に関する研究は、近年の石油の地下備蓄などの地下空間の開発や放射性廃棄物地層処分の問題などのクローズアップに伴ってますます盛んに行われるようになってきている。そして岩盤の不連続部分を考慮に入れた力学的・水理学的解析が数多く試みられているようであるが、それらの解析に用いられている岩盤のモデルは極端に理想化されたものが多く、実際の岩盤からかけ離れたものになっていることが多い。またこれらの解析によって得られる解の精度は用いたモデルの精度に大きく影響を受けるので、実際の問題を考える場合には用いる岩盤モデルに細心の注意を払う必要がある。

実岩盤の解析を行う場合に用いる岩盤モデルを作成する場合、まず岩盤の節理性状を正しく把握する必要がある。そのためにはのちに行う節理要素の評価方法を考慮に入れた統一的かつ計画的な調査を行わなければ、調査がただデータを集めただけに終わってしまいかねない。従来、岩盤の評価方法は、岩盤分類と定性的な評価しかされておらず、今回示すような定量的な統計手法ではと

らえられていないのが実状である。したがって本研究では節理調査に用いる1つの“ものさし”を提案し、その有効性を確認するために実際の岩盤に適用して考察を行う。さらに岩盤の三次元的なモデル化についても、従来から用いられている円盤を仮定したモデルと対比して多角形節理を仮定したモデルの有効性とその将来性を検討する。

#### 2. 現地調査

3. に示す節理要素の評価方法を適用する岩盤としては、以下のような地点を対象としている。調査地点は瀬戸内海の小島（総面積約2.8 km<sup>2</sup>）である。島を構成する岩石は、中生代白亜期系の広島型花崗岩に属する粗粒～細粒の黒雲母花崗岩とこれを貫くひん岩あるいはアブライトである。島の表層付近の風化帯は一般に山稜部で厚く20～30 m、海岸部で薄く0～10 mを示す。黒雲母花崗岩中にはNNE～SSW、NNW～SSE方向の断層破碎帯が随所に発達し、岩の貫入方向と比較的よく調和し、これらの断層破碎帯により島内は4つの地質ブロックに区分される。

節理サンプリングは海岸部の水平露頭面で行われ、露頭は比較的良好な岩盤状況（C<sub>M</sub>～C<sub>H</sub>級岩盤）であった。調査面では露出状況が良好であり、調査面積は6.0×

\* 正会員 Ph.D. 京都大学助教授 工学部交通土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

\*\* 正会員 工修 電源開発(株) (〒104 中央区銀座6-15-1)

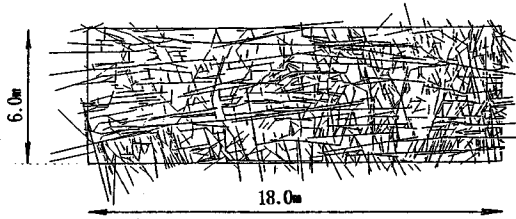


Fig. 1 Trace mapping (length 0.3 m~5.0 m).

18.0 m であり、露頭を十分清掃した後に節理の走向・傾斜・長さ・開口幅・節理の終結状況を記録し、節理トレースのスケッチ (Fig. 1) を行った。

以下 4. ではこの現場の岩盤の実状況の詳細を述べ、3. ではその評価を行う際に用いた評価手法の理論体系を述べる。

### 3. 節理要素の評価方法

実際の岩盤には断層などの長大な割れ目が存在し、その間にはスケールの小さい割れ目が散在している。ここでは、断層などの長大な割れ目は取り扱わず、その間をうめる細かい割れ目のみに着目する<sup>1)</sup>こととし、以下各節理要素の具体的な評価方法について述べる。

節理性状を支配していると考えられる要素には、節理の方向・大きさ・数・開口性などが挙げられるが、この節ではこれらの要素の調査の仕方、および評価の方法について順に説明する。

#### (1) 方向性の評価

岩盤中の節理は、種々の走向・傾斜を有する。その卓越方向を決定するためには、まず現場で割れ目の走向・傾斜とその数を測定し、それらのデータから走向・傾斜の密度分布を求め、その中から密度の高いいくつかの節理群を抽出する。これには菊地らの極座標による解析手法<sup>2)</sup>を用いた。この手法は節理面を球面座標上の点として表わし、球面座標上に等間隔に設けた各測定点からの距離により節理点の集合分けを行うものである。

#### (2) 大きさの評価

スケールの小さいものは個数が多く、スケールの大きいものは個数が少ないという概念を適用して、節理長が従う分布形を指数分布と仮定する。この仮定の妥当性は、調査で得られた節理長データを指数確率紙にプロットすることから確認できる。指数確率紙上ではデータが指数分布に従っている場合には各点は直線状に並び、その傾きが平均値を示すという性質がある。

さて実際に岩盤露頭面に分布している節理の長さを先のとおり指数分布と仮定すると、その確率密度関数は次のように表わされる。

$$f(l) = \lambda \exp(-\lambda l), \quad 1/\lambda: \text{節理長の平均値} \dots (1)$$

これより節理調査によって得られた節理長データからそ

の平均値を推定することができれば、式 (1) に示した確率密度関数が決定できることになる。

さて、現場の岩盤露頭面で節理調査を行う場合種々の理由により節理全体をとらえることができないことが多い。このような場合実際の節理長を正しく測定することができず、限られた情報をもとにして実際の節理長を推定しなければならない。そこでここでは節理全体が測定不可能な場合の節理長の平均値の推定方法について考察する。以下卓越方向解析を行ったのちの属群に分類された節理のみを対象にする。すなわち考えている節理群はすべて平行なものとして取り扱うものとする。さて Fig. 2 のように、測定基線となるスキャンライン<sup>3)</sup>を設置する露頭の広さには制限がある場合が多いので、実際には実長  $ab$  の測定が不可能な場合がある。したがってスキャンラインと交差する節理の半節理長  $ib$  により実長  $ab$  を評価することを考えなければならない。Fig. 2 は露頭の観察可能範囲に制限があるため半節理長の測定可能な長さが制限されている場合を示している。半節理長の長さを  $C_m$  とするとその長さは位置により変化するものであるから、

