

京都大学工学部 大西有三

同 長野恵一

Univ. of Calif., Berkeley, R. E. Goodman

東急建設(株) 藤川富夫

岩盤内地下空洞で生ずる破壊形態は、次の二種類に大別される。(1) 不連続面の影響を受けない軟岩、不連続性はなほだしい節理系の岩盤、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、これらに見られる破壊は掘削表面近傍での岩石自身の破壊が支配的である。もう1つは、(2) 中軟岩、硬岩において低応力状態に見られる破壊で既存の不連続面によって形成される岩石ブロックの滑落、崩壊が岩盤の破壊を支配するものである。GoodmanとShiの提案したキーブロックを特定し、そのブロックにロックボルト、ケーブルなどの適切な支保を用いることで、効果的かつ経済的な設計をすることができる。本論文は、地下空洞の掘削時に出現するキーブロックに対しその同定から一連の安定の問題について述べる。

1. キーブロックの理論

ブロック理論は、ブロックの挙動が断面の破壊を生起するような不連続性の固い岩盤の掘削に対して適用するが、その骨子は掘削で露出する岩盤表面と岩盤内に存在する不連続面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ことにある。しかし解を得るためには理論を構築する上での仮定がいくつかある。その内容を以下にまとめて説明する。

1) ジョイント面は完全に平面であると仮定する。これは、ジョイントや断層に対しては十分妥当ではあるが、しゅう曲を伴うような地層面に対しては不適當である。線形ベクトル方程式によりブロック形状を表現するには平面性を仮定することが必要であり、曲面を考慮するには理論の拡張を必要とする。

2) ジョイント面は、注目する岩塊中において完全な広がりを持つと仮定する。すなわちキーブロックとなる領域内においては不連続面が途絶えることはない。これは、全てのブロックは既存のジョイント面により定義されることを示し、それ故、ブロック解析では、応力解放時に新たに生ずる亀裂は考慮しない。しかしながら、予め新たに生ずると考えられる亀裂の位置を定義できるならば、後で不連続面を追加して解析するという方法も可能である。進行性の崩壊にブロック理論を適用するにはジョイントの有限性を考慮する必要がある。

3) ジョイント面で定義されるブロックは剛体であると仮定する。すなわち、ブロック自身の変形性や破壊は考えない。これによりキーブロックの問題は、幾何学及び位相幾何学によって完全に定式化され、またブロックの安定性評価という作業においては不連続面の強度定数を導入する。しかしながら、ブロックの面に沿った摩擦抵抗の値は、必然的にブロック表面での変形も含んだものであり、ブロックに応力、ひずみが蓄積することになる。このような表面に力を受けたブロックの変形問題は、ブロック理論と数値解析とをカップリングすることで検討することができる。

4) 不連続面及び掘削面は入力するパラメータで確定しようと仮定する。ジョイント群の方向(極ベクトル)が実際にある方向の周囲に分散しているならば、ある方向をジョイント群の代表値として採らねばならない。確立・統計的方法を用いればこれらの角度の影響を調査し、その結果を処理することが可能である。ブロック理論は、キーブロックの種類を列挙するためのものであり、不連続面の方向は正確な決定された量として扱うのが合理的ではある。

要約すれば、ブロック理論は構造地質学と単純な静力学を用いた釣合式に基づいて、幾何学的情報の上に確立されたものと言える。連続体の力学はキーブロックの計算には二次的のものであり、ブロック理論はブロックの移動のモードのみを考慮し、浸食、岩の分解、地層離曲などの他の破壊モードは外している。

