

ブロック理論による不連続性岩盤斜面の 安定性評価に関する基礎研究

STABILITY ANALYSIS OF JOINTED ROCK SLOPE BY THE BLOCK THEORY

吉中龍之進*・山辺 正**・藤田朝雄***

By Ryunoshin YOSHINAKA, Tadashi YAMABE and Tomoo FUJITA

The block theory to analyze three dimensional stability problems of discontinuous rock masses is applied to the actual discontinuous rock slope. Taking into consideration that the geometrical information about discontinuities generally increases according to progressive steps of rock investigation in field, the method adopted for analysis is divided into following two steps; 1) the statistical/probabilistical analysis using information from the primary investigation stage which mainly consists of that of natural rock outcrops, and 2) the deterministic analysis correspond to the secondary stage using exploration adits.

Keywords : rock slope, discontinuities, stability analysis, key block

1. はじめに

近年、岩盤の不連続性に関する問題は、地下空洞や斜面、石油の地下備蓄や放射性廃棄物の地層処分などさまざまな岩盤構造物を対象として注目されさまざまな観点から研究されている。岩盤内には断層、節理、シームなどの地質学的不連続面が多数存在し、岩盤全体の力学的、水理学的挙動に支配的な影響を与えている。岩盤の地下空洞や斜面において掘削で生ずる岩盤の異常な変形や破壊は、掘削による応力解放やその他の影響で既存の不連続面に生ずる変形やすべりによるところが大きいが、取り分け不連続面で形成される不安定な岩塊の崩落や滑落は重大な問題を生ずる。

岩盤の挙動解析は、従来から有限要素法等で行われてきたがそのほとんどは岩盤の構造性を二次元と仮定する解析である。しかし、実際の不連続面は複雑な三次元分布であるため不連続面の三次元性に支配された岩盤挙動を評価することは難しい。

GoodmanとShi¹⁾は、不連続面の幾何学的条件と力学的条件が与えられれば掘削で危険となる岩塊をみつけ出すことのできるブロック理論を体系化した。この岩塊(ブロック)が、落下あるいは滑動することによって岩盤構造物が不安定となり、ある場合に周辺岩盤に進行性破壊が生ずる可能性がある。このようなブロックをキープブロックとよび、そのブロックに最適な支保を与えることで合理的に岩盤全体の安定を図ろうとするのがキープブロック解析である。

ブロック理論¹⁾は体系化されて間もない新しい解析方法であるため、その適用性に関する研究^{2),3)}が盛んに行われているが、実際の岩盤施工に適用した例はほとんどない。理論の実用化のためには多くの課題があるが、中でも不連続面の取扱いが重要である。本研究は実際の岩盤斜面を対象として、不連続面データの取り方や整理方法との関連からキープブロック解析の適用方法を考察するものである。なお、本研究ではキープブロックの同定をはじめとするすべての計算を通常の16 bitパーソナルコンピュータで実施し、現場で容易に適用できるシステムを構成できるよう心掛けた。

2. 岩盤調査の段階とキープブロック解析の適用

岩盤調査、特に不連続面に関する調査データの量と質

* 正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設基礎工学科
(〒338 浦和市下大久保 255)

** 正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部建設基礎工学科
(同上)

*** 正会員 工修 動力炉・核燃料開発事業団東海事業所
(〒319-11 茨城県那珂郡東海村)

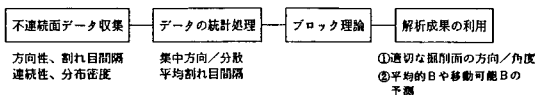
は調査の段階に応じて変化する。したがって不連続面の分布を基本データとするブロック解析では、このような調査段階の変化に対応した適用が必要と考えられる。Fig. 1は岩盤調査を3段階に大別し、それぞれの段階でのブロック理論の利用の位置づけ^{4),5)}を示したものである。ここでBおよびKBはブロックおよびキープロックを示し、下線はそれぞれの調査段階で明らかになる項目である。

①岩盤露頭調査を主とする段階は、岩盤内部の掘削部分の不連続面のデータを直接計測できない。そのため不連続面分布に関する統計的諸量を用いてブロック理論を適用することになる。したがって、不連続面分布の諸量を表わすための確率モデルの妥当性の検討が重要である。このようなデータを用いるキープロック解析の結果は、ブロックの平均的な形状・寸法を求めるので計画構造物の方向性や支保の検討に利用できる。②横坑やボーリング調査を主とする段階⁶⁾では岩盤内部の調査が行われるので、先のデータにさらに不連続面分布の三次元的な空間的位置の情報が加わる。したがって、ブロックの具体的な形状・寸法・分布位置が推定でき、より進んだ設計に利用できる。③施工時の調査段階は、直接に岩盤の掘削面が観察できるので危険ブロックの決定とその対策が議論される。

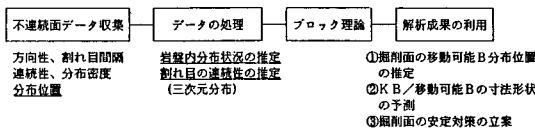
本文では、①を統計的/確率論的解析、②および③を確定論的解析とよぶこととし、②の段階の考え方を中心に述べる。また、最後の部分で②と①の解析結果の比較を述べる。

確定論的解析に必要な不連続面の情報は、調査坑の三次元的な分布位置とそこで観察した不連続面の分布位置である。不連続面の分布位置の三次元的な評価、不連続面の連続性の仮定、および計画掘削面の設定が必要である。計画掘削面にブロック理論を適用することにより危

1. 岩盤露頭調査段階



2. 横坑、ボーリング調査段階



3. 施工時掘削面の調査段階

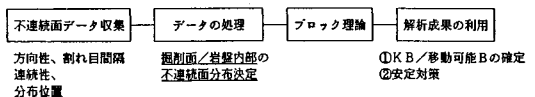


Fig. 1 Application of block theory to the stability of rock slope corresponding to the exploration stage.