$$C = \min \{C_m\} \dots \dots \dots (2)$$

のような  $C$  という基準値を設定する<sup>3)</sup>。

$n$  をスキャンラインと交差する節理数、 $r$  を  $C$  以下の半節理長をもつ節理数とし節理長の母集団が指数分布に従うと仮定すると、サンプル数が多くなると

$$\lambda = -C \ln \frac{n-r}{n} \dots \dots \dots (3)$$

で評価できる<sup>3)</sup>。ここで、 $\lambda$  は分布の平均値の逆数である。したがって式 (2)、(3) から、測定可能な半節理長を測定することにより実際節理長が指数分布に従うと仮定した場合の平均値を推定することができる。以上により露頭に存在する節理全体が観察できなくとも、その節理長を測定することで、節理長の平均値は推定でき、それによってその確率密度関数を決定できる。

#### (3) 節理数の評価

節理は三次元空間 (岩盤) に存在するものであるが、

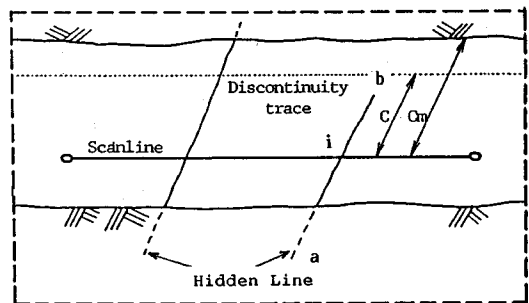


Fig. 2 Method of estimating hidden lines.

岩盤内を直接のぞきみることはできないので二次元の平面（露頭）または一次元の線分（ボーリング、スキャンライン等）における調査によって節理密度を推定せざるを得ない。ここではスキャンライン調査により節理密度を推定する手法を考察するが、このとき露頭面における節理密度、すなわち単位面積当たりの節理個数は、スキャンラインと交差する節理個数  $n_i$ 、平均節理間隔  $\bar{X}$ 、スキャンラインと節理のなす角  $\theta_i$  がわかれば、次式で評価できる。

$$N_m = \frac{1}{\bar{X}} \frac{\sum_{i=1}^{n_i} l_i \sin \theta_i}{n_i} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、定数  $k$  は、スキャンライン調査における偏向の度合、すなわち、スケールの大きい節理はサンプリングされやすく、スケールの小さい節理はサンプリングされにくいというスキャンライン調査の欠点を補正する係数で、節理長の確率密度関数を指数分布と仮定したときの定数  $k$  の値はそれぞれ 2.0 となる。

さて実際に式（4）を用いて密度の推定を行う場合、調査段階ですべてのスケールの節理をサンプリングするわけにはいかないため、そのサンプリング範囲を決定しておく必要がある。

露頭に分布している節理長が指数分布に従うとき、これをスキャンラインでサンプリングしたときに得られる長さの従う確率密度関数は次の式で表わされる。

$$g(l) = \lambda^2 l \exp(-\lambda l) \dots\dots\dots (5)$$

この確率密度関数の極値は  $l = \frac{1}{\lambda}$  のところにあり、この  $l = \frac{1}{\lambda}$  は式（1）の平均値、すなわち露頭全体に分布している節理の長さの平均値  $l$  と等しくなる。

さて、 $l = \frac{1}{\lambda}$  の両側に  $\alpha, \beta$  をとり、Fig. 3 の斜線部の面積を計算すると

$$P = \int_{\alpha}^{\beta} g(l) dl = (\lambda\alpha + 1) \exp(-\lambda\alpha) - (\lambda\beta + 1) \exp(-\lambda\beta) \dots\dots (6)$$

ここで、

$$\alpha = 0.5 \frac{1}{\lambda}, \quad \beta = 4.0 \frac{1}{\lambda}$$

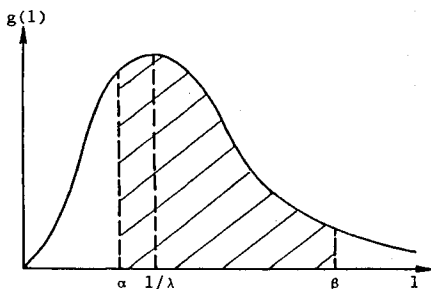


Fig. 3 Distribution of joint length sampled by scanline method.

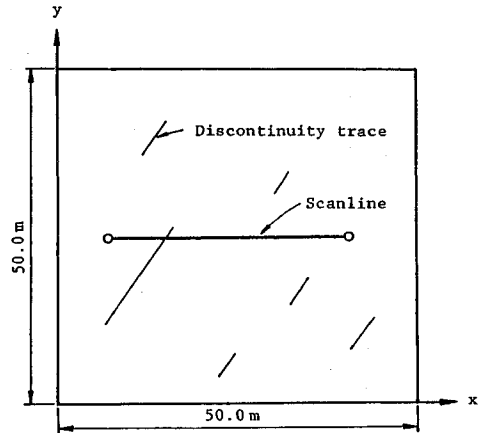


Fig. 4 Rock mass simulation model region.

