

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

EVALUATION OF STABILITY OF EXCAVATED JOINTED ROCK MASS
BY BLOCK THEORY

大西有三*・長野恵一**・藤川富夫***

By Yuzo OHNISHI, Keiichi NAGANO and Tomio FUJIKAWA

A number of analytical tools are available for engineering calculations involving excavations. These include numerical methods, physical model techniques and limit equilibrium analysis. Block theory is new and it uses the stereographic projection. It can be applied to analyze the three dimensional system of joints and other rock discontinuities to find the critical blocks of the rock mass when excavated along defined surfaces. This paper describes the way to find key blocks in the systems of joint networks and to support them by bolting or other supporting methods. For a severely jointed rock mass, an idea of a key block existing space which contains all key blocks in the excavated rock surface is proposed and it is used for determining the optimum support forces which stabilize such jointed rock mass.

1. ま え が き

岩盤における地下空洞や斜面で発生する掘削面の破壊形態には大別して2種類のものがある。1つは、①ジョイントの影響を受けない軟岩、ジョイントが甚だしい節理性岩盤、岩盤の破壊が岩石自身の強度に従うような高応力を生じている岩盤などにおいてみられる破壊で、掘削表面近傍での岩石自身の破壊が支配的となるものである。もう1つは、②中硬岩、硬岩において、応力状態が比較的低い場合にみられる破壊で、既存の不連続面によって形成されるくさび状岩塊の滑動、崩落が岩盤の破壊を支配するものである。土木工学の分野において、対象となる岩塊は地表付近のものが少なくなく、この種の岩盤では掘削により、掘削面近傍の不連続面群に沿ったゆるみが生じ、岩盤内の節理群、シーム群の状態いかんでは②の破壊を生じる。

有限要素法に代表される連続体解析は、①のような破壊が支配的となる岩盤に適しており、種々の応力-ひずみ関係を用いてゆるみ領域の算定、さらには必要な支保

力の算定も可能で、NATMのように吹付けコンクリートやパターンボルトと地山が一体となったようなシミュレーションにも利用されている。

しかし、②のように不連続面が岩盤の破壊に関して重要な要因である場合、連続体解析でゆるみ領域の推定は可能であるが、個々の岩塊の滑動、崩落を推定することまでは不可能である。このような破壊には極限平衡解析を適用することが有利な場合が多い。危険なくさび状岩塊を特定することができれば、ロックボルト、ケーブルなどによる局所的支保を極限平衡解析により求める方が効果的であり、連続体解析によるものより経済的な設計をすることが可能である。

くさび状岩塊を支持し岩盤の安定化を図る方法は、Wittke¹⁾やLondeら²⁾によって開発されてきた。Cronleyら³⁾は掘削面に現われたジョイントの配置からくさび状岩塊を選定するという確定論的方法を示し、不連続面を非常に長い断層とその断層間のみが存在する短い節理群とに分類し、これらが形成するくさび状岩塊を効果的に選定し、地下空洞掘削時の設計手順を明確にしている。

GoodmanとShi⁴⁾は大崩壊を生ずる原因となる最も危険な状態にあるくさび状岩塊を、“キーブロック”と称し、位相幾何学の概念によりキーブロックの性質を明

* 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)

** 工修 神戸市役所 (〒650 神戸市中央区加納町6-7)

*** 東急建設施工本部土木技術部 (〒150 渋谷区渋谷1-16-14 渋谷地下鉄ビル内)

確にした。このようにくさび状岩塊に対して極限平衡解析を行うのが“ブロック理論”である⁵⁾。キープロックが滑動、崩落といった移動をすれば、掘削面は拡大し、他のブロックが新たに危険な状態となり、進行性破壊を生ずる。キープロックを同定するために、ブロック理論はステレオ投影法を効果的に利用し三次元解析を容易にしている。ブロック理論は、地下空洞や斜面の岩盤表面に現われるジョイントの位置関係や形状からキープロックを発見し、早急な対応策を図ることを可能とするもので計測施工の一端として機能し得るものである。

本論文では、最初に岩盤掘削面上に現われるジョイント分布図から、個々のキープロックを抽出する方法を示す。ジョイント分布図は、モンテカルロ法を用いた確率モデルにより作成した⁹⁾。次に、ジョイント面群と掘削面の幾何学的位置関係により、いかなる寸法、位置のキープロックも、これに含まれるという掘削面近傍の空間が存在するので、これを“キープロック存在空間”と定義し、例題を用いて説明する。このキープロック存在空間は、不連続性の著しい岩盤における、支保力の大きさの決定やボルト長の決定に有効な判断基準として利用できると思われる。

なお、本論文において、不連続面群のステレオ投影図をはじめすべての計算、作図は16ビットのマイクロコンピュータによって行っており、現場での施工管理にもそのまま使用できるものであることを付け加える。

2. キープロック抽出方法

ブロック理論では、掘削面と岩盤内に存在する不連続面群が交差することで形成される危険なブロックを検出する。最初に理論を構築するうえで以下の仮定を設ける。

① ジョイントは完全な平面と仮定し、面の粗さは摩擦角で代表する。②ジョイント面は、注目する岩塊に対して十分な広がりをもつとする。③ブロックは剛体とし、ブロック自身の変形性は考慮しない。④不連続面および掘削面は、方位を示すパラメーターにより確定する。すなわち、ジョイント面は卓越方位をもって代表することとし、傾斜と傾斜方位で表現する⁷⁾。以上の仮定は、ブロック理論が構造地質学と単純なつり合い方程式に基づいて、幾何学的情報の上に確立されることによるものである。なお、不連続面の極ベクトル方位が、卓越する方位の周囲に分散することを解析に加味する方法としては、確率角を用いることが考えられている⁸⁾。

Table 1 に示す4群のジョイントP1, P2, P3, P4が存在する岩盤に、Fig. 1のような斜面(面P5)を設けた場合に生じるキープロックについて検討する。ブロックに作用する外力としては重力のみを考える。不連続面に従った破壊モードを論ずるときには、面をステレ

Table 1 Planes of Joints and Excavation.