険な移動可能ブロックの分布位置と規模が求まる。本文では計画掘削面上での不連続面トレスマップの評価の方法、トレスマップから移動可能ブロックを求める計算プログラムの基本的な考え方を示す。

3. 計画掘削面における不連続面分布の推定

調査横坑で観察した断層および節理その他の不連続面の分布状態から計画掘削面における不連続面分布を推定し、その結果に基づいて移動可能ブロックを検索する。

対象とする岩盤の範囲内に不連続面がどのように分布するかを決定することは、岩盤工学における最も難しい問題の1つである。統計的あるいは確率論的な予測は、必要なサンプルの量的条件が満たされれば、かなりの精

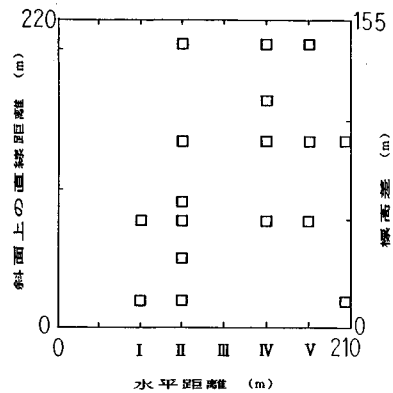


Fig. 2(a) Arrangement of exploratory adits on predicted excavation surface.

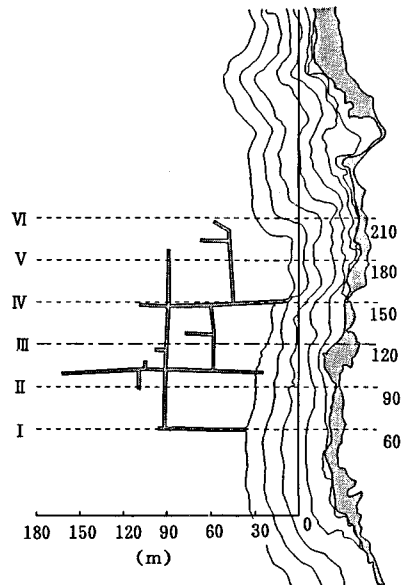


Fig. 2(b) Plan view of exploratory adits at 300 m above sea level.

度で判断することが可能である。しかし、個々の問題が起こる事象を特定するためには、サンプリングは量のみならず質的にも充実されなければならない。しかし、現実問題としてサンプリングには限界があるので、判断が要求されるそれぞれの段階においてその段階の評価に含まれる誤差、特性を考慮しつつ工学的判断を加味しつつ対処することが必要であろう。

本節の確定論的解析の条件を設定するためには、以上の考慮が必要である。計画掘削面における不連続面分布の推定精度は、横坑の空間的配置（配置間隔、配置方向）や不連続面の評価精度（連続性、分布間隔）に基本的に依存している。まず、実例を対象にこれらの影響を考察する。

岩盤はチャートから成る新鮮かつ不連続性の硬岩である。Fig.2(a)は、任意の計画掘削面に分布する調査横坑の配置の例である。ここで計画掘削面は、縦220m、横210m、方向は傾斜方位/傾斜=105°/45°とした。調査横坑はおよそ縦横約30mの間隔で配置されている。Fig.2(b)はFig.2(a)のある標高での横坑分布の水平断面図である。図中の太線を座標軸とし、点0を原点とした。また、I~VIの線は測線を表わし、この線に沿って他の標高の調査横坑が配置されている。不連続面に関するデータは、この横坑の調査データから読み取る。

(1) 横坑の空間的配置・配置間隔・配置方向

現状では横坑は一般に他の調査指針等に基づいて設定されているので、本研究では横坑の空間的配置（位置、間隔、方向）は所与の確定的条件である。

(2) 不連続面の間隔

一般に不連続面の間隔は横坑内で計測可能である。調査から分布関数形、平均間隔、最大値等の情報が得られる。解析の対象とした岩盤の不連続面間隔は各横坑から求まる。この場合、測線のI~VI上の各横坑展開面から、基準線を切る不連続面の間隔を求める。ここでは各調査坑では坑内に向かって右上隅を基準線にする。計測した不連続面間隔の分布をFig.3(a)~(e)に、また同図に分布関数を負の指数分布としたときの結果を示している。

$$f(X) = \frac{1}{u} \exp(-X/u) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 X は間隔、 u はその平均値を表わしている。各データとも負の指数分布に適合することがわかる。平均値は約2~4mである。

(3) 不連続面の連続性

不連続面の連続性に関する情報を得るためには、計画掘削面の位置で詳細な岩盤調査を行うか、あるいは近傍で同じ岩種と岩質の岩盤の大きな露頭における調査が必要である。しかし、多くの場合このような条件を満たす

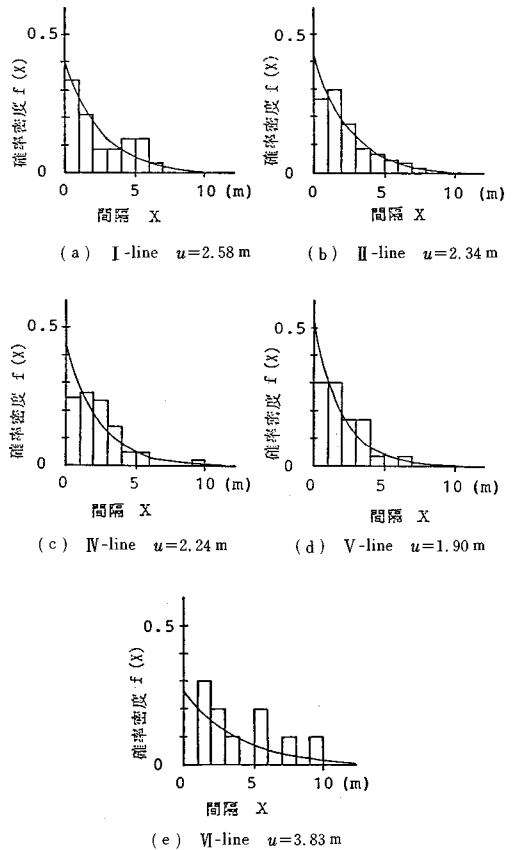


Fig.3 Probability density $f(x)$ vs. spacing x of discontinuities.