とすると、 $P=0.818$  となりスキャンラインにとらえられる節理の 81.8% をカバーできることになる。

そこで実際にサンプリングの作業を行うことを考えてスキャンライン調査では、

$$0.5 \bar{l} \leq l \leq 4.0 \bar{l}$$

の範囲の節理についてサンプリングするものとする。

さて、式（4）中に現われる係数  $k$  はスキャンライン調査の偏りを補正するための係数であり、サンプリング範囲を上記のように設定するために、この値について検討を要することになる。

そこでこの範囲のサンプリングによって得られた節理の平均値  $\bar{l}_{\text{samp}}$  から、全体の平均値  $\bar{l}$  を求めることを考える。 $\bar{l}_{\text{samp}}$  と  $\bar{l}$  の関係は、

$$\bar{l}_{\text{samp}} = \frac{\lambda^2 (\beta^2 \exp(-\lambda\beta) - \alpha^2 \exp(-\lambda\alpha))}{(\lambda\beta + 1) \exp(-\lambda\beta) - (\lambda\alpha + 1) \exp(-\lambda\alpha)} \bar{l} \dots\dots\dots (7)$$

であり、上記のように

$$\alpha = 0.5 \frac{1}{\lambda}, \quad \beta = 4.0 \frac{1}{\lambda}$$

とすると

$$\bar{l} \approx 1.872 \bar{l}_{\text{samp}} \dots\dots\dots (8)$$

となる。

したがって、式（4）の定数  $k$  の値は  $k=1.872$  に設定すればよいことになる。

さて、式（4）の妥当性を確認するために次のようなシミュレーション実験を行った。簡単のため節理の方向は一定とする。

モデル領域として Fig. 4 の 50 m x 50 m の領域を設定し、その中に節理にみたてた線分を、方向を一定に保ってその長さは指数分布に従うように、面積密度を  $N=1$  (本/m<sup>2</sup>) にして発生させる。これに対し、設定位置をランダムに決定した X 軸に平行なスキャンラインを用

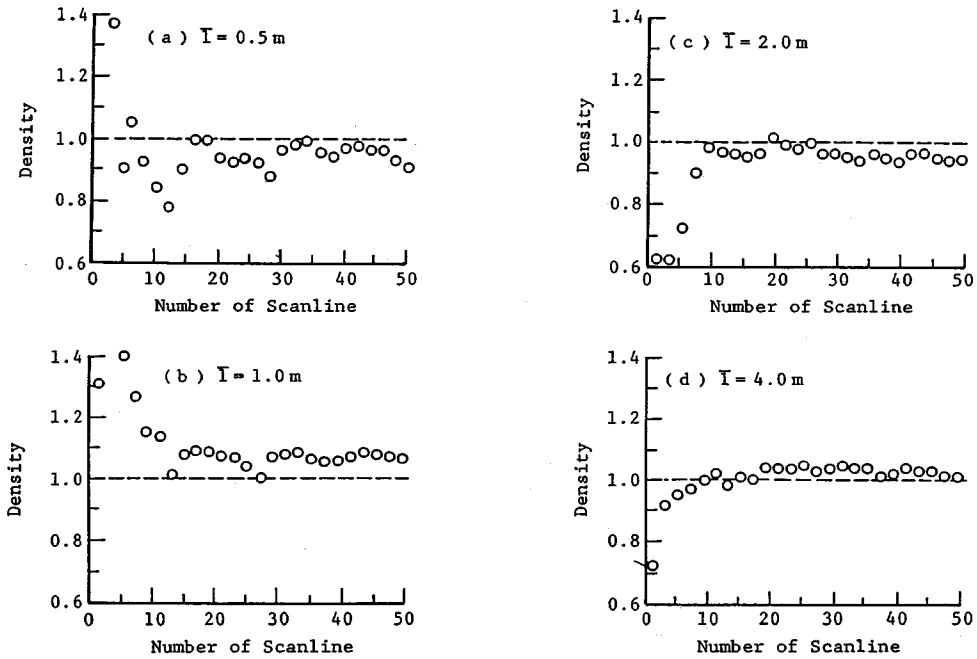


Fig. 5 Joint density estimation by number of scanline setting.

いてサンプリングを行う。

この場合、発生させる節理の平均値  $\bar{l}$  を 0.5 m, 1.0 m, 2.0 m, 4.0 m, 節理とスキャンラインとのなす角を  $90^\circ$  とし、設置するスキャンラインの長さも変化させ、またその場所を 50 回変えて、その設定回数ごとに累積されたデータにより密度を式 (4) により計算する。

これによって得られた結果を Fig. 5 (a), (b), (c), (d) に示す。それぞれの図は、スキャンラインの長さが 5.0 m, 節理とスキャンラインとが  $90^\circ$  で交差するもので、 $\bar{l}=0.5\text{ m}, 1.0\text{ m}, 2.0\text{ m}, 4.0\text{ m}$  のものである。

Fig. 5 (a)~(d) をみると、スキャンラインの設置本数が増加するにつれて、密度の推定値は真値におちついていく傾向にあるのがわかる。

次に節理の発生パターンを変えて同様のサンプリングを行い、各設置回数ごとに推定される密度の値のばらつきを求め、すなわち分散を求め、それから標準偏差を計算した。縦軸に標準偏差、横軸にスキャンラインの設置回数をとってプロットしたものが Fig. 6 (a), (b), (c), (d) である。この場合節理の発生パターンは 20 回変えている。当然のことながら、Fig. 6 をみるとスキャンラインの設置本数が多くなるとばらつきは少なくなることがわかる。そこで標準偏差が 0.082 に当たるスキャンラインの設定回数、すなわちこれは密度の推定誤差が真値の 1 割以内におさまる確率が 90 % となることであるが、これを各節理のスキャンライン長について片対数にプロットしたのが Fig. 7 である。

各節理長の平均値が  $k$  倍になればスキャンラインと交差する確率も  $k$  倍となるわけであるから、横軸にスキャンライン長  $S$  (m), 縦軸には節理の平均値  $\bar{l}$  とスキャンラインの設置本数  $n$  の積  $n\bar{l}$  をとって整理し直したのが Fig. 8 (a) である。同様に、スキャンラインと節理との交差角度  $\theta$  を  $\theta=75^\circ, 60^\circ, 45^\circ$  と変化させる。このとき得られた結果を Fig. 8 (a) と同じように示したのがそれぞれ Fig. 8 (b), (c), (d) である。Fig. 8 から、調査に使用するスキャンラインの長さ  $S$  (m) と節理の平均値  $\bar{l}$  とスキャンラインの設置本数  $n$  の積  $n\bar{l}$  は、片対数紙上でほぼ直線状に分布していることがわかる。

