

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

COMPUTATIONAL APPROACH TO STABILITY ANALYSIS OF EXCAVATION IN ROCK MASS BY KEYBLOCK METHOD

川本 眺 万*・藤川 富 夫**

By Toshikazu KAWAMOTO and Tomio FUJIKAWA

One of the significant problems occurred in the excavation of hard rock mass is structural failure caused by falling or sliding of blocks defined by intersecting structural discontinuities. It is believed that it will be the effective method against structural failure to forecast the existence of keyblocks prior to the excavation, to search and then to support such keyblocks right after the excavation. This paper is to explain how to forecast the shape of keyblock and to calculate required supporting force by utilizing stereographic projection method of computerizing when the data of discontinuities in rock mass are obtained.

1. ま え が き

岩盤における斜面やトンネルなどの掘削に際しては、応力解放による掘削面近傍の岩盤のゆるみを伴い、岩盤内に潜在する節理系やシームの状態によっては、不安定な岩塊を生じて滑落や崩落の原因となる。従来、このような不安定な岩塊については掘削面の観察から経験的に判定され、また卓越した節理、層理あるいはシームなどの弱面に沿う岩塊の安定性が極限平衡解析により確かめられていた。このような局所的安定性に対して、有限要素法のような数値解析が使用されるに及んで、斜面やトンネルの弾性ないし弾塑性解析が容易になり応力変形状態はもちろんのこと、掘削面近傍での塑性域の発生や進展、それらを防ぐに必要な掘削面の支持力の算定などが可能となってきた。このような解析法は基本的には連続体を対象とするもので、亀裂の影響の少ない軟岩、細かい節理系をアトランダムに含む亀裂性岩盤、強風化岩のように岩体自身の強度破壊が岩盤全体の破壊を支配するような場合には適している。一方、中硬岩ないし硬岩の場合には、しばしば既存の不連続面が岩盤の動きを支配

し破壊のモードを形成する¹⁾。そのため、種々のジョイント要素を用いた有限要素解析、剛体ばねモデル(RBSM)、個別剛体要素法(カンドルモデルによる方法)などの数値解析が行われてきている。

有限要素法を代表とする数値解析に対して、岩盤切り取りやダムのアバットメントなどの岩盤斜面の安定性の検討には、従来より極限平衡解析が続けられてきており、ジョイント調査法の改良、不連続面の三次元的表示法の開発、計算機の使用などにより、二次元および三次元状態での斜面の滑り安定性解析が行われるようになった。弾塑性解析により岩盤の逐次破壊の様子がある程度明らかにされるものの、まだ極限平衡解析の結果と結びつく段階には至っていない。したがってそれらの解析法の適用は地質構造状態のほかに、安定性を評価する内容によって異なってくる。斜面崩壊に対する極限平衡解析の考え方は地下空洞の掘削面に対しても適用されるだろう。連続体解析は塑性(ゆるみ)領域の推定には向いているが、その領域内の岩塊の滑動や崩落は直接解析できない。したがって空洞掘削面の局所的な岩塊の動きに対しては、岩盤内の不連続面で形成されたブロックの集合体に対して極限平衡解析を行う方が適している場合が多い。この場合、空洞周辺に岩盤崩壊を引き起こす原因となるかなめの岩塊(キーブロック)に対して極限平衡解

* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部地盤工学科
(〒464 名古屋市千種区不老町)

** 正会員 東急建設(株) 土木技術部 (〒150 渋谷区渋谷1-16-14)

析が適用されるが、このキープロックの考え方が最近さかんに用いられるようになってきた²⁾。

不連続性岩盤を取り扱う場合、その中に存在する不連続面群の調査、評価の方法が一つの基本的な問題である。掘削面でのキープロックの検出は、一般に不連続面群を統計処理して数枚の卓越不連続面群を決めることによって行われている。そのためにステレオ投影法が用いられる。ステレオ投影法は三次元空間内の直線や平面を表現するのにきわめて有効であるが、手作業による場合、その煩雑さと精度に問題があった。