ことは困難であるので不連続面の連続性に関する精度の高いデータを求めることは難しい。したがって、不連続面の性質や性状からある仮定を設けて工学的な判断を加えなければならない。本研究においても同様であるので、次の条件を設けることとした。

- ① 不連続面は平面で、i) 断層とii) その他の不連続面（節理、シーム）に分かれる。
 - ② 横坑で連続性を追跡できるものについては、その情報を用いる。
 - ③ ②以外の断層は解析領域内では連続するものとする。
 - ④ ②以外のその他の不連続面は、横坑の断面を完全に横切るものについてのみ考慮し、その広がりには横坑位置を中心とする円盤とする。円盤の大きさは、高角度の不連続面が地表から深部まで及んでいることを考慮し40~80mと仮定しパラメータスタディを行う。
- 以上の条件のもとで求めた各半径に対応する計画掘削面の不連続面トレースをFig.4(a)~(e)に示す。また、解析の概念図をFig.5に示す。上記トレースの妥当性を

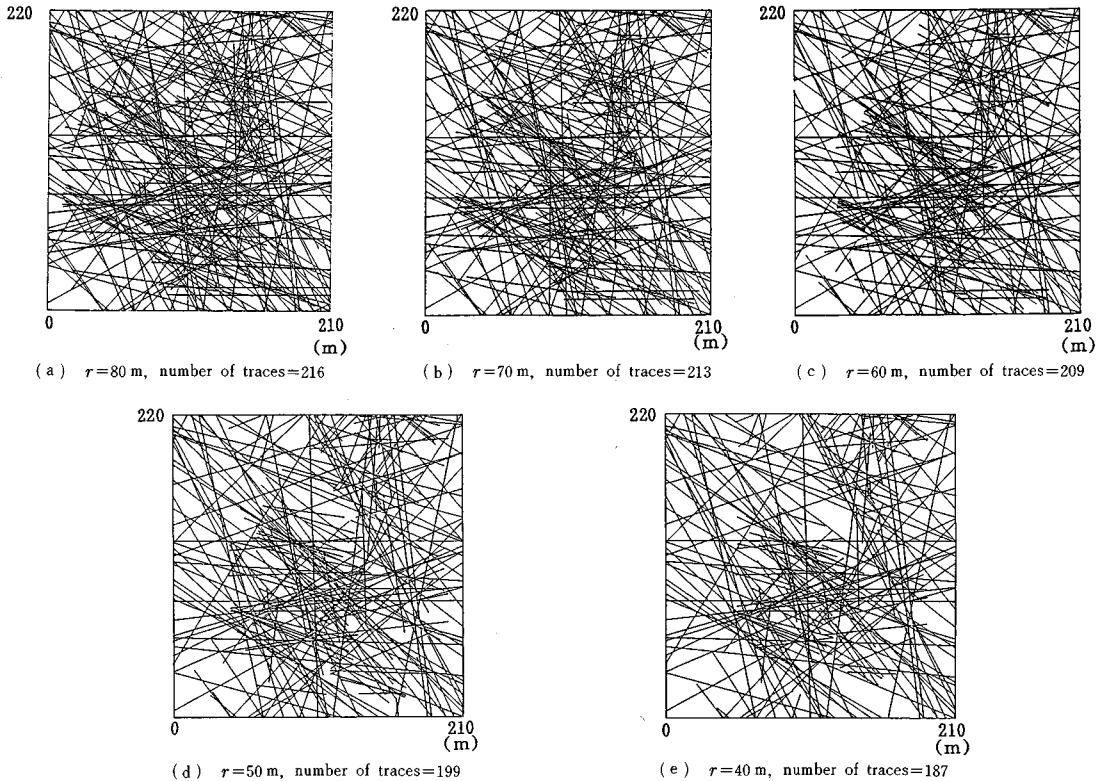


Fig. 4 Predicted traces of discontinuities on excavated surfaces.

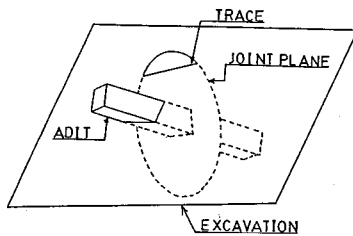


Fig. 5 General view of the predicted excavation surface.

検討するため掘削面に向かって左下を原点として、水平方向を X 軸、斜面方向を Y 軸とし、 $X=105$ m、 $Y=110$ m の位置に各 1 本のスキャンラインを設け不連続面の分布間隔を調べた。その結果、いずれの場合も分布間隔は負の指数分布に従うことがわかった。(2) で求めた不連続面の分布間隔は上述のパラメータスタディの結果、不連続面の半径を 50 m とすることで説明できる。したがって、この結果からその他の不連続面の半径が 50 m の場合を計画掘削面とする。

4. ブロック理論への適用

(1) トレースマップ上での移動可能性ブロックの検索

トレースマップにおける移動可能ブロックの検索につ

いては、Chan, Goodman⁷⁾ によって提案されている。彼らは、ブロックを構成するトレースをベクトル化して表わす‘方向図’を作成して、ブロックの移動可能性を判定している。この方法はブロックの移動可能性の判定の簡便法といえる。原理的には各ブロックの JP (ジョイントピラミッド：ブロックを構成する不連続面を任意の一点に平行移動したもの)、BP (ブロックピラミッド：ブロックを構成するすべての面を任意の一点に平行移動したもの) の連立不等式を解くことと等価である。この方法では、トレースマップ上でいく本かのトレースでブロックを構成する閉領域と、ブロックコードの情報があることを前提にしている。本研究では新たに、ブロックを構成する閉領域の決定法と、ブロックコードの決定法を含めたトレースマップ上での移動可能ブロックの検索法を示す。また、ブロックを作る面の増加に伴う移動方向の制限と、コンピュータプログラムの効率化を考え、対象とする閉領域を三角形と四角形に限定する。以下①～③に、その手順を示す。

① 閉領域は、トレースの交点により定まるので、トレース内に他のトレースとの交点が存在するか否かを判定しなければならない。ここで、トレースは、掘削平面内で (x_{i0}, y_{i0}) と (x_{i1}, y_{i1}) のように XY 座標で与えられる。よってトレースの方程式は次のように表わされる。

$$\begin{cases} X=(x_{i1}-x_{i0})t_i+x_{i0} \\ Y=(y_{i1}-y_{i0})t_i+y_{i0} \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

t_i は媒介変数を表わす。

また、他のトレースを (x_{j0}, y_{j0}) と (x_{j1}, y_{j1}) とするときトレース i, j の交点は、次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} (x_{i1}-x_{i0}) & (x_{j0}-x_{j1}) \\ (y_{i1}-y_{i0}) & (y_{i1}-y_{i0}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} t_i \\ t_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (x_{j0}-x_{i0}) \\ (y_{j0}-y_{i0}) \end{Bmatrix} \dots\dots (3)$$