これまでに得られた結果は、一定方向をもつ節理をスキャンラインでサンプリングした場合のものであった。すなわち (1) において述べた卓越方向解析を行った後に得られる、方向の卓越した節理群の密度推定に用いることができると考えられる。たとえばある方向に卓越した節理群があった場合、その卓越方向と  $90$  度の角度のなす方向にスキャンラインを設置するものとする。

トンネル、地下空洞内などのように、調査範囲が限られている場合、たとえば 5.0 m 程度のスキャンラインしか使用できないような場合には Fig. 8 (a) から

$$n\bar{l} \doteq 35$$

が読み取れる。ここで節理長の平均値が  $\bar{l} \doteq 2.0\text{ m}$  程度であることが推定されていれば、

$$n \doteq \frac{35}{2.0} \doteq 18$$

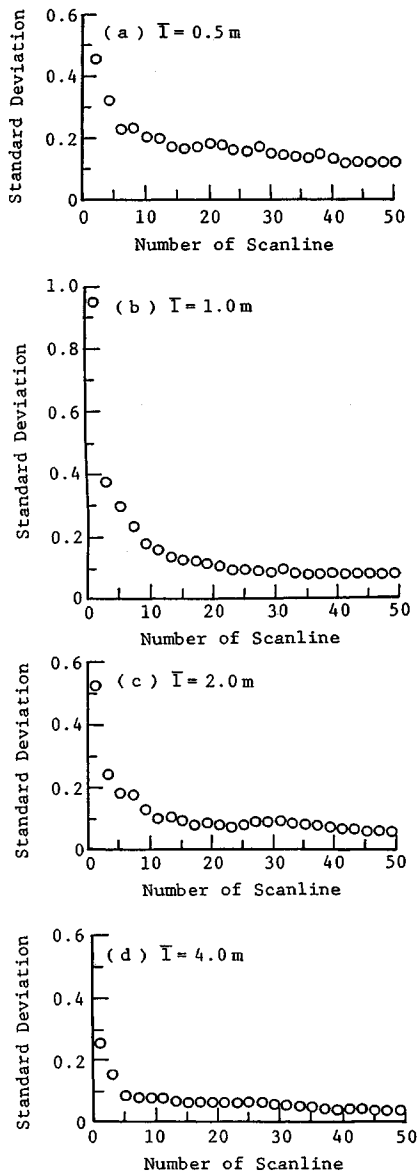


Fig. 6 Number of scanline and standard deviation of joint density.

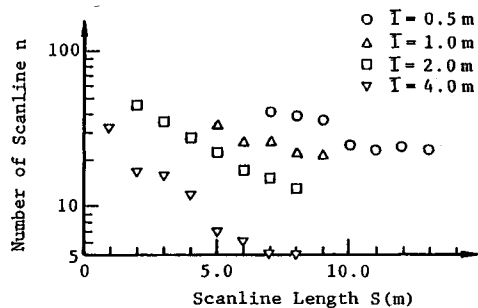


Fig. 7 Relation between number of scanlines and scanline length ( $\theta = 90^\circ$ ).

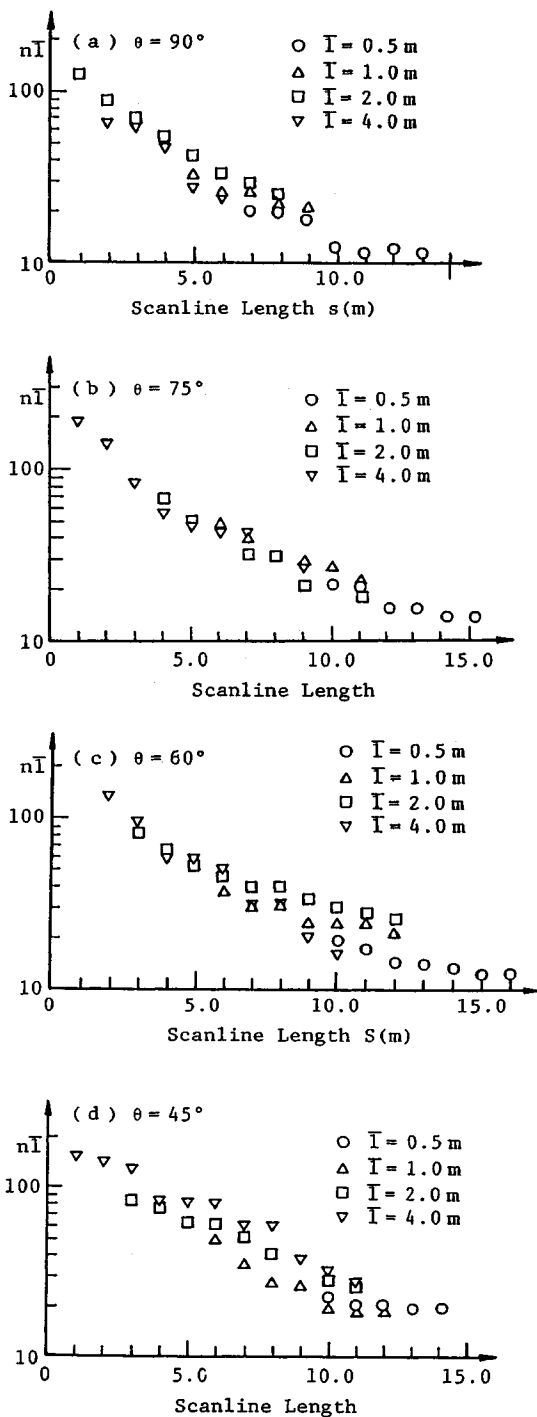


Fig. 8 Corrected relationship between  $n\bar{I}$  and scanline length.