Joint Set P_i	Dip α	Dip Direction β	Friction ϕ_a	FS	Friction ϕ_r
P ₁	17	85	45	1.5	33.7
P ₂	32	136	30	1.5	21.1
P ₃	50	283	35	1.5	25.0
P ₄	78	240	20	1.5	13.6
Excavation					
P ₅	65	300			

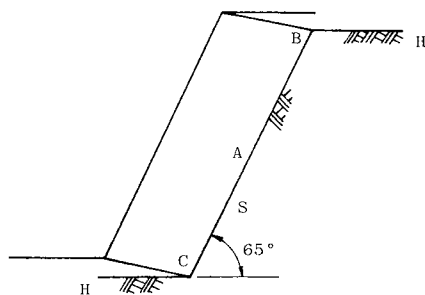


Fig. 1 Conceptual Model of Rock Slope.

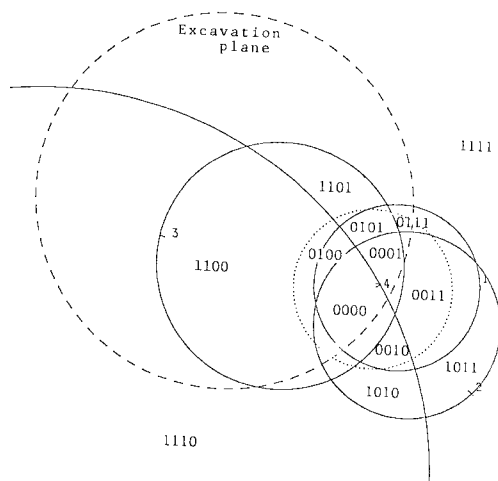


Fig. 2 Stereographic Projection of Joint Pyramid (Upper Hemisphere)

オ投影して考えるのが効果的である。ステレオ投影では、面はすべてステレオ球(基準球)の中心を通り、ステレオ球は不連続面によって小分割される。この小分割されたそれぞれの部分空間を“ジョイントピラミッド(JP)”と称する。ジョイントピラミッドの形状は底辺をもたぬ多角錐で、側面はすべて不連続面であり、ステレオ球中心が不連続面のなす多角錐の頂点となる。このジョイントピラミッドを上半球投影すると、Fig. 2 のようになる。

平面の上側半空間、すなわち大円*i*の内部領域*U_i*に対して記号“0”を、下側半空間、すなわち大円*i*の外部領域*L*に対して記号“1”を用いてジョイントピラミッ

ドの構成を表わすことにする。たとえば，“0100”はU1, L2, U3, U4の共通領域を表わすことになり、このジョイントピラミッドをJP 0100と表記する。

破線は掘削斜面を表わしており、斜面において孤立するブロックは、この平面上の上側半空間、すなわち領域U5内に完全に内包されるジョイントピラミッドが示すものに該当する。したがってこの例においてはJP 1101, JP 0101, JP 0100が孤立ブロックであるが、JP 0100は完全に基準円(点線)の内側にある。すなわち上半球内にあるため、重力作用下では形状的に抜け出すことはない。したがってすべりの可能性のある形状をもつブロックとして、JP 1101とJP 0101が挙げられる。また、立体ブロックは最小4つの平面で決定されるので、1自由平面に対して不連続面は3つでもブロックは形成され得る。そこで、除外する不連続面の記号を“2”で表わせば、JP 2101, JP 0102も孤立し、すべりの可能性のあることがわかり、合計4種類のブロックが孤立ブロック、すなわちキープロック候補として挙げられる。

これら4種類のブロックを斜面に垂直な方向から正射投影すれば、Fig. 3のようになる。この図では不連続面の番号を面の重心に示してある。面5は掘削面であるので実際の岩盤掘削斜面の表面では、たとえば確率モデル⁹⁾から作成されたFig. 4に示すように、Fig. 3の印5の多角形が目視できることになる。

次に、すべての独立ブロックに対し安定解析を行い、

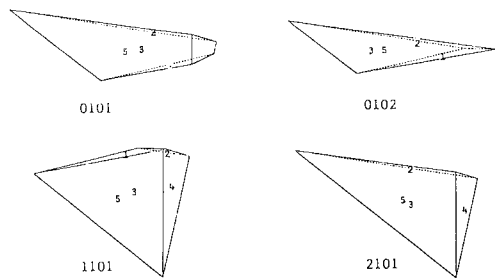


Fig. 3 Orthographic Projection of Isolated Blocks.

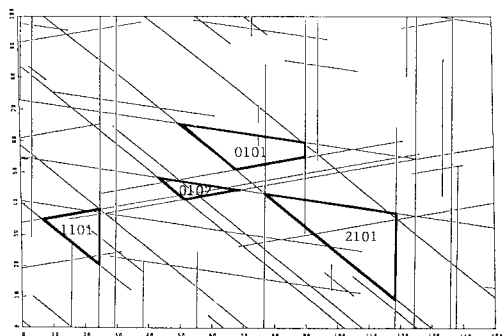


Fig. 4 Isolated Blocks at Excavated Rock Surface.

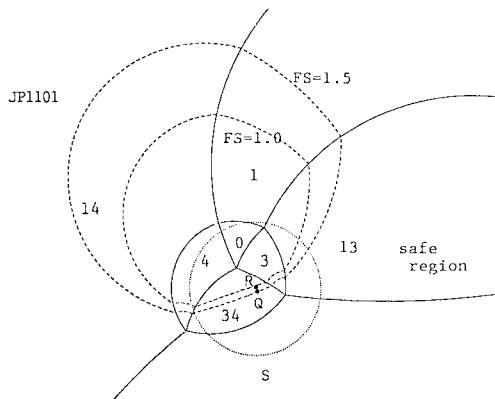


Fig. 5 Equilibrium Regions for JP 1101.