よって交点が各トレース内に存在するための条件は、

$$0 \leq t_i \leq 1 \quad \text{かつ} \quad 0 \leq t_j \leq 1 \dots\dots\dots (4)$$

② 対象を凸形ブロックとするので、凹形ブロックの除去とブロックコードの決定を行う。そのためには、まず不連続面を平面の式で三次元的に表わさなければならない。Fig. 6(a) は掘削面上にある任意の一点Pを三次元的に表わしている。

掘削面上での座標を (x, y) とし掘削面の方向を、傾斜方位/傾斜 $=(\alpha/\beta)$ 、P 点の三次元座標を (X, Y, Z) とすると次のように Z 座標が求まる。

$$\begin{aligned} OQ=x, \quad PQ=y, \quad \angle P'QP'=\beta \\ P'Q=PQ \cos \beta=y \cos \beta \dots\dots\dots (5) \\ Z=PQ \sin \beta=y \sin \beta \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

Fig. 6(b) は、Z 軸方向からみた図である。

$$a = \angle P'OQ = \tan^{-1} \left(\frac{QP'}{OQ} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{y \cos \beta}{x} \right) \dots\dots\dots (7)$$

$$b = \angle SOP' = \alpha - 90 - a \dots\dots\dots (8)$$

$$OP' = (OQ^2 + QP'^2)^{0.5} = (x^2 + y^2 \cos^2 \beta)^{0.5} \dots\dots\dots (9)$$

よって、X, Y 座標は、次式で示される。

$$\begin{aligned} X=OR=OP' \sin b \\ =-(x^2+y^2 \cos^2 \beta)^{0.5} \cos \left(\alpha - \tan^{-1} \left(\frac{y \cos \beta}{x} \right) \right) \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y=OS=OP' \cos b \\ = (x^2+y^2 \cos^2 \beta)^{0.5} \sin \left(\alpha - \tan^{-1} \left(\frac{y \cos \beta}{x} \right) \right) \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

ここで不連続面の方向を傾斜方位/傾斜 $=(\alpha/\beta)$ とするとき単位法線ベクトルは、次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \hat{n} = (\sin \beta \cdot \sin \alpha, \sin \beta \cdot \cos \alpha, \cos \beta) \\ = (A, B, C) \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

ここで x を原点から不連続面上の任意の点への位置ベクトル $x=(X, Y, Z)$ とし、 D を不連続面と原点との距離とすると各不連続面の方程式は各位置ベクトル成分によって座標形式で表わすことができる。

$$AX+BY+CZ=D \dots\dots\dots (13)$$

得られた三次元座標と式 (12) で求めた不連続面の単位法線ベクトルより、式 (13) を用いて原点との距離 D が求まる。

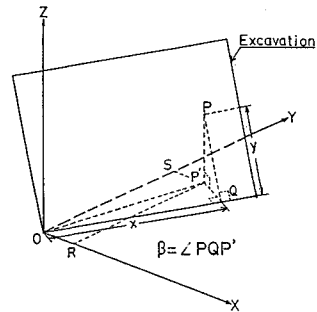


Fig. 6(a) Three dimensional representation of a point on the excavated surface.

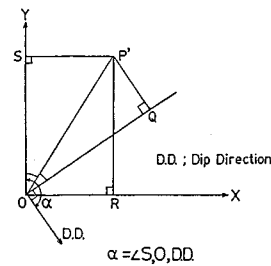


Fig. 6(b) Projection of a point in Fig. 6(a) on X-Y plane.

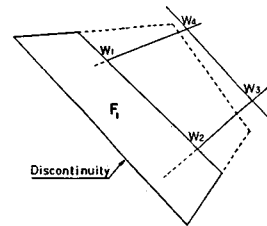


Fig. 7(a) Determination of block code.

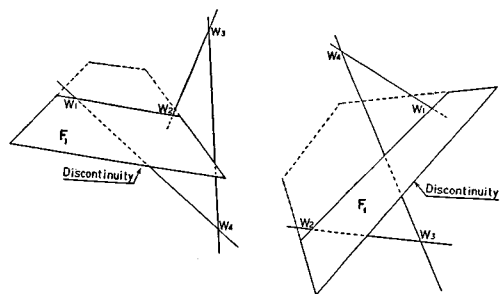


Fig. 7(b) Concave block. Fig. 7(c) Closed region not defined block.

Fig. 7 は、四角形閉領域の不連続面の位置と他の交点の関係を示している。注目する不連続面 F_1 が形成する凸ブロックの半空間は、不連続面上にないトレースの2交点が同時に1つの半空間を定義する場合に決定される。もし、同時に2つの半空間が Fig. 7(b), (c) のよう

に定義されたならそのブロックは、凹形ブロックまたはブロックを構成しない。注目する不連続面の式を式(13)で表わせば、

$$A_i X + B_i Y + C_i Z = D_i \dots\dots\dots(14)$$

となり、この不連続面上にないトレースの2交点を (X_1, Y_1, Z_1) , (X_2, Y_2, Z_2) とするとき、上半空間ならば次式を満たす。

$$A_i X_1 + B_i Y_1 + C_i Z_1 \geq D_i \dots\dots\dots(15)$$

$$A_i X_2 + B_i Y_2 + C_i Z_2 \geq D_i \dots\dots\dots(16)$$

このときブロックのコードは、'0'となる。また、下半空間のとき

$$A_i X_1 + B_i Y_1 + C_i Z_1 \leq D_i \dots\dots\dots(17)$$

$$A_i X_2 + B_i Y_2 + C_i Z_2 \leq D_i \dots\dots\dots(18)$$

このときブロックのコードは、'1'となる。

Fig. 7(a) において注目する不連続面を F_1 とし、この不連続面と他のトレースとの交点を W_1, W_2 , F_1 上にない他のトレースの交点を W_3, W_4 とする。 W_3, W_4 とも上半空間に属するので F_1 のブロックのコードは'0'となる。また、式(15)および式(16)も満たす。