本研究では、不連続面群のステレオ投影による計算および作図をコンピュータによって処理し、不連続性岩盤内の空洞掘削面におけるキープロックの検出とその安定性について検討する手法を述べている。投影面を掘削面と一致させる傾斜投影法を導入することにより、任意の方向および形状をもつ掘削面におけるキープロックの検出と安定性の評価が容易となり、アンカーボルトの方向も掘削面を基準として容易に決めることが可能となった。

なお、本研究は、技術者が現場においてマイクロコンピュータを用い、各掘削段階で観測されたジョイント系、シーム、断層などのもつパラメーターと掘削面の方向とを入力することで、ただちに危険なキープロックの存在を検出し、それを安定させるための支持力の大きさと方向を出力させ、岩盤掘削の現場での施工管理に資することを目的として行われたものである。上の手法が NATM のような計測施工の1つとして普及することを期待したい。

2. 岩盤の不連続面とステレオ投影法

岩盤は大別して軟岩と硬岩に分けられる。軟岩においては節理や断層のような構造的な不連続面の影響は少なく、岩盤を連続体として取り扱ってさまざまな線形、非線形の有限要素法等の解析手法が開発され実行されている。しかし硬岩においては、変形や崩壊は明らかに内部の不連続面系に支配される。

Hoek & Bray は不連続面を“それに沿って岩盤が動きやすい構造的な弱面”と定義している¹⁾。このような構造特性を考慮した硬岩盤の解析手法としてステレオ投影法の利用がある。

ステレオ投影法は3次元空間の図形を2次元平面に投影し表現する方法で、結晶学、地質学などの分野で利用されている。これには等角投影法と等面積投影法とがあり、それぞれウルフ網、シュミット網とも称せられている。また投影の表示によって、赤道投影と極投影とがある。ステレオ投影の原理については Goodman¹¹⁾、Hoek & Bray¹⁾、等が記述している。等角投影法と等面積投影

法はおのおの一長一短で、手作業による場合は後者がよく使用される。しかし数学的に処理しコンピュータに組み込むには前者の方が有利であるので本論文では前者を採用した。

不連続面の表示方法には、数学的有利さを考え、地質技術者の間で通常使用されている、N 60° W, 30° NE, のような表記によらず、I. S. R. M の表記³⁾を採用した。図-1 にそれを示す。平面は傾斜ベクトルの(傾斜方位/傾斜角)、面と面の交線などの直線は(トレンド/プランジ)¹¹⁾とそれぞれ表わされる。

ステレオ投影をコンピュータで計算作図するには、必要な基本図形を数式で表現しなくてはならない。以下にそれを示す。定式化はすべて下半球投影で行った。その際、投影面が xy 平面と一致するような直交デカルト座標系を考え、ステレオ球は、半径1の単位球で表現されている。

• 大円

傾斜平面が、ステレオ球の中心を含んで球を切るときの交線が作る円が大円で、図-2 の $d-e-f$ の円である。この大円上を移動するベクトル A を考える。 A の投影ベクトル C の先端の軌跡が大円のステレオ投影である。平面の法線ベクトルを $n = (0, -\sin \alpha, \cos \alpha)^T$ とすると、 A と n の直交条件、 C と Z_0 の直交条件、 $A \cdot A = 1$ 等の各条件と $C = sB + Z_0$ (s はスカラー) の式を解くことで C の先端が描く軌跡が次式で表わされる。