キープロックを特定する。ここで、安全率FSを次式で定義する。

$$FS = \tan \phi_a / \tan \phi_r \dots \dots \dots (1)$$

ここに ϕ_a はすべり面の見掛けの摩擦角で ϕ_r はブロックに作用する外力群の合力 \vec{R} とすべり面の法線がなす角である。前出のTable 1にはFS=1.5として、設計時の指標とすべき各面の ϕ_r も示している。この ϕ_r により個々の独立ブロック候補に対して、作用する合力が、安全であるかどうかを判定することができる。

Fig. 5は、JP 1101に対する平衡領域図である。外力を重力にとっているため、下半球投影法を用いた。実線は大円であり、区切られた領域内に外力ベクトルが存在するときとる破壊モードを示す数字を印している。モード“i”(i=1, 2, ...)は、面 P_i に沿った面すべり、モード“ij”は P_i, P_j の交差すべり、モード“0”は抜け出し、モード“S”は摩擦力を考慮しなくても形状的に安定することを示している。設計では、たとえばFS=1.5の破線外領域を“安全圏”と考える。Fig. 5では、外力 \vec{R} の点が安全圏領域の中 (FS=1.5の破線部の外側) にないため、キープロックであることがわかる。同様の平衡領域図を用いることにより、JP 2101もキープロックであり、JP 0101およびJP 0102が摩擦により安定することが判明する。

3. 支保力の計算

キープロックとなるべきジョイントピラミッドを同定することができれば、次に問題となるのは、そのキープロックに施す支保の方法である。

キープロックに対してロックボルトを打設すれば、ロックボルトに生ずる引張力がそのまま新たな外力として作用し、キープロックは安定化する。換言すれば、外力 \vec{R} の方向を変化させて破壊しないようにすることであり、ステレオ投影上の外力 R を安全圏内に移動させ

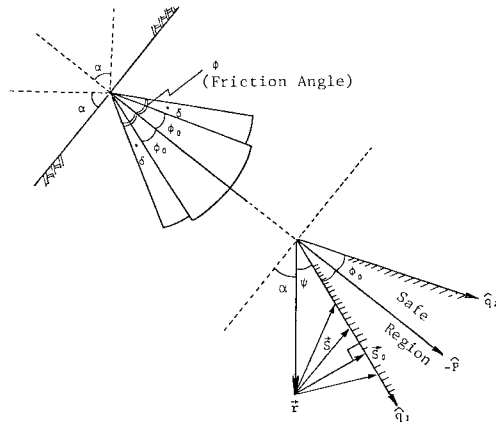


Fig. 6 Concept of Stability by Minimum Support Force.

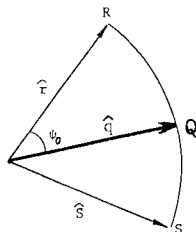


Fig. 7 Calculation of Support Force in Given Direction.

ることである。

(1) 最小支保力の算定

Fig. 6 は、ブロックの活動面となる不連続面と摩擦円錐の関係を示したものである。φ を不連続面の摩擦角とし、必要な安全率を考慮して、角度 δ だけ減少した φ₀ で囲まれる領域を安全圏と考える。xy 面を水平、z 面を鉛直上向きとした座標系では重力の方向を示すベクトル \hat{r} は $\hat{r} = (0, 0, -1)$ となり、φ は、 $\phi = \pi/2 - \alpha - \phi_0$ (α : 傾斜角, ϕ_0 : 安定角) である。支保力の大きさを s 、その方向を \hat{s} で表わすならば、安定化の条件は、

$$((\vec{r} + \vec{s}) \times \hat{q}_1) \cdot ((\vec{r} + \vec{s}) \times \hat{q}_2) < 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{ならびに } \hat{p} \cdot (\vec{r} + \vec{s}) < 0$$

である。また、ブロックを安定させる最小の力 s_0 は、(\hat{s}_0 : 方向ベクトル)

$$\hat{s}_0 \cdot \hat{q} = 0$$

$$s_0 = |\vec{s}_0| = |\vec{r}| \sin \phi \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。

複数の不連続面によるブロックの安定問題も、ステレオ投影図上での \vec{R} の位置を安全圏内に移動させることで解くことができる。その方法は、

1) 平衡領域図で破壊モードを規定する領域ごとに、それぞれ安全圏を示す小円 C_{ij} を描き、全体の安全圏境界 (Fig. 5 の中の破線) を求める。

2) 破壊モード領域で区分された小円 C_{ij} と \vec{r} との

なす角が最小となる位置 q_{ij} とその最小角 ϕ_{ij} をそれぞれの “ij” について算出する。

3) ϕ_{ij} のなかで最も小さいものを ϕ_0 とし、それに対応する位置ベクトルを \hat{q} とすれば、支保力 \vec{s} は式 (3) から

$$\vec{s} = |\vec{r}| \sin \phi_0 \cdot \hat{s}$$

$$s = |\vec{s}| = |\vec{r}| \sin \phi_0 \dots\dots\dots (4)$$

となる。

キープロック JP 1101 を最小の支保力で支えたときの合力ベクトル \vec{q} を、Fig. 5 の投影点 Q により示す。大円 \widehat{RQ} は、安全圏の境界 (FS=1.5) と直交する。 \hat{q} 、 ϕ_0 、 \hat{s} 、 s (単位重量のブロックに対する支保力の大きさ) の計算値を Table 2 の (1) に示す。