以下、ブロックに従う解析方法の例をマイクロコンピュータ上のグラフィック表示によって説明する。

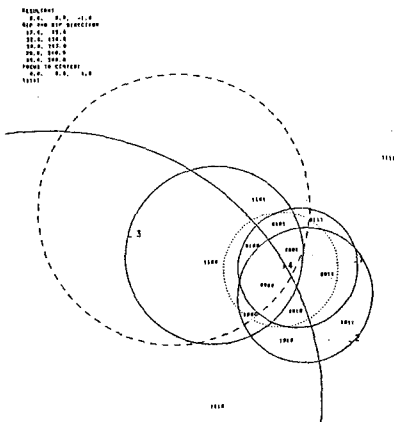


Fig 1

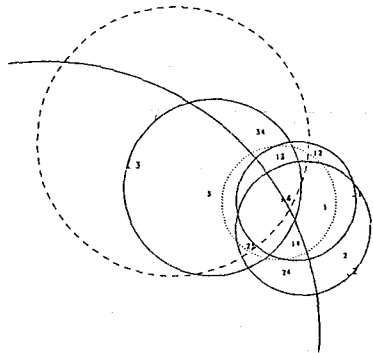


Fig 2

Table 1

Joint Set	Dip	D. Angle	Protection	E	F	G-H	FS	H ₂
1	37	89	43	140	11.9	33	1.5	23.4
2	32	126	30	200	9.9	20	1.5	13.6
3	50	263	35	110	11.9	23	1.5	19.8
4	70	240	20	100	9.9	10	4.3	6.7
Excavation	61	300						

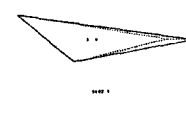
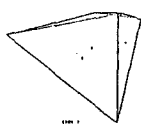


Fig 3

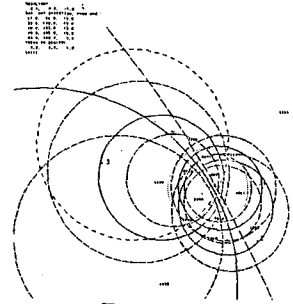


Fig 4

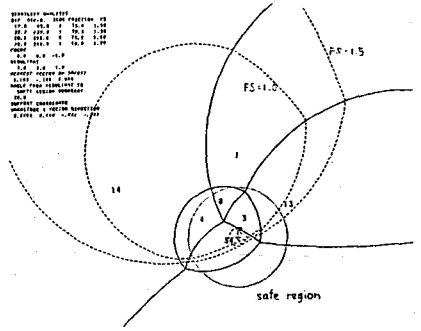


Fig 5

2. 解析結果

ブロック理論を地下空洞に適用するが、その空洞表面は、一般に種々の形状をとっておりここでは簡単のために、傾斜した一掘削面上のキーブロック同定方法を述べる。すなわち出現するキーブロックを定義する平面のうち掘削面は唯一であるとする。形成されるブロックに対しては重力のみが働くとする。解析を行う面群の条件をTable 1に示す。Fig 1は上半球投影のステレオ投影図であり、実線の円弧はジョイント、破線は掘削面、点線の円は基準円を示す。有限かつ移動可能なブロックは破線の内側に完全

に含まれる球面多角形領域で示されブロックコード (0: upper 1: lower) を用いれば0101, 1101, 0100の3領域がそれにあたる。Fig 2の領域内の数字はすべりモードを示す。例えば0101は摩擦を無視すれば面1, 3の交線に沿ってすべる。ここで除外する面のコードを'2'で与え、掘削面のコード'1'を付加すれば、注目すべきブロックは01011, 11011, 01021, 21011の4種となり、その形状をFig 3に示す。一般に、不連続面のばらつきは摩擦角を便宜

上減少することで扱うが、面方向の分散がキーブロック候補自体を増加する必要がある場合がある。Table 1のような方位分散係数Kに従い95%確立角を求め、不連続面の分散を加味するとFig 4が得られ、領域1100, 1102に関しても極限平衡解析を行う必要が知られる。次に分散角 θ と安全率を考慮し得られる適用摩擦角度 ϕ_0 に従って全キーブロック候補に対して安定解析を行い、一ブロックを列挙し、合力と安全領域の関係と同時に最適支保方向が得られる。この解析により、0101, 0102のブロックは摩擦力により安定することが得られた。Fig 5はブロック11011に関する安定解析であり、最適支保方向はS(0.440, -0.831, -0.341), その大きさは、ブロック重量の0.3412倍である。単キーブロックの場合は、これに従い、ロックボルトを設置すればよい。