$$x^2 + (y - \tan \alpha)^2 = \sec^2 \alpha \dots\dots\dots (1)$$



図-1 不連続面の表現

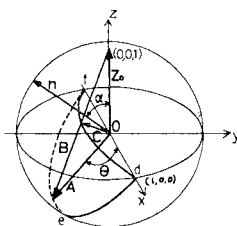


図-2 大円のベクトル関係

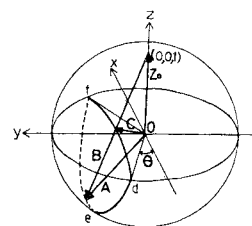


図-3 小円のベクトル関係

注1) プランジは1本の線の傾斜をいい、トレンドは線の水平面への投影の方向を北から時計まわりに計ったものである¹⁾。

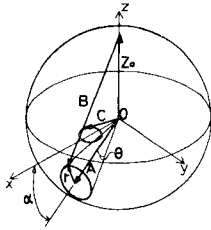


図-4 円錐のベクトル関係

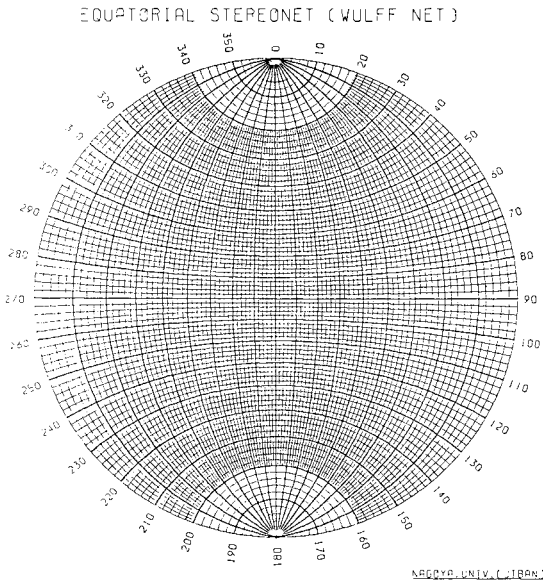


図-5 赤道面投影図 (レーザプリンタ使用)

したがって大円のステレオ投影は円弧となる。

• 小円

平面が球の中心を含まないで球を切るときの交線が小円であるがステレオ投影では特に平面が鉛直面と平行な場合を考える。図-3の d-e-f が小円である。図-3の A は、xz 平面に対して常に一定角 θ で移動するので、大円のときと同様に考えて、次式が得られる。

$$x^2 + (y - \operatorname{cosec} \theta)^2 = \cot^2 \theta \dots\dots\dots (2)$$

以上の結果を用いて、大円と小円を 2 度間隔でコンピュータ作図したものを図-5 に示す。

• 円錐

図-4 に示すように A を軸とする頂角 2θ の円錐が球を切るときの交線は円となる。この円を投影したものを考える。A が xz 平面上にあるとして、A と x 軸のなす角を α とする。A の先端を始点とした定ベクトル r を考えると、 $C = s(A+r) - Z_0 + Z_0$ となる。これより C の先端の軌跡は次式のように導かれる。

$$y^2 + \left(x - \frac{\cos \alpha}{\cos \theta + \sin \alpha}\right)^2 = \frac{\sin^2 \theta}{(\cos \theta + \sin \alpha)^2} \dots\dots\dots (3)$$

下半球投影の場合、式 (3) で示される円の一部分が基本円の外に出るときには、その部分は次式で表現される円となって再び基本円内に投影される。

$$y^2 + \left(x - \frac{\cos \alpha}{\cos \theta - \sin \alpha}\right)^2 = \frac{\sin^2 \theta}{(\cos \theta - \sin \alpha)^2} \dots\dots\dots (4)$$

任意の傾斜方位や傾斜角を有する平面や、円錐に対しては以上の各式に座標変換の考えを組み合わせる。

3. 節理探査と統計処理

現場における調査や観察から多くの不連続面群の情報が得られる。その中のほとんどは節理に関するものである。1枚の節理面は1個の極として表わされる。多くの極点群をプロットした投影図はポイントダイアグラムと呼ばれる。ポイントダイアグラムを統計処理すると、極の密度コンター図が得られる⁴⁾が、従来手作業による方法としてデニスの計数法や移動円計数法等が使われている¹⁾。これに対しコンピュータを用いて極の密度を計算する手段として次のような方法が考えられる。ステレオ投影面を図-7のようにメッシュ分割する。メッシュの各交点 $c(x, y)$ をステレオ球面に逆投影して図-4の A に相当するベクトルを作る。A を軸とした角度 θ の円錐を考えてこの中に含まれる節理面の極ベクトルの個数で各交点の密度とみなす。この際 θ は円錐の底面積と球の表面積の割合から決められる。北の方位と y 軸の方向を一致させたステレオ球で考えると、 α/β (傾斜方位/傾斜角) の節理面の極ベクトル n は、座標変換マトリクスを用いて次のように表わされる。

$$n = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \beta \\ 0 \\ -\cos \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \beta \cos \psi \\ -\sin \beta \sin \psi \\ -\cos \beta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