(2) 与えられた方向に対する支保力の算定

ブロックの形状、周辺岩盤の状況や、もろもろの事情により、最小支保力の方向にボルトが打てないときには、なるべく最小支保力の方向に近い状態でボルトを打つことを条件にし、支保を定めればよい。ボルトの方向が決定できれば必要なボルトの力は Fig. 7 を参照にして即座に計算し得る。支保力を含まない外力 $\vec{r} = r\hat{r}$ ($r > 0$) が既知で、新たに外力として加えられる支保力 $\vec{s} = s\hat{s}$ ($s > 0$) はその方向 \hat{s} のみが既知であるとき、 s を求めるのがこの解析の目的である。その条件は、合力 $\vec{q} = q\hat{q} = r\hat{r} + s\hat{s}$ が安全率を考慮した安全圏内に含まれることであり、最適な支保力としては安全率を考慮した安全圏の境界線上に \vec{q} が投影されるとよい。合力の方向ベクトル \hat{q} は \hat{r} 、 \hat{s} を含む平面内にあり、 $s > 0$ 、 $r > 0$ であるから、 \hat{q} は \hat{r} 、 \hat{s} のなす角度内に存在する。すなわち、R、S を結ぶ大円の一部 \widehat{RS} と安全圏との交点 Q が \hat{q} のあるべき位置であり、したがって \widehat{RS} と安全圏との交点が存在しないような支保方向 \hat{s} ではいかなる力をもってしても支保効果を期待することはできない。 \vec{r} 、 \hat{q} が既知であれば、 s は自動的に計算でき、これも領域図作成時に同時に算出され非常に容易である。

Table 2 Calculation of Required Support by Using Equilibrium Regions.

JP1101	JP2101	Bolt (1)	Pressure (2)
Support Vector \hat{s}	X	0.352	0.785
	Y	-0.929	-0.453
	Z	0.117	-0.423
Altered Resultant on Boundary \hat{q}	X	0.041	0.130
	Y	-0.109	-0.075
	Z	0.993	-0.989
Angle from "R" to "Q" ϕ_0		6.7	8.6
Support Magnitude (\times weight) s		0.117	0.181

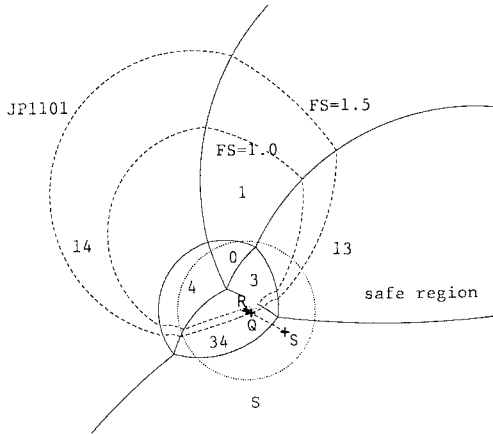


Fig. 8 Projection of Summation of Vectors.

掘削面に垂直な圧力をかけることはこの方法の特殊な場合で、JP 1101 に対しこのような支保を考えたときの解を Table 2 の (2) に示す (Fig. 8). JP 2101 について検討すると、 \hat{q} , ϕ_0 , \hat{s} , s は JP 1101 と同じ値となり、支保力の大きさと方向も Table 2 に示すように同様な結果となる。これは、平衡領域図の形状は異なっても、破壊モードが不連続面 3, 4 の交差すべりとなり同一であるからであり、かつ支保後もそのベクトル \hat{q} の位置が元の破壊モードの領域内にあるからである。したがって、支保後の破壊モードが変化するような場合には、支保前の破壊モードが同一なキープブロックであるからといって、同等の支保を行うことはできない。

4. 最大キープブロック抽出方法とその支保

ジョイント分布図からキープブロックを抽出する方法には、Chan と Goodman⁽¹⁰⁾ の考案した有向グラフの考え方がある。本解析では、確率モデルにより作図されたジョイント分布図からキープブロック領域を抽出することを目的とし、不連続面の方位のばらつきのない理想化したジョイントトレース、すなわち、掘削面上に現われるジョイント亀裂線を扱う。ただし、現実のジョイント分布図を確定的に作成することは困難であることを反映し、 $\phi_0 = \phi - \delta$ なる ϕ_0 を用いた極限平衡解析により、ばらつきをも評価することができる。有向グラフはブロックごとに異なる。あるジョイントピラミッドがキープブロック A を形成するとする。各不連続面の単位法線ベクトル \hat{p}_i をブロック内部に向かうベクトルとし、同様に掘削面に対しても \hat{p}_s を定義すると各トレースの方向ベクトルは次式で与えられる。

$$\hat{t}_i = \hat{p}_s \times \hat{p}_i / |\hat{p}_s \times \hat{p}_i| \dots \dots \dots (5)$$

このような \hat{t}_i は、キープブロックの周囲に反時計回りの回路を形成する。

一般にキープブロックは、凸形ブロックとは限定されない。破壊モードが同一なキープブロックの結合体は凸形ブロックではあるが、結合キープブロックである (Fig. 9)。ブロック A1, A2 のすべり方向は同一であるから、結合体になっても互いにそのすべりを干渉しない。また、結合ブロックはすべり方向に対して可動なブロックである。結合ブロック A が A_i 要素 ($i=1, 2, \dots$) により構成されているとする。 A_i がすべて同じ破壊モードをもつキープブロックであるならば、要素間で JP が異なっても総合体 A は可動ブロックであり“結合キープブロック”である。有向グラフにおいて反時計回りの回路を形成することは、その内包領域を示すブロックが可動なキープブロックであることを示している。

有向グラフ内で、抽出されるキープブロックのうちで、それ以上に結合することのないキープブロックを最大結合キープブロック (MUKB) という⁽¹¹⁾。したがって 1 つの JP に従った有向グラフ内では、MUKB 領域が互いに重なり合うことはない。ただし異なった JP の MUKB 領域間では、共通の領域をもつこともある。また単独のキープブロック、すなわち凸形ブロックを形どる最大領域も MUKB 領域の特別な場合として取り扱う。トレースベクトル \hat{t}_i が決定されれば、同じトレース上にある隣接した 2 接点は、始点-終点の関係となる。また、1 点に 3 直線以上が会することはなく、それによって節点はおのおの、流入する 2

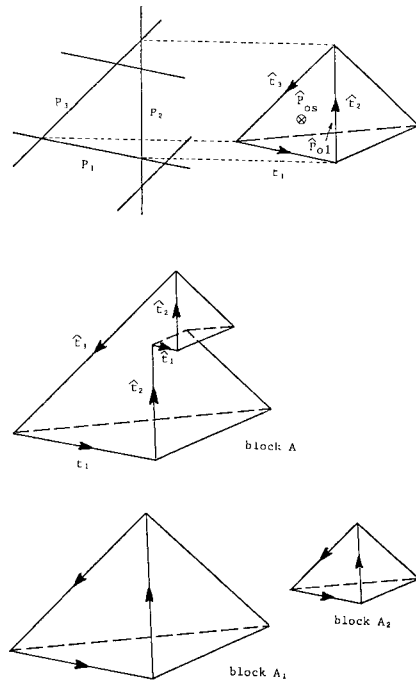


Fig. 9 United Key Block.