次に確立過程的モデルを用いた解析を行った。これはまずスキャンライン法で得た平均ジョイント間隔 $\bar{X}$ と、平均半トレス長 $\bar{L}$ をもとに、ジョイント間隔、半トレス長がともに負の指数分布に従うと仮定したときに掘削面上に表れるジョイント群をシミュレートした。簡単のため、スキャンラインは水平面で設置し、Table 1に与えられた不連続面の全てに一律な $\bar{X}=30$, $\bar{L}=50$ なるパラメータを与えた。得られたジョイントマップを用いて、キーブロック11011に対して回路図(directed graph)の方法を適用すれば、図の影の部分としてキーブロック領域を得る。

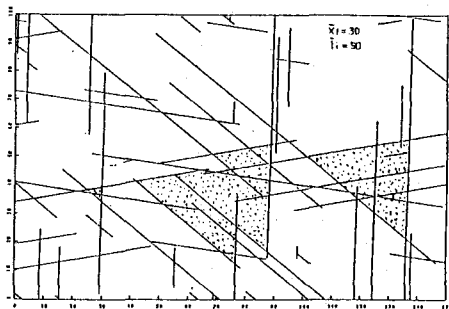


Fig 6

3. 滑動モードの決定と安全率算定

3-1 はじめに

ブロックの滑動モードについてはP. Londe, G. Vigierらが定義している。またブロックの滑動に対する安全率についてはGoodman, Shiらが述べている。本論では滑動モードの決定と安全率の算定について新しい手法を紹介する。

3-2 滑動モードの決定

Fig3-1のようにブロックに作用する外力群の合力ベクトル $\vec{F}$ をブロックの頂点にシフトさせる。Fig3-1を真上の方から俯瞰し、3枚の不連続面i, j, kの法線ベクトル(ブロックの外側へ向かうものを正とする) $\vec{N}_i, \vec{N}_j, \vec{N}_k$ と、交線ベクトル $\vec{T}_{ij}, \vec{T}_{jk}, \vec{T}_{ki}$ によって形成される部分空間(アフィン空間)を図示したのがFig3-2である。ブロックは $\vec{T}_{ij}, \vec{T}_{jk}, \vec{T}_{ki}$ で構成される空間($\vec{X} | \vec{X} = a_{ij}\vec{T}_{ij} + a_{jk}\vec{T}_{jk} + a_{ki}\vec{T}_{ki}, a_{ij} > 0, a_{jk} > 0, a_{ki} > 0$)に含まれる。(ここで添字は総和規約を意味しない)

ブロック滑動モードは $\vec{F}$ がどの部分空間に属するかによって決定される。例えば $\vec{F}$ が $\{\vec{X} | \vec{X} = a_{ij}\vec{N}_j + a_{ij}\vec{T}_{ij} + a_{jk}\vec{T}_{jk}, a_{j} > 0, a_{ij} > 0, a_{jk} > 0\}$ に属するとブロックは交線ベクトル $\vec{T}_{jk}$ の方向へ滑る。また $\vec{F}$ が $\{\vec{X} | \vec{X} = a_{ij}\vec{N}_j + a_{ij}\vec{T}_{ij} + a_{jk}\vec{T}_{jk}, a_{j} > 0, a_{jk} > 0\}$ に属するとブロックはj面上を滑る平面すべりのモードとなる。このように3本のベクトルで構成される座標系へ $\vec{F}$ を変換してその成分の正負によって $\vec{F}$ の属す

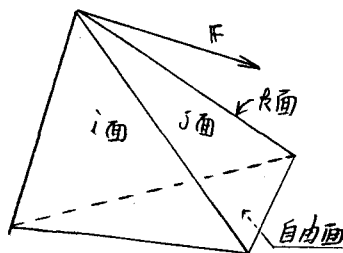


Fig 3-1

Table 2

モード 図								
接触面	i, j, k	j, k	i, j	i, k	j	i	k	無し
分離面	無し	i	k	j	i, k	j, k	i, j	i, j, k