Fig. 7(b) の凹形ブロックで、 W_3 は上半空間、 W_4 は下半空間となり、上述の条件を満たさない。Fig. 7(c) の場合も、 W_3 は下半空間、 W_4 は上半空間となり、この場合は、ブロックを構成しない。また、三角形閉領域については、不連続面を構成しない点が一点となるため、凹形ブロックは出現しない。さらにブロックのコードの決定も、四角形閉領域と同様にして求められる。

以上のようにして、凸形ブロックとそのブロックコードが求められる。

③ ブロックの移動可能性の判定を行う。本研究では、トレースベクトルを用いた方向図は用いず、次のような数学的簡便法で移動可能性を判定する [参考文献1), 6章参照]。

一般にブロックの移動可能性については、ステレオ投影法を用いた視覚的方法で判定できる。しかし実際には多くのデータを処理しなければならないため、簡便かつ迅速な方法を考えなければならない。よって本研究においては、ベクトル法を用いたブロックの移動可能性の判定方法を用いる。

Table 1 のデータと先に述べたブロックのコードで表現した任意のブロック 01011 を用いる。JP は、

$$\left. \begin{aligned} A_1 X + B_1 Y + C_1 Z &\geq 0 \\ A_2 X + B_2 Y + C_2 Z &\leq 0 \\ A_3 X + B_3 Y + C_3 Z &\geq 0 \\ A_4 X + B_4 Y + C_4 Z &\leq 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(19)$$

EP (掘削ピラミッド：ブロックを構成する自由表面を任意の一点に平行移動したものは、

$$A_5 X + B_5 Y + C_5 Z \leq 0 \dots\dots\dots(20)$$

Table 1 List of orientation of slope and joints, and friction angle of joints.

不連続面	傾斜方位	傾斜	摩擦角
P 1	105°	45°	40°
P 2	235°	70°	30°
P 3	195°	12°	25°
自由表面	185°	65°	-

Table 2 Direction cosines of normals to joint planes and free surfaces.

面	X	Y	Z
1	0.433013	-0.250000	0.866026
2	0.620885	0.739942	0.253820
3	-0.241843	-0.664463	0.707107
4	-0.492405	0.413174	0.766045
5	0.000000	-0.866025	0.500000

Table 3 Combination of half space.

I	J	K				
		1	2	3	4	5
1	2	0	0	1	1	-1
1	3	0	-1	0	-1	1
1	4	0	-1	1	0	1
1	5	0	1	-1	-1	0
2	3	1	0	0	-1	1
2	4	1	0	1	0	1
2	5	-1	0	-1	-1	0
3	4	-1	-1	0	0	-1
3	5	1	1	0	1	0
4	5	1	1	-1	0	0

Table 4 Testing matrix.

I	J	K				
		1	2	3	4	5
1	2	0	0	1	-1	1
1	3	0	1	0	1	-1
1	4	0	1	1	0	-1
1	5	0	-1	-1	1	0
2	3	1	0	0	1	-1
2	4	1	0	1	0	-1
2	5	-1	0	-1	1	0
3	4	-1	1	0	0	1
3	5	1	-1	0	-1	0
4	5	1	-1	-1	0	0

となる。有限性定理、移動可能性定理を集合論的形式で表わせば次のようになる。

$$BP = JP \cap EP = \phi \dots\dots\dots(21)$$

$$JP \neq \phi \dots\dots\dots(22)$$

よって、式(21)、(22)を満たす解が存在すればブロックは移動可能といえる。しかし、このようなベクトル方程式を使用する解析より、計算時間を短くする数学的簡便法を使用した方がプログラム化するのに適している。

式(12)を用いて面の単位法線ベクトルの座標を計算した結果を Table 2 に示す。半空間の組合せを次式で定義する。

$$I_k^j = \text{sign}[(\hat{n}_i \times \hat{n}_j) \cdot \hat{n}_k] \dots \dots \dots (23)$$

ここで, $\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & (x > 0) \\ 0 & (x = 0) \\ -1 & (x < 0) \end{cases}$

Table 2 から計算された I_k^j の値を Table 3 に示す。この表を利用して積集合が空集合か否かを決定する。ブロックコード (D_B) で表わされる半空間の積集合で構成される特定のブロックを考える。実例の場合 $D_B = (01011)$

a) ブロックコード (D_B) を選ぶ

$$D_B = (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_m) \dots \dots \dots (24)$$

b) 選ばれた D_B について以下に定義されるように a_i を $I(a_i)$ に変換することによって得られる符号化されたブロックコード (D_S) を決定する。

$$I(a_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } a_i = 0 \\ -1 & \text{if } a_i = 1 \\ 0 & \text{if } a_i = 2 \\ \pm 1 & \text{if } a_i = 3 \end{cases} \dots \dots \dots (25)$$

よって

$$D_S = (I(a_1), I(a_2), \dots, I(a_m)) \dots \dots \dots (26)$$

なお, $a_i = 2$ と $a_i = 3$ は, おのおのその不連続面を用いない場合, 繰り返し用いる場合を意味する。

c) 式 (24) で定義した I_k^j を用いて, i, j の組合せによるブロック D_B に対応する検査マトリクス (T^{ij}) (testing matrix) を作る。 T^{ij} は I_k^j と $I(a_i)$ の積による n 行のマトリクスである。

$$T^{ij} = (I_1^j \cdot I(a_i), I_2^j \cdot I(a_i), \dots, I_m^j \cdot I(a_i)) \dots \dots \dots (27)$$

実例の場合の検査マトリクスを Table 4 に示す。

d) 有限性の判定

もし (T) の各行が正と負の両方を含めば, (T) に対応するブロック D_B は, 有限である。つまりその BP は, 空集合である。逆にいうと, もし (T) の各行が正だけかまたは負だけならば, (T) に対応するブロック D_B は, 無限であり, その BP は空集合ではない。

以上の方法で各ピラミッドの積集合が判定できるので, 次のような方法で移動可能性を判定する。まず, BP での有限性を判定し, 次に JP で移動可能性を判定する。その結果 BP での解析が空集合で, JP での解析が空集合でないならば, そのブロックは移動可能であり, JP が空集合のときは, 先細りブロックになる。また, BP での解析が空集合でない場合は, 無限ブロックになる。以上の流れのフローチャートを Fig. 8 に示す。実例の場合, 掘削面を加えたときには, 各行とも正と負の値を含むので, BP は空集合となる。また, 掘削面である面 5 のデータを考慮しないで検査マトリクス (Table 4) をみると, $(i, j) = (1, 3), (1, 4), (2, 3), (2, 4)$ のとき正または負の値なので JP は, 空集合ではない。よっ