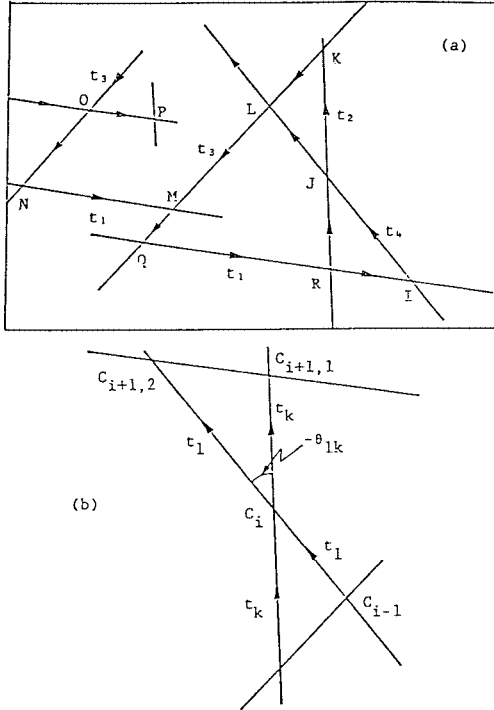


Fig. 10 Directed Graph and Detection of Maximum United Key Block (MUKB).

つのトレースベクトルと、流出する2つのトレースベクトルをもつことになる。

すべての節点に対して任意に節点番号を与える。経路は任意の節点から出発し、反時計回りの回路を形成するような閉領域を模索する。現在、ジョイント分布図上で探査が i 番目の点に進行しているとし、その節点番号は C_i であるとする。第 $i+1$ 番目の節点候補の個数 r_{i+1} は、0, 1, 2 のどれかである。Fig. 10 (a) は MUKB 領域の作図例であるが、点 P を C_i とすれば、次の節点をもたないので $r_{i+1}=0$ 、また点 N では $r_{i+1}=1$ 、点 O では $r_{i+1}=2$ となる。Fig. 10 (b) のような $r_{i+1}=2$ の場合には、選定すべきパスは2種類あるが、より時計回りとなるような、すなわち、より大きな結合ブロックとなるような経路を優先する。図のように反時計回りを正とする角度 θ_k を定めて、その角度の小さい方の次節点を第1候補とするのである。

第 s 番目の点と第 t 番目の点が $s \neq t$ でかつ、 $C_s = C_t$ であるならば閉領域が得られたことになる。このとき $\sum_{i=s}^t \theta_i = 360^\circ$ であるならば反時計回りの回路であり、MUKB が得られる。しかし、 $\sum_{i=s}^t \theta_i = -360^\circ$ であるならば、前節点に戻り他の節点候補について検討する。Fig. 11 は、このフローチャートである。

Table 1 のデータを確率モデルに入力すると、Fig. 12

のようなジョイント分布図が得られるが、即座に有向グラフ化されることにより、図中の太線で示したように、JP 1101 および JP 2101 の MUKB が得られる。MUKB から凸形の要素キーブロックをもとにその体積が算出され、平衡領域図も同時に作図される。単位体積のブロックに対する支保力と組み合わせで実際に支保力が算定される。

実際の岩盤の掘削は段階的になされる。Fig. 12 の斜面が紙面の右側から掘削され、現在 Fig. 13 のように I—I 面が掘削中であるとする。未掘削の岩盤内においては点線のようにトレースが延長していると考えれば、太線で囲まれた領域がいずれ孤立ブロックを形成すると予想される。一般にキーブロックとなる JP の破壊モード “ ij ” が既知であり、掘削面上にそのすべりの生ずる交線、すなわちジョイントピラミッドの稜線 e_{ij} を示す岩盤上の節点 e_{ij} が現われれば、トレースの位置関係に注意しなければならない。また面すべりモード “ i ” の場合も同様で、キーブロックのトレースベクトルが閉領域を形成してしまう以前に、十分な支保がなされねばならない。この解析例では e_{34} がキーポイントであり、キーブロック 11011 または 21011 が形成されるまでに支保を施工する必要がある。

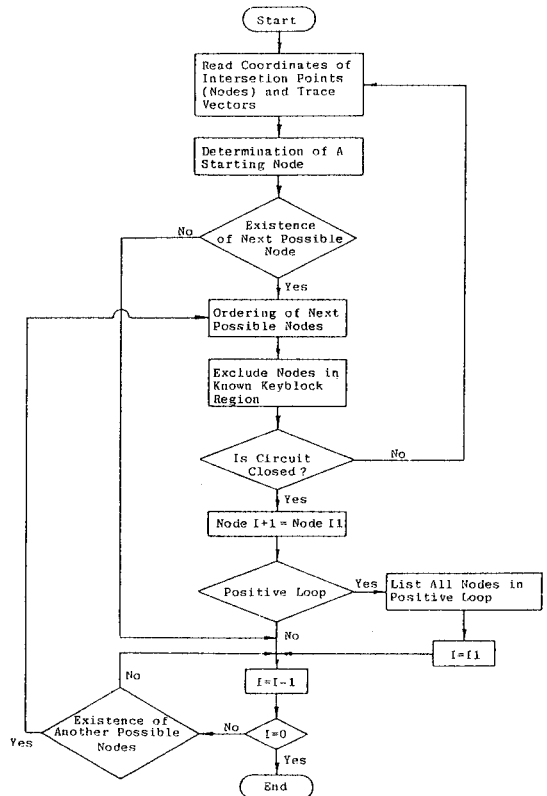


Fig. 11 Flow Chart for Detection of MUKB.