すなわち 18 本のスキャンラインを設定して調査すればよいことがわかる。

しかしながら卓越方向がまだ判明していない場合を考えると、スキャンラインを十文字に設置すれば、平面上に分布する節理は、どちらかのスキャンラインと必ず  $45^\circ$  以上で交差するから、基準としては、 $\theta=45^\circ$  の場合を示した Fig. 8(d) を用いればよいことになる。

#### (4) 開口性の評価

開口幅は岩盤の透水性状を大きく支配する節理特性の 1 つである。これは岩盤表面では比較的観察しやすい要素であるが、内部では測定しにくい要素である。また調査孔内では直接的に、ボアホール内ではボアホールテレビによって観察しサンプリングできる。したがって他の要素たとえば節理の大きさとの関係を定量的に把握できれば、節理性状の定量的な評価およびそのモデル化に対して非常に有利なものとなる。

また実際のデータから開口幅と節理長とに相関関係があるとの報告もあるが、これに関しては賛否両論が存在する。しかしながら節理のスケールが大きくなれば開口幅も大きくなると考えるのが自然であり、今回はこの相関の程度をみるために、開口幅-長さの関係を取ってみることにする。

### 4. 実岩盤への適用

本節では前節で示した各節理要素の評価方法の適用を試みる。データとしては 2. で得られた実岩盤における調査データを用いることとする。重複するが、得られている調査データとしては、節理の走向・傾斜・開口幅・長さ・終結状況である。実岩盤においては、節理は Fig. 9 に示すように、互いに交差したり、他の節理に切られた形で終結しており、これを終結状況という<sup>4)</sup>。

#### (1) 方向性

今回の調査によって得られたデータを用いて前節の方法で卓越方向解析を行って得られた結果をシュミット図にプロットしたのが Fig. 10 であり、これは水平面の  $6.0 \times 18.0 \text{ m}^2$  に現われる 1071 個の節理についての結果である。これより節理は 2 方向に卓越していることがわかる。ここで、シュミットネットの中近く（水平方向節理）に卓越方向が現われないのは、調査を水平面で行っているため、これと方向性が同じような節理の露頭面に現われる頻度が非常に少なくなるからである。したがって、節理調査においては調査面の方向が調査結果に大きく影響を与えることになるため、調査を行う際にはこの影響を考慮に入れた調査を行う必要がある。次に節理長との関係を見るために、長さ別に方向解析を行うことにする。  $6.0 \text{ m} \times 18.0 \text{ m}$  の調査露頭面内の、ある  $4.5 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$  の領域に存在する  $0.05 \text{ m} \sim 0.3 \text{ m}$  の節理 705 個の

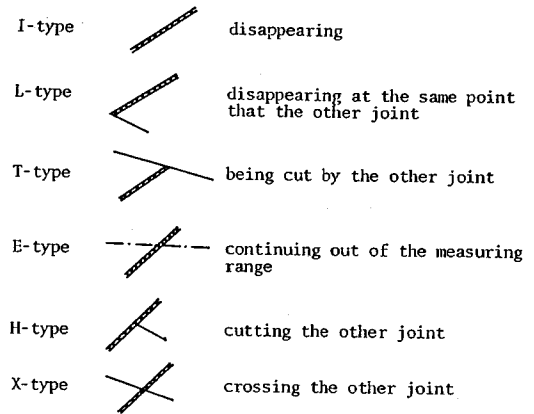


Fig. 9 Types of terminated joints.

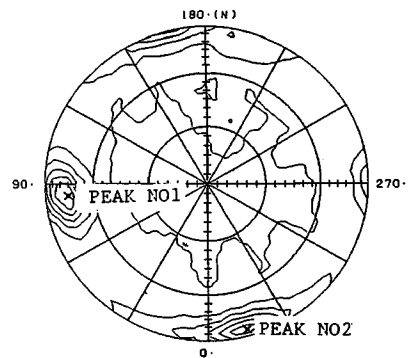


Fig. 10 Peak orientations in Schmit net.

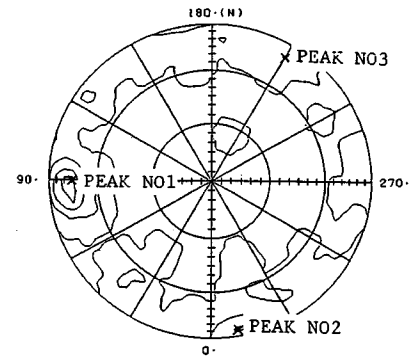


Fig. 11 Peak orientations of joints for 1.0 m~2.0 m.

データと  $6.0 \text{ m} \times 18.0 \text{ m}$  の露頭面内の節理長が  $0.3 \text{ m} \sim 5.0 \text{ m}$  の 1071 個の節理を  $0.3 \text{ m} \sim 1.0 \text{ m}$ ,  $1.0 \text{ m} \sim 2.0 \text{ m}$ ,  $2.0 \text{ m} \sim 3.0 \text{ m}$ ,  $3.0 \text{ m} \sim 4.0 \text{ m}$  のグループに分け、それぞれのグループについて卓越解析を行った。検討結果の一例をシュミット図に示したのが Fig. 11 である。節理長のスケールに関係なく、ほぼ同じような方向に節理が卓越していることがわかる。