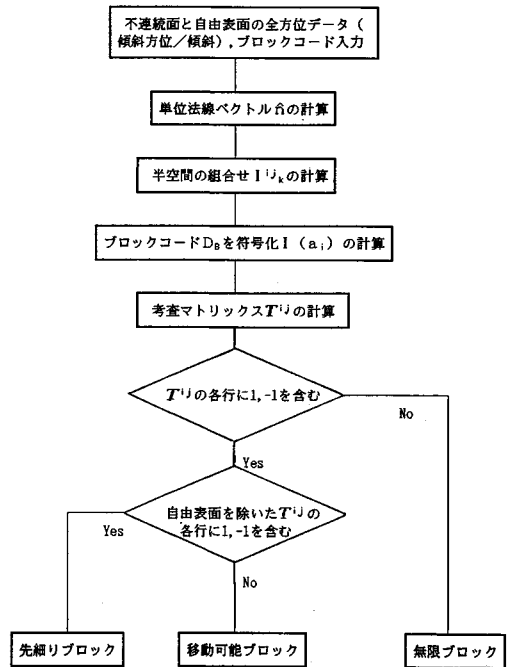


Fig. 8 Mathematical approach to classify the removability of blocks.

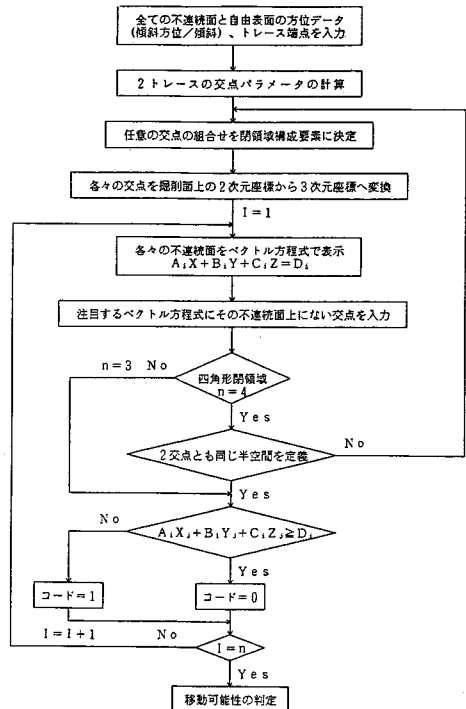


Fig. 9 Flow chart to determine the removable blocks from the trace map.

て、ブロック 01011 は、移動可能ブロックとなる。

全体の流れを Fig. 9 に示す。

(2) 解析方法および結果

ブロックは、不連続面に囲まれた閉領域が対象となり、この計画掘削面を決定するにあたり多くの仮定を含んでいる。その他の不連続面のトレース長さ、横坑配置の偏りによる計画掘削面への不連続面トレース数の偏りなどはその支配的な要素である。したがって、計画掘削面における不連続面のトレースの解釈には、予想精度と工学的問題としての配慮が必要である。

不連続面分布の予測精度と不連続面間隔の実測結果を考慮して、対象とすべきブロックの大きさを限定する。計画掘削面に現われる小寸法のブロックほど、分布の予測精度に疑問がある。しかし、その具体的な寸法を定めることは困難である。そこで、不連続面の平均間隔が2~4 m の範囲にあるという結果を参考にして、その下限値以下は除外できるものとする。

また、同様に不連続面の最大間隔の分布は、約 10 m であったことを考慮して、最大ブロックを 10 m とする。しかし、複合ブロックの存在も考慮する必要があるので、ブロックの大きさに関する解析を次のように行う。

① 計画掘削面に現われる閉領域を構成する不連続面のトレースの平均値が、2~10 m の範囲にあるブロックを検索する。

② ①の大きさのブロックによる破壊よりも、大規模な破壊として、計画掘削面に現われる閉領域を構成する不連続面のトレースの平均値が、10~30 m, 30~50 m, 50~70 m, 70 m~ の範囲にあるブロックを検索する。求められた閉領域に対して、ブロック理論を適用し幾何学的に移動可能なブロックを検出する。求められた移動可能ブロックに対して、合力を鉛直下向きにとり、すべりモードおよび移動方向を求め、移動方向が SP (スペースピラミッド：EP の補集合) に含まれないものを対象から除外する。ここまで残ったブロックに対して摩擦角を 45° ととり、安全率を求める。安全率が、1.5 以下のブロックを危険な移動可能ブロックとする。

Fig. 10 に①の、Fig. 11 に②の 70 m~ の場合の解析結果を示す。塗りつぶされた閉領域が危険な移動可能ブロックとなる。また、Table 5 に①の個々のブロックの情報を示す。表の項目の‘不連続面’で方向の後の (F) は、断層を表わし、(J) はその他の不連続面を表わす。‘位置’は、ブロックを構成する閉領域の重心座標である。

5. 統計処理との比較

不連続面の方向性に関する統計処理については、吉中ら⁴⁾によって提案されている。この方法は、Mathab の方法に改良を加え、半球上正規分布でモデル化を行うも

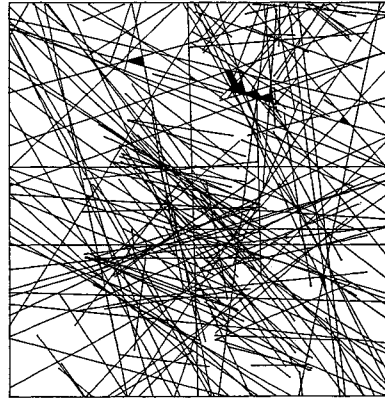


Fig. 10 Analytical results of removable blocks with average trace length 2-10 meters (Number of removable blocks =29).

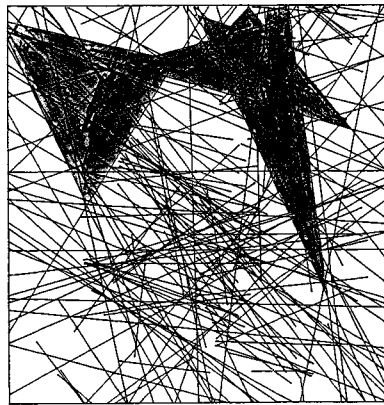


Fig. 11 Analytical results of removable blocks with trace length more than 70 meters (Number of removable blocks=85).