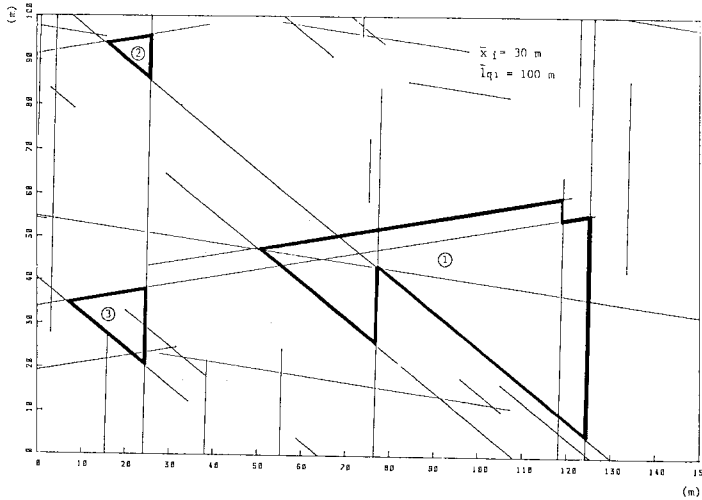


Fig. 12 Joint Map at Rock Surface.

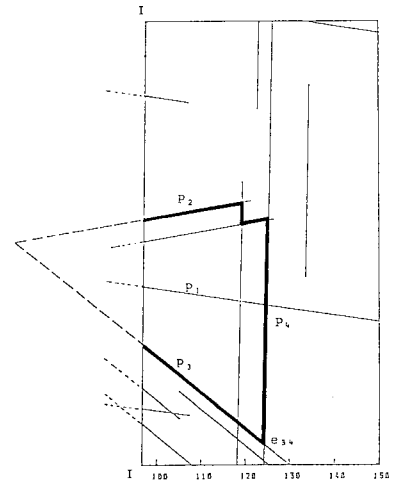


Fig. 13 Appearance of Key Block in Advancing Excavation Face.

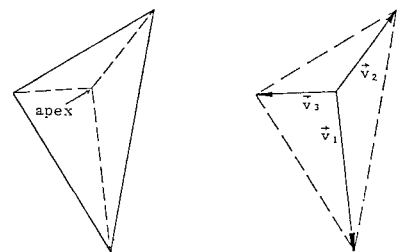
5. キーブロック存在空間

掘削面に領域をもつキーブロックの集合体は、その領域がいかなる位置にあり、いかなる体積をもとうとも岩盤内に存在するある空間に内包される。このような空間をキーブロック存在空間とよぶことにする。不連続面がきわめて多く存在する場合には、岩盤掘削面上のいかなる位置にもキーブロックが形成され得る。極論すればこのような掘削面全体を最大結合キーブロック (MUKB) とみなすことができ、要素ブロックの集合体が存在空間と一致することになる。このとき、有向グラフを用いて、MUKBを抽出するよりは、このキーブロック存在空間に対して支保を論ずる方が、簡便かつ効果的である。ボルトとコンクリート吹付けを併用するような場合には、存在空間外に到達するような長さのボルトを選定すれば、効果的にキーブロックの初期挙動を拘束し得る。

ただし、不連続面の存在が著しくない場合には、キーブロック存在空間全体に支保を行うのは冗長である。この場合には有向グラフを用いて選定されたブロックに対してのみロックボルトを配備するのが適当である。しかし、新たな亀裂の進展などの実際問題に対処するために、ボルト長をキーブロック存在空間により決定することを、安全策としてとることも有効であると思われる。

存在空間は、掘削面上のすべての点についてのその奥行き (高さ) で示すことができる。ある点Oを通る掘削面に垂直な線上に頂点が存在するようなキーブロック (ここでは4面体) のうち、最大のキーブロックはその頂点の高さも最も大きい。その最大の高さの点に存在空間の境界がある。Fig. 14 (a) はキーブロックの岩盤表面への正射投影図であり、Fig. 14 (b) のように頂点の

投影点から底面を構成する3頂点へのベクトル $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3$ を基底ベクトルとして定義する。Fig. 14 (c) は任意



a) Orthographic Projection of Keyblock (normal to excavation)

b) Base Vectors

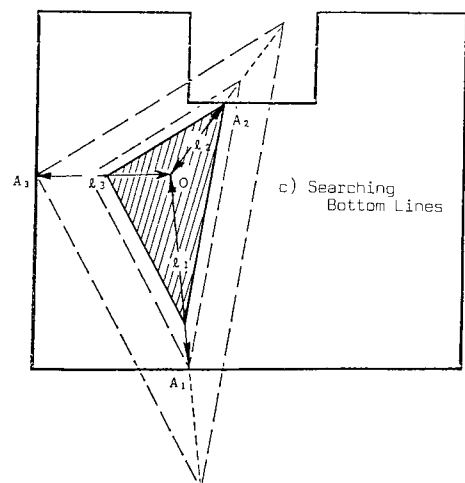


Fig. 14 Determination of Key Block Existence Space.

Table 3 Planes of Joints and Opening Walls.

Joint Set P _i	Dip α	Dip Direction β	Friction φ _a	FS	Friction φ _r
P ₁	32	136	30	1.5	21.1
P ₂	50	283	35	1.5	25.0
P ₃	78	240	20	1.5	13.6
Excavation					
P ₄	90	80			
P ₅	90	170			
P ₆	0	0			

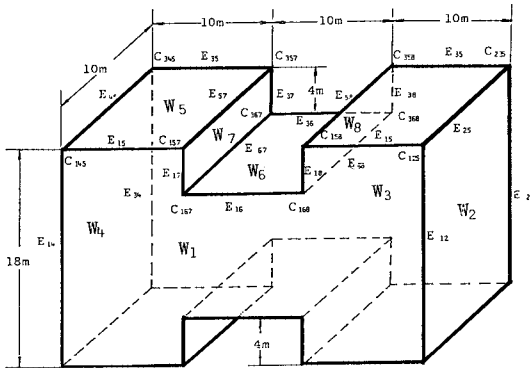


Fig. 15 Underground Opening Model.