る空間を

決定する。変換のマトリクスは次式ようになる。

$$[A] = \begin{bmatrix} \vec{e}_1 \cdot \vec{x} & \vec{e}_1 \cdot \vec{y} & \vec{e}_1 \cdot \vec{z} \\ \vec{e}_2 \cdot \vec{x} & \vec{e}_2 \cdot \vec{y} & \vec{e}_2 \cdot \vec{z} \\ \vec{e}_3 \cdot \vec{x} & \vec{e}_3 \cdot \vec{y} & \vec{e}_3 \cdot \vec{z} \end{bmatrix}$$

ここに、 $\vec{x}$, $\vec{y}$, $\vec{z}$ は全体直交座標系の基底ベクトルであり、 $\vec{e}_1$, $\vec{e}_2$, $\vec{e}_3$ は部分空間を張る3本の基底ベクトルである。部分空間座標系へ変換されたベクトル $\vec{F}'$ は次式で求められる。

$$\vec{F}' = [A] \vec{F}$$

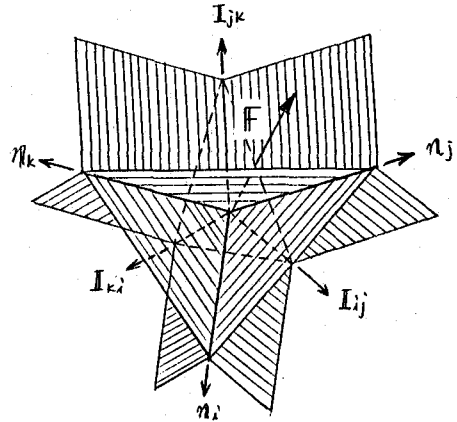


Fig 3-2

また、総ての交線ベクトルと $\vec{F}$ との内積の値が正であれば、ブロックは抜け出しのモードとなり、総ての法線ベクトルと $\vec{F}$ との内積の値が正であれば、ブロックは押し込みのモードとなる。

3-3 安全率の算定

平面すべりと交差すべり（交線ベクトルの方向へ滑る）の場合の安全率は、それぞれ次式で求められる

○平面すべりの場合（i 面上のすべりとして）

$$f_s = \frac{(\vec{F} \cdot \vec{n}_i) \tan \phi_i + A_i C_i}{[\vec{F} \cdot \vec{F} - (\vec{F} \cdot \vec{n}_i)^2]^{\frac{1}{2}}}$$

A_i ; i 面と接触する面積

C_i ; i 面の粘着力

ϕ_i ; i 面のまさつ角

○交差すべりの場合（i, j の交線に沿うものとして）

$$f_s = \frac{a_i \tan \phi_i + a_j \tan \phi_j + A_i C_i + A_j C_j}{a_{ij}}$$

a_i, a_j, a_{ij} ; 部分空間座標系における $\vec{F}$ の成分

参考文献

- グッドマン, R. E. (赤井, 川本, 大西 共訳) : 不連続性岩盤の地質工学, 森北出版.
- P. Londe, G. Vigier, R. Vormeringer: Stability of Rock Slopes, A Three-Dimensional Study, Div. Proc. A.S.C.E, SMI, pp235~262.
- 川本, 藤川 : 岩盤掘削面におけるキープロック安定解析のシステム化について, 土木学会論文集, 1984, 第346号/III-1

(53) A Study of Stability Analysis for Underground
Excavation Using Keyblock Theory

Yuzo Ohnishi
R. E. Goodman
Keiichi Nagano
Tomio Fujikawa

There are many methods of analysis such as Finite Element Method, Boundary Element Method, which are based on Continuum Mechanics, or Distinct Element Method based on Mechanics of Discontinuity when we estimate the stability of underground caverns.

Block theory is thought as one of the very useful methods of stability analysis has been applied to hard rock mass which has many discontinuities.

It seems for us that Block theory is recognizable because of that easiness to deal with three dimensional problems.

This paper introduces the concept of Block theory and how to calculate the stability of rock face using Block theory of computerizing.