Table 5 Data of removable blocks in Fig. 10.

No.	不連続面				CODE	No	位置 (X/Y)	移動方向	安全率
	D.D/Dip	D.D/Dip	D.D/Dip	D.D/Dip					
1	65°/40° (F)	120°/40° (F)	300°/85° (F)	0°/0° (J)	0011	12	43/112	83°/127°	1.41
2	60°/60° (F)	140°/80° (F)	100°/35° (F)	0°/0° (J)	0001	3	139/167	100°/125°	1.43
3	120°/40° (F)	70°/40° (F)	312°/45° (J)	0°/0° (J)	0011	12	106/213	95°/127°	1.37
4	70°/50° (F)	100°/35° (F)	316°/80° (F)	0°/0° (J)	0011	2	102/177	100°/125°	1.43
5	65°/45° (J)	154°/65° (J)	290°/75° (J)	0°/0° (J)	0011	12	85/124	83°/132°	1.28
6	110°/60° (F)	70°/40° (F)	153°/62° (F)	0°/0° (J)	0001	23	174/ 65	88°/128°	1.38
7	300°/85° (F)	70°/40° (F)	153°/62° (F)	0°/0° (J)	1001	23	175/ 64	88°/128°	1.38
8	12°/77° (F)	100°/35° (F)	272°/80° (F)	0°/0° (J)	1011	2	71/187	100°/125°	1.43
9	320°/70° (F)	70°/40° (F)	153°/62° (F)	0°/0° (J)	1001	23	174/ 66	88°/129°	1.39
10	140°/80° (F)	100°/57° (F)	100°/35° (F)	0°/0° (J)	0001	3	140/167	100°/125°	1.43
11	140°/80° (F)	100°/35° (F)	94°/87° (F)	0°/0° (J)	0001	2	136/169	100°/125°	1.43
12	314°/85° (F)	70°/40° (F)	100°/35° (F)	0°/0° (J)	1001	3	128/171	100°/125°	1.43
13	314°/85° (F)	73°/84° (J)	100°/35° (F)	0°/0° (J)	1001	3	126/171	100°/125°	1.43
14	314°/85° (F)	64°/85° (J)	100°/35° (F)	0°/0° (J)	1001	3	128/170	100°/125°	1.43
15	314°/85° (F)	100°/35° (F)	94°/87° (F)	0°/0° (J)	1001	2	131/169	100°/125°	1.43
16	280°/80° (J)	70°/40° (F)	153°/62° (F)	0°/0° (J)	1001	23	175/ 64	88°/129°	1.39
17	320°/80° (J)	70°/40° (F)	153°/62° (F)	0°/0° (J)	1001	23	174/ 65	88°/129°	1.39
18	84°/85° (F)	100°/35° (F)	337°/72° (F)	0°/0° (J)	0011	2	187/154	100°/125°	1.43
19	70°/40° (F)	114°/87° (F)	340°/80° (F)	100°/35° (F)	0010	4	124/176	100°/125°	1.43
20	70°/40° (F)	153°/62° (F)	85°/50° (F)	0°/0° (J)	0001	12	175/ 63	88°/129°	1.39
21	345°/80° (F)	73°/84° (J)	100°/35° (F)	0°/0° (J)	1001	3	123/171	100°/125°	1.43
22	340°/80° (F)	73°/84° (J)	100°/35° (F)	0°/0° (J)	1001	3	126/172	100°/125°	1.43
23	340°/80° (F)	64°/85° (J)	100°/35° (F)	0°/0° (J)	1001	3	127/171	100°/125°	1.43
24	337°/66° (F)	83°/45° (F)	100°/35° (F)	0°/0° (J)	1001	3	149/164	100°/125°	1.43
25	337°/66° (F)	197°/40° (F)	100°/35° (F)	0°/0° (J)	1101	3	150/164	100°/125°	1.43
26	100°/57° (F)	159°/64° (J)	100°/35° (F)	0°/0° (J)	0001	3	143/167	100°/125°	1.43
27	95°/46° (J)	159°/64° (J)	100°/35° (F)	0°/0° (J)	0001	3	146/168	100°/125°	1.43
28	144°/84° (J)	64°/85° (J)	100°/35° (F)	0°/0° (J)	0001	3	128/172	100°/125°	1.43
29	144°/84° (J)	100°/35° (F)	94°/87° (F)	0°/0° (J)	0001	2	131/169	100°/125°	1.43

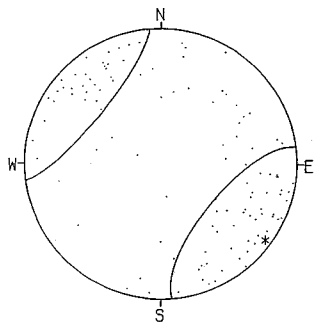


Fig. 12 Cluster division of faults (129 poles).

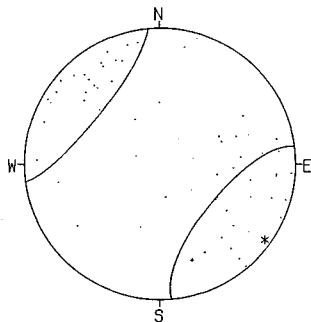


Fig. 14 Stereographic projection of faults obtained by the deterministic analysis.

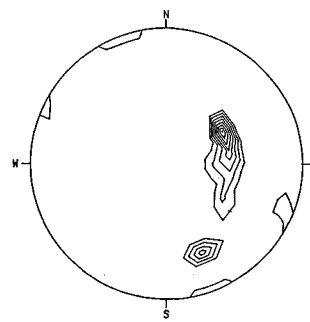


Fig. 16 Equi-density contour plot of the data in Fig. 14.

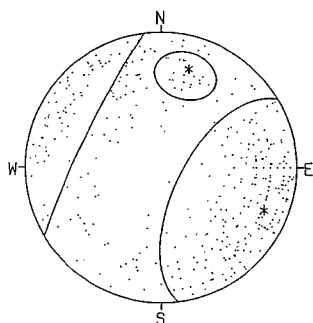


Fig. 13 Cluster division of discontinuities except of faults (493 poles).