の点Oにおける存在空間の境界の高さhの一決定法を示している。

点OからV₁, V₂, V₃の正方向に伸びる直線が掘削面を囲む辺とはじめて交差する点をそれぞれA₁, A₂, A₃とし, OA₁=l₁, OA₂=l₂, OA₃=l₃とすれば,

$$h = h_0 \times \min (l_1 / |V_1|, l_2 / |V_2|, l_3 / |V_3|) \dots (6)$$

これにより存在空間の高さが得られる。ここでh₀は基本となったキーブロックの高さである。

Fig. 15のような地下空洞の周囲のキーブロック存在空間について考える。岩盤の不連続面の傾斜, 走向ならびに摩擦角をTable 3に示す。支保の設計はFS=1.5を必要とするとして, φ_rを算定した。Fig. 16は, これら不連続面群によるジョイントピラミッドのステレオ投影図であり, 孤立ブロックは, 側壁面および天端面W_i(i=1, …, 8)と交線E₆₇, E₆₈を含む領域に現われ, 隅点においては孤立ブロックが生ずる可能性はない。検討の結果をTable 4に示す。

側壁面および天盤面に出現するブロックは, Table 4のJP 110, JP 011, JP 101, JP 100, JP 010の5種類であり各面における孤立ブロックは平衡領域図により, すべてキーブロックであることがわかる。これらのキーブロックを空洞内の岩盤表面に垂直な方向から正射投影すると, Fig. 17が得られる。

E₆₇, E₆₈という突出した交線を含む領域に現われるキーブロックが多い。これは直感的にわかるが, これは,

掘削ピラミッド(掘削面が構成する底面をもたない角錐)の拡大によるものと, 掘削面が2つあれば, 不連続面が2つでもブロックが形成されることの相乗効果である。E₆₈はW₆, W₈に現われるキーブロックのジョイントピラミッド(JP 110, JP 101)と, それを加え合わせたジョイントピラミッド(JP 210)が現われる。キーブロック存在空間を考える場合にはW₆, W₈の個々のキーブロック存在空間を加え合わせたものとなる。E₆₈にはW₆, W₇に現われるキーブロックのジョイントピラミッド(JP 110, JP 101)以外に全く領域を異にするJP 111がキーブロックとして出現する。また, その複合領域としてのJP 121, JP 112も挙げられる。このようなキーブロックもW₆, W₇のキーブロック存在空間を加

Table 4 Key Blocks at Opening Walls.

Position		Keyblock(JP)
Wall	W1	011
	W2 W7	101
	W3	100
	W4 W8	010
Roof	W5 W6	110
Edge	E12 E23 E34 E14	None
	E15 E25 E35 E45	
	E17 E18 E37 E38	
	E16 E36 E57 E58	
Corner	E67	110 101 111 121 112
	E68	110 010 210
	C125 C235 C345 C145 C157 C158 C357 C358 C167 C367	None

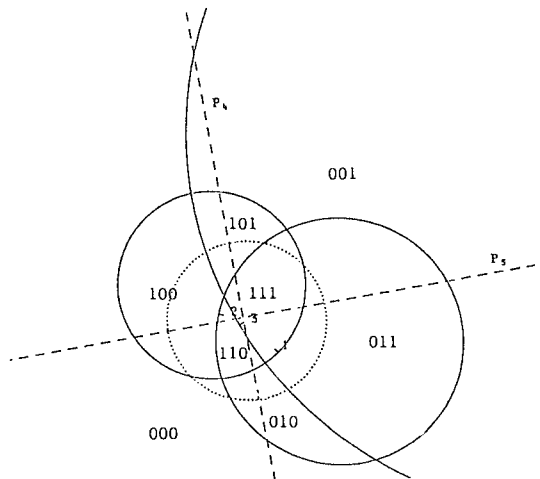


Fig. 16 Stereographic Projection of Joint Pyramid (Lower Hemisphere).

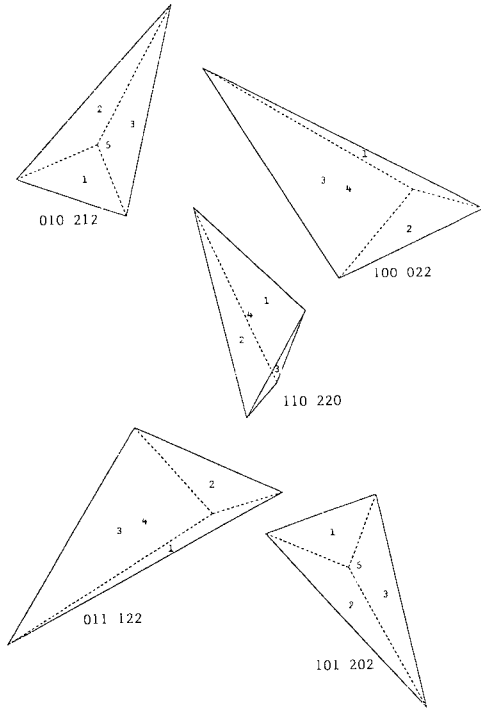


Fig. 17 Orthographic Projection of Key Blocks.

え合わせたものに含まれている。

各面のキーブロック存在空間を前出の方法で計算し、その空間の“高さ”をコンター図により示し、つなぎあわせると、Fig. 18が得られ、全体の様子わかる。各図は岩盤内部からみた図であり、等高線の間隔は0.6 mであり、掘削面を取り囲む辺は、0 mの等高線と一致する。

孤立ブロックは自由空間側の方向の異なる平行な掘削面(たとえば、 W_1 と W_3)において互いに点対称なブロックとなるので、 W_1 と W_3 におけるキーブロック存在空間も点対称となるのがわかる。

W_1 から W_5 に対して掘削面に垂直な内圧力による支

Table 5 Support Forces for Joint Pyramid.