(ただし $\psi = \alpha - (3/2)\pi$)

また点 $c(x, y)$ から A への変換は次式で表わされる。

$$A = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \frac{1}{x^2 + y^2 + 1} \begin{bmatrix} 2x \\ 2y \\ x^2 + y^2 - 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

n と A の交角 r は内積より求まり、 $r = \cos^{-1}(A \cdot n)$ となる。 n はすべて下半球に存在しているので、カウントされる個数 N は次式で表わされる。

$$N = N_1 + N_2 \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 N_1 : $r \leq \theta$ を満足する n の個数

N_2 : $(180^\circ - r) \leq \theta$ を満足する n の個数

一方円錐の底面積 S_c は

$$S_c = 2\pi \int_0^{1 - \cos \theta} \sqrt{1 - (x + \cos \theta)^2} dx$$

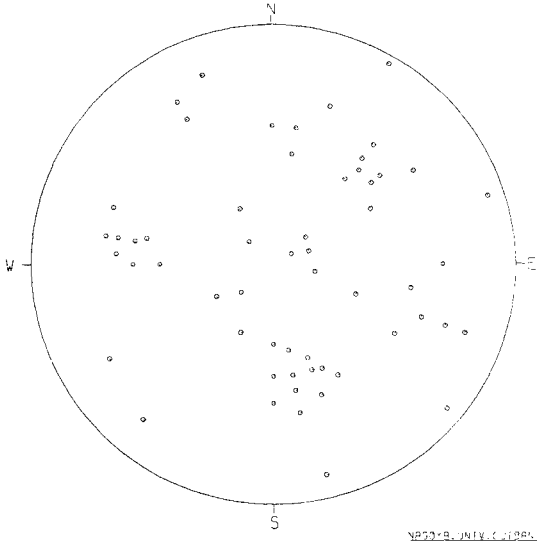


図-6 ポイントダイヤグラム

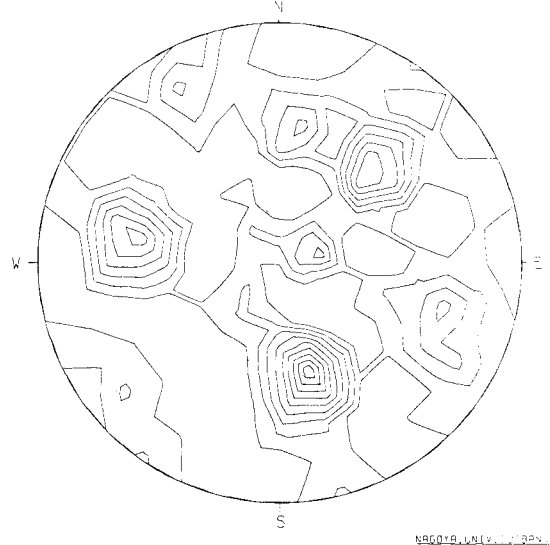


図-8 極密度コンター図

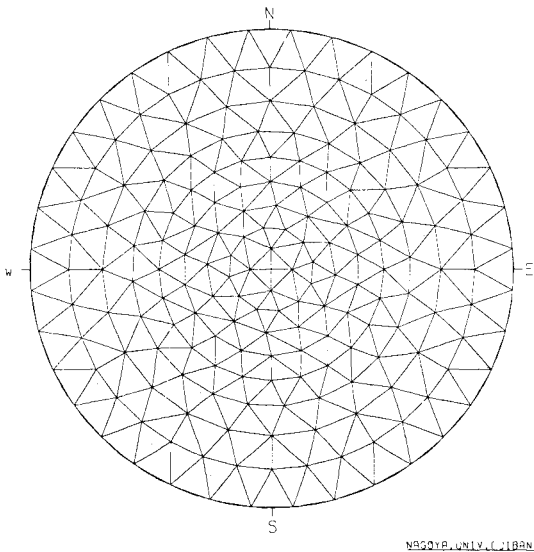


図-7 密度を求める点を結んだメッシュ図

$$\cdot \left[1 + \frac{(x + \cos \theta)^2}{1 - (x + \cos \