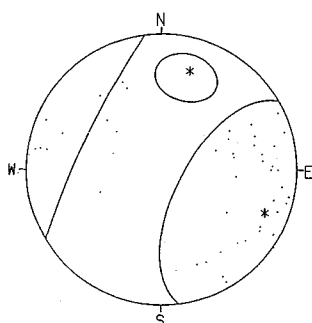


Fig. 15 Stereographic projection of discontinuities except of faults obtained by the deterministic analysis.

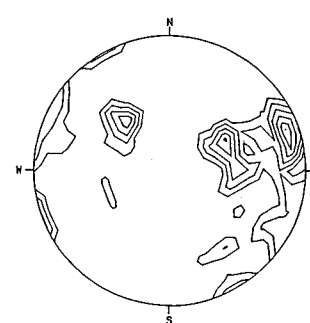


Fig. 17 Equi-density contour plot of the data in Fig. 15.

Table 6 Results of statistical analyses.

クラスター No.	断層		その他の不連続面	
	No. 1	No. 1	No. 1	No. 2
卓越方位	傾斜方位	128.87°	116.11°	15.12°
	傾斜	85.55°	70.92°	60.19°
分布範囲	ψ_{max}	46.44°	58.69°	16.35°
方位分散係数	K	8.46	7.91	68.18
クラスターデータ数		96	239	23
データ構成比		74.4%	48.5%	4.7%
クラスターに定義されるデータ数とその割合		96	262 53.1%	

のである。K をばらつきを表わす定数とし、中心から角度 ψ だけ離れたところの半球上正規分布の確率密度関数 $f(\psi)$ は次式ようになる。

$$f(\psi) = \frac{K}{2\pi} \exp[K(\cos \psi - 1)] \dots \dots \dots (28)$$

本研究の場合、データ数は 622 点であり調査横坑展開図より傾斜/傾斜方位を読み取ったものである。この場合、データ数が多く分布範囲が広いので、断層とその他の不連続面に分け、クラスター分割したものが Fig. 12, Fig. 13 である。ただし、これらのステレオ投影図は各

不連続面の法線を等面積投影したものである。図中の実線がその範囲、*印は卓越方位である。これらの図から明らかなように、断層は 1 クラスター、その他の不連続面は 2 クラスターに区分されることがわかる。Table 6 は、各クラスターごとの統計諸量である。

先の解析で求めた危険な移動可能ブロックを構成する不連続面のステレオ投影図を、Fig. 14 に断層、Fig. 15 にその他の不連続面として示す。図中の実線の円は、前述の各クラスターの分布範囲を示している。この図は、危険な移動可能ブロックとなった不連続面すべての点なので同じ点は何回も重なっている場合がある。確定論的解析で危険な移動可能ブロックを構成する不連続面の分布は、断層とその他の不連続面とも統計処理の結果より北方向、つまり、傾斜方位が小さい方向に危険な方向が分布している。しかし、各クラスターの分布範囲の内側に集中点が存在している。また、Fig. 16, Fig. 17 にはおのおののコンターマップを示す。同図は、危険な移動可能ブロックの出現度数に一致している。よってこの図より、危険な方向が把握できる。

6. 結 論

以上に述べた不連続性岩盤斜面に対するブロック理論の適用結果の考察から次のことがいえる。

(1) 不連続面の分布位置の情報が得られる調査段階にキーブロック解析を行うことにより、移動可能ブロックの分布位置とその形状・寸法の情報を得ることができる。しかし、不連続面の連続性や不連続面のせん断強度などの評価に不確かさを伴うので、この段階での解析成果は移動可能ブロック分布の可能性に関する資料が求まると解釈すべきである。

(2) 不連続面の多い岩盤では、計画掘削面上で安全率の低いブロックが集合して不安定閉領域を構成することが多い。種々のスケールの不安定閉領域を検索することにより、計画掘削面での不安定領域の分布を求めることができる。

(3) 計画掘削面上で任意の不安定な閉領域がより大きい閉領域に包絡されている場合、すべり面を共有する小さいブロックに適切な対策を行うことで全体を安定させることが可能となる。

(4) 計画掘削面に安全率の低いブロックの閉領域が存在する場合、掘削面の岩盤内部への不安定ブロックの連続性や分布を検索することにより、当該ブロックの重要性が検討できる。

(5) キーブロック解析は不連続面の調査精度の進捗段階に応じて利用するのが適当である。統計的な不連続面の情報を主とする初期の露頭調査段階では、移動可能ブロックの平均的形状・寸法が得られる。不連続面の分布の位置の情報が加わる調査段階では、危険ブロックの

概略の分布位置と寸法・形状が求まるのでより個別的な支保対策が可能となる。施工段階は不連続面分布が具体的に示されるので、先の解析結果を踏まえた直接的な対策が取れる。

(6) 不連続面の分布特性(方向・間隔・連続性、等)は一般に大きくばらつく性質がある。確率論的解析の段階ではそのばらつきを十分考慮した解析が必要である。

参 考 文 献

- 1) Goodman, R.E. and Shi, Gen-hua : Block Theory and Its Application to Rock Engineering, Prentice-Hall, 1985.
- 2) 川本眺万・藤川富夫：岩盤掘削面におけるキーブロック安定解析のシステム化について，土木学会論文集，第346号/Ⅲ-1，pp.47～53，1984.
- 3) 大西有三・長野恵一・藤川富夫：ブロック理論による不連続性岩盤掘削時の安定性評価について，土木学会論文集，第364号/Ⅲ-4，pp.209～218，1985年.
- 4) 吉中龍之進・吉田 淳・藤田朝雄：岩盤不連続面の方向に関するデータ処理システムの提案，第42回土木学会年次学術講演会講演概要集(Ⅲ)，pp.350～351，1987.
- 5) 吉中龍之進・吉田 淳・藤田朝雄：岩盤不連続面の方向性に関する分布特性の評価とそのブロック理論への適用，第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.145～150，1987.
- 6) 吉中龍之進・藤田朝雄・大部正宏：岩盤斜面におけるブロック理論の適応に関する研究，第43回土木学会年次学術講演会講演概要集(Ⅲ)，pp.656～657，1988.
- 7) Chan, L.Y. and Goodman, R.E. : Prediction of Support Requirements for Hard Rock Excavation Using Keyblock Theory and Joint Statistics, Proc. of 24th U.S. Sympo. on Rock Mech., pp.857～872, 1984.
(1989.6.15・受付)