JP		011	101	100	010	110
Given Support Vector \hat{s}	X	0.985	0.174	0.985	-0.174	0.0
	Y	-0.174	-0.985	0.174	0.985	0.0
	Z	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
Altered Resultant on Boundary \hat{q}	X	-0.365	0.021	0.485	-0.022	0.0
	Y	-0.064	-0.117	0.086	0.127	0.0
	Z	-0.929	-0.993	-0.870	-0.992	1.0
Angle from "R" to "Q" ψ_0		21.8	6.8	29.5	7.4	180
Support Magnitude (\times weight)	s	0.399	0.120	0.698	0.130	1.5

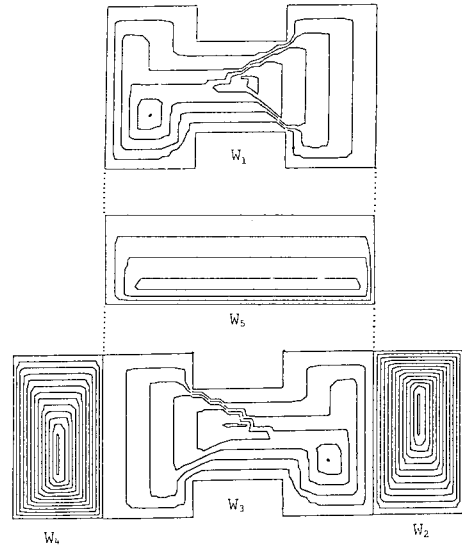


Fig. 18 Key Block Existence Space Contour Map.

Table 6 Key Block Existence Spaces and Their Support Forces.

Excavation	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
Support Magnitude	0.399	0.120	0.698	0.130	1.500
Max Height (m)	3.202	7.352	3.060	7.352	2.034
Volume (m^3)	496.1	512.2	494.2	512.2	294.2
Total Force (tf)	504.8	156.7	879.6	169.8	1125.3
Mean Pressure (tf/m^2)	1.097	0.871	1.912	0.943	3.751

保を行う。この面のMUKBを構成するジョイントピラミッドに対しては、平衡領域図を出力する際に、単位体積を支持可能な内圧力が求められる (Table 5)。天盤面に出現するキーブロック JP 110は抜け出して自由落下するような破壊モード“0”をもつため、式(1)のような安全率は適用できない。ここでは、掘削面に垂直な支保力を、ブロックの自重の1.5倍にとることが安全率1.5を保持することであるとして計算した。

このような最小支保圧による圧力を、岩の単位体積重量 $\gamma=2.55$ として算出したのがTable 6である。ただし、面 W_5 は、10 m \times 30 mの面として扱うものとする。

6. 結論

危険なくさび状岩塊すなわちキーブロックの抽出方法、および、支保の設計を、実際の岩盤に対して行う手法を示し例題解析を行った。キーブロックは、ジョイン

トの長さやその位置関係によってその形状が決定される。したがって、支保は、キーブロックの大きさと位置により決定されるものであり、掘削の進行とともにすみやかに決定されねばならない。グラフ理論で用いられる有向グラフは、キーブロックを同定する方法としても有効なものである。また、キーブロック存在空間の考え方はボルト長の決定に1つの判断基準を与えるものである。計算はすべてマイクロコンピュータにより容易に実行できるものであり、計測施工への有力な手段を与えるものであることを付け加える。

最後にブロック理論についてさまざまな助言を賜ったカリフォルニア大学パークレー校の Goodman 教授、Shi 研究員、ブロック理論の応用について示唆して下さいました名古屋大学 川本眺万教授、日頃からご指導を頂いている京都大学 足立紀尚教授に深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Wittke, W. : Method to Analyze the Stability of Rock Slopes, With and without Additional Loading, Felsmechanik und Ingenieurgeologie Supplementum II, pp.52~79, 1965.
- 2) Londe, P., Vigier, G. and Vormeringer, R. : Stability of Rock Slopes, A Three Dimensional Study, Proc. ASCE J. Soil Mech. and Found. Div. v.95, SM7, Jan. 1969.
- 3) Crony, P., Legge, T.F. and Dhalla, A. : Location of Block Release Mechanism in Tunnels from Geological Data and Design of Associated Support, The Institution of Civil Engineers, pp.97~120, 1978.
- 4) Goodman, R.E. and Shi, Gen-Hua : Geology and Rock Slope Stability—Applications of the Key Block Concept for Rock Slopes, Proc. 3rd Int. Conf. on Stability in Surface Mining, pp.347~373, 1982.
- 5) Goodman, R.E. and Shi, Gen-Hua : Block Theory and Its Application to Rock Engineering, Prentice-Hall, 1985.
- 6) Priest, S.D. and Hudson, J.A. : Discontinuity Spacing in Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Vol.13, pp.135~148, 1976.
- 7) 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, 1984.
- 8) 大西有三・長野恵一・Goodman, R.E., 藤川富夫 : Keyblock 理論の地下空洞安定解析への適用, 第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.256~260, 1985.
- 9) 大西有三・鍵本広之・菊地宏吉 : 不連続性岩盤の節理分布性状の幾何学的モデル作成に関する研究, 第20回土質工学研究発表会講演集, 1985年6月.
- 10) Chan, Lap-Yan and Goodman, R.E. : Prediction of Support Requirements for Hard Rock Excavations Using Keyblock Theory and Joint Statistics, Proc. of 24th U.S. Symp. on Rock Mech, pp.557~576, June, 1983.
- 11) Chan, Lap-Yan : Estimating Support Requirements from Simulation of Keyblocks, Proc. of 25th U.S. Symp. on Rock Mech, pp.857~872, 1984.

(1985.5.9・受付)