以上の結果から、スケールの小さい節理をサンプリングして得られた結果も、ある程度スケールの大きい節理

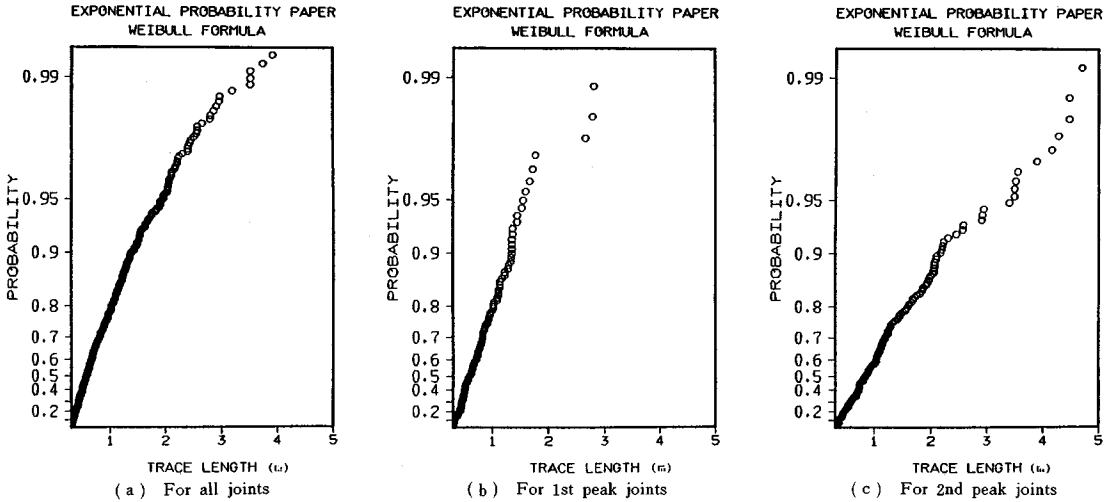


Fig. 12 Exponential probability plot.

をサンプリングして得られた結果も、さほど大差はないという結論が導かれる。すなわち、ある程度大きい節理長をもつ節理のデータだけで、おおまかな岩盤内の節理の方向性の評価はできることを意味している。

(2) 節理長について

節理長に関しては、4. で述べたようにその分布形を指数分布と仮定し、調査によって得られた1071個の節理データを用いて検討する。すべての節理データを指数確率紙にプロットしたのが Fig. 12(a) である。また、前節で検討した節理長ごとの第1・第2ピークデータをそれぞれ同じように処理したのが Fig. 12(b), (c) である。これらを見るとデータはほぼ直線的になり、節理長は指数分布で近似してもよいことが確認できる。ちなみに節理長の平均値はそれぞれ0.75 (m), 1.11 (m), 0.72 (m) と推定される。

(3) 節理密度

今回調査を行った6.0×18.0 mの水平露頭面における節理データを用いて、3. で提案した調査および評価方法を適用する。この水平露頭面においては、Fig. 10 からわかるように2つの卓越方向が存在している。

節理データとしては0.3 m~5.0 mの範囲のデータを用いており各節理群ごとの節理個数・平均節理長を Table 1 に掲げる。節理長の分布形を指数分布と仮定しているから、Table 1 に示す情報から露頭全体に存在しているであろう節理個数を次式で求める。

$$n_i = \frac{n_{i,samp}}{\exp(-\lambda_i \alpha) - \exp(-\lambda_i \beta)} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $n_i$  : 露頭に存在しているであろう第  $i$  群の節理個数

$n_{i,samp}$  : 調査によって得られた第  $i$  群の節理個数

$\lambda_i$  : 第  $i$  群の節理長平均値  $l$  の逆数

Table 1 Joint observation data.

	走向(度)	傾斜(度)	節理個数(個)	平均節理長(m)
第1ピーク	N 5W	75NW	237	1.11
第2ピーク	N75E	85NW	180	0.75

$$\alpha, \beta : \alpha = 0.5 \bar{l}, \beta = 4.0 \bar{l}$$

したがって節理密度は

$$N_i = \frac{n_i}{6.0 \times 18.0} \dots\dots\dots (10)$$

$N_i$  : 第  $i$  群の節理密度 (個/m<sup>2</sup>)

で推定できる。

このとき、 $N_1 \approx 2.916$  (個/m<sup>2</sup>),  $N_2 \approx 2.560$  (個/m<sup>2</sup>) となる。

いま1番目の節理群について考える。Table 1 より節理長の平均は1.11 mである。したがって3. の基準を適用して、サンプリング範囲は、

$$0.56 \text{ m} \leq l \leq 4.44 \text{ m}$$

と設定する。そこで今回は Fig. 1 に示した節理マップの短辺に平行になるような方向に、長さが6.0 mのスキャンラインを設置して調査を行うものとする。スキャンラインの設置回数を決定するための基準は Fig. 8(d) を用いる。設定したスキャンラインの長さが6.0 mであるから

$$n \bar{l} \approx 55$$

ここで、 $\bar{l} \approx 1.11$  より

$$n \approx 50$$

すなわち、50回スキャンラインを設置すれば密度は推定できるということになる。

さて実際サンプリングを行って密度を推定しそれをグ



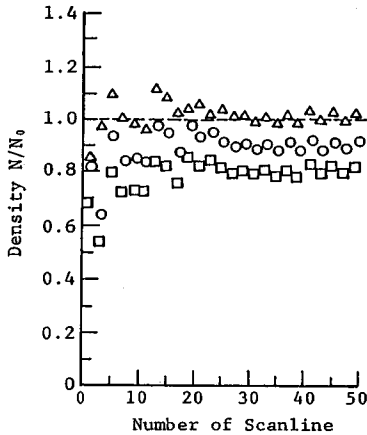


Fig. 13 Estimated joint density.

ラフに表わしたのが Fig. 13 の丸印である。ここで縦軸は密度推定値を真値で割って正規化してある。これによると、スキャンラインの設置回数が 30 回程度で約 90 % 程度の精度で推定できていることがわかる。

しかしここで問題なのは、パラメーターとして節理の平均値を用いていることである。すなわち、節理長の平均値を正しく推定しないとサンプリング範囲を決定できなくなる。そこで、この平均値を誤って推定した場合、密度推定値がどのように変化するかを検討する。

たとえば、節理長の平均値を 2 割程度多く、また少なくとも見積った場合を考察したのが Fig. 13 の三角および四角印である。これを見ると節理長を少なく見積った場合は、多く見積った場合に比べると、密度は大きめに、すなわち安全側に推定されることがわかる。また節理長を 2 割程度の誤差で推定し損なえば、推定される密度は真値の 2 割程度の誤差をもってくることがわかる。

#### (4) 開口幅

開口幅については、それぞれ第 1 群、第 2 群の節理について節理長との相関をとって検討した。第 2 群のものを Fig. 14 に例として示す。結果としてこれらより、開口幅と節理長には相関関係はみられないようにみえる。

しかしながら今回の調査においては、1 つの節理について測定者の判断でそれを代表していると思われる位置の開口幅を測定しており、そのため測定者による主観がたぶんに入っていると考えられる。そのため測定したデータの精度に問題があると思われるので今回の結果からは相関関係の有無に関しては早急な結論は無理というのが正しい判断であろう。

岩盤の開口性は岩盤の透水性状に対して多大な影響を及ぼす要素であるため、この調査については、細心の注意を払い、その評価方法についても今後十分検討していく必要がある。

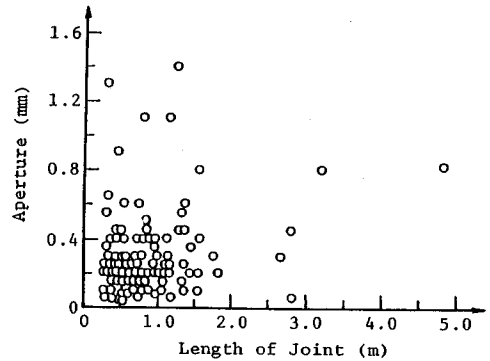


Fig. 14 Relation between joint aperture and length.

## 5. 岩盤の三次元モデル

岩盤中の節理形状は節理が岩盤内に存在するものであり、その全容を外側から見出すことはできないので、露頭に現われる特性から推定しなければならない。解析的には簡単のため節理は円形であると仮定されることが多いが、これには多くの問題点がある。たとえば節理の形状が円であれば露頭における節理の終結状況は大部分が Fig. 9 に示すようにお互いに交差する X タイプとなるが、実際の露頭面をみると L タイプ、T タイプの終結状況がみられる。また露頭に現われる節理のトレースの長さは実際の露頭面では指数分布を示しているが、節理を円形と仮定すると対数正規分布を示すようになる。

節理形状を円とすること<sup>5)</sup>は解析上の簡単化のためであり、実際の露頭における節理の終結状況、およびトレース長の状態を考慮に入れば節理形状を円に仮定することには問題が多い。したがって節理の形状を多角形に仮定した三次元岩盤モデルを用いて上記の問題点の解決を試みる。

節理形状が多角形で、露頭における節理相互間の終結状況に先に挙げた T タイプ・L タイプのものが現われるような三次元岩盤モデルを Dershowitz の提案<sup>6)</sup>に従って次のような方法 (Fig. 15) でコンピュータにより作成する。

- ① 三次元空間に節理平面を位置を任意に決めて発生させる。
- ② 発生させた節理平面相互の交差線により平面をいくつかの多角形に分割する。
- ③ 各節理平面にできている多角形領域の中で、節理を決定する。

さて今回の調査では、調査面は水平面で 1 か所であるから、これから節理の方向・大きさ・密度などが三次元的にどのような性状をしているのかを推定することは不可能である。しかしながら、以下に示すような大胆な仮

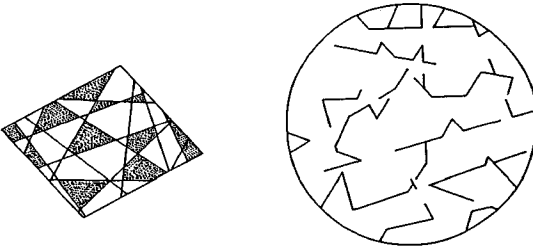
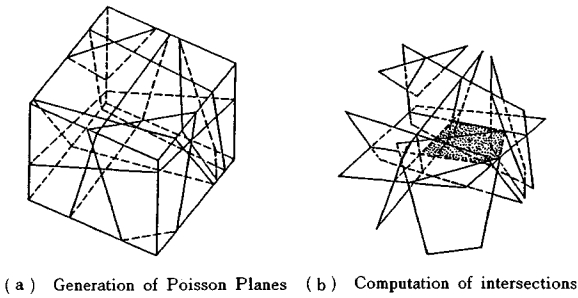


Fig. 15 Dershowitz rock joint model.

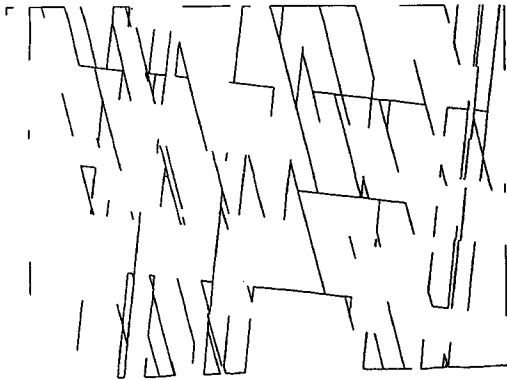


Fig. 16 Cross section of 3-D joint model.

定を設けて、今回提示した三次元モデルの例を示すこととする。先に行った卓越解析において節理の卓越方向は2個存在していることが判明した。また今回の調査データのほかに鉛直面における節理データで水平に近い方向をもつ卓越群が存在することがわかっているため、この岩盤では先の2個の卓越方向の他に水平に近い方向の卓越群を合わせた3個の方向に節理が卓越していると考えられる。今回は簡単のためこの3つの卓越群にのみ着目した岩盤モデルを対象にする。

まず10.0 m×10.0 mの領域を設定し、節理平面の方向をこの卓越した3方向に、節理平面の個数を簡単のためそれぞれ20個に仮定して岩盤モデルを作成した。

このとき③で示した節理の決定方法については、今回は節理面積が指数分布に従うように選定した。節理密度

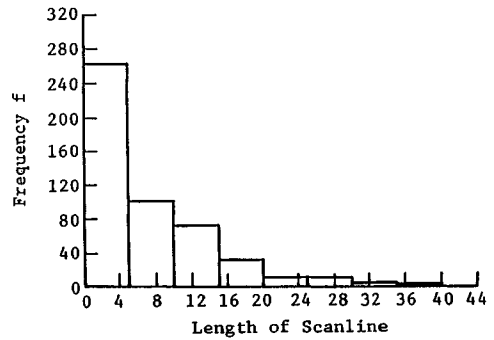


Fig. 17 Distribution of joint length.

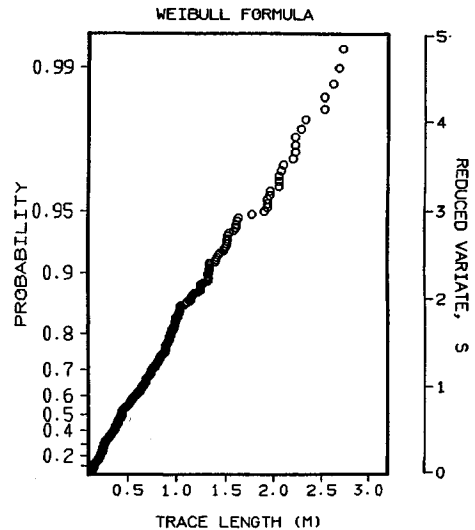


Fig. 18 Exponential probability plot of joint trace length.

についてはこのようにしてできた三次元岩盤モデルを水平面で切断したとき、切断面に現われる節理パターンをFig. 16に示すがこれをみるとこれまでの岩盤モデルにはみられなかったLタイプ・Tタイプの節理の終結タイプも表現できていることがわかる。またこのとき切断面に現われる節理長の頻度分布をFig. 17に、またこの節理長データを指数確率紙にプロットしたものをFig. 18に示す。これから節理の形状を多角形に仮定したとき、節理長の従う分布形は指数分布に近似でき、実際の岩盤露頭面に現われる節理長データの従う分布形と一致することがわかる。これまで節理形状は解析上の簡単化のために円形が仮定されていたが、本報告に示したように節理形状を多角形に仮定した岩盤モデルの方が現実をよりよく表わしているといえる。

しかしながらここに示した岩盤モデルを作成する場合、節理の大きさ・密度を前節までに示した二次元の岩盤露頭面における情報からいかに決定するかについては

まだまだ検討の必要がある。これについては今回の岩盤モデルに仮定した節理の形状が多角形であるため、解析的にアプローチすることは難しく、数値シミュレーションに頼らざるを得ず、今後の課題である。

## 6. おわりに

本報告は実際の岩盤を対象にして、そこに存在する節理性状の調査・評価方法および岩盤の三次元的モデル化について検討したものであり、その結果次のことがわかった。

(1) 節理の方向性に関しては、必要以上に小さなものを対象にしなくても、ある程度大きなものからも十分その傾向は判断できる。したがって、節理調査を行う際に、サンプリング範囲を決定し、調査の効率化を図ることができる。

(2) 節理長に関しては、その分布形は指数分布に近似できる。したがって、指数確率紙プロットあるいはスキャンライン調査により半節理長を測定することにより、節理長の平均値を推定し、節理長の従う確率密度関数を決定でき、その評価が可能である。

(3) 露頭面の節理密度はスキャンラインと交差する節理個数  $n_s$ 、平均節理間隔  $\bar{X}$ 、スキャンラインと節理のなす角  $\theta_s$  を測定すれば、式(4)で十分評価できる。

(4) 岩盤の三次元モデルについては、従来から用いられている節理を円盤に仮定したモデルよりも、今回示した多角形節理を仮定した節理モデルの方が実際岩盤により近いものを表わし得る。

しかしながら方向性の評価にはどの程度のスケールの節理を対象にすればよいのか、また今回示したものをさして評価された情報から岩盤の三次元モデルを考える場合、その情報をいかに三次元に拡張すればよいのかなどまだまだ残された課題は多い。しかし、前者については数多くの現場データを集めその傾向を把握することにより、後者については数値シミュレーションによって解決可能な問題である。

また、今回対象にした岩盤は花崗岩であり、当然のこ

とながら本研究がすぐさま他の岩盤にも適用できるとは考えてはいない。したがって今後は今回行った結果をふまえて本研究を進めるとともに、他の岩盤への適用性についても検討していくつもりである。

近年岩盤の不連続性を対象とした解析が多く行われているが、それらは岩盤が三次元的なものにもかかわらず、二次元の域から脱したものは数少ない。この原因としては解析方法の限界もあろうが、解析に用いる岩盤のモデル化の立ち遅れも大きく影響しているものと思われる。したがって本研究のようなモデル化に関する今後の成果は岩盤を対象とした解析の進歩に大きく貢献するものと確信する次第である。

最後に、この研究を進めるにあたって終始適切な助言をいただいた京都大学 足立紀尚教授、岩盤モデル化について貴重な意見と資料を提供し、大いに研究を刺激していただいた東電設計 菊地宏吉部長にここで感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 大西有三・鍵本広之・西野賢治：岩盤節理情報の処理とその浸透流解析への適用について、土木学会論文集，第376号/Ⅲ-6，1986。
- 2) 菊地宏吉・井上大栄：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，第14巻，第2号，1973。
- 3) Priest, S. D. and Hudson, J. A. : Estimation of discontinuous spacing and trace length using scanline surveys, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst. 18, pp. 183~197, 1981.
- 4) 三室俊昭・小林隆志・菊地宏吉：節理性岩盤のモデル化における節理の組合せ，第17回岩盤力学シンポジウム，1985。
- 5) Baecher, G. B., Lanney, N. A. and Einstein, H. H. : Statistical description of rock properties and sampling, Proc. 18th US Symp. on Rock. Mech., 1977.
- 6) Dershowicz, S. T. : Modeling of rock joints, Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1986.

(1987. 8. 19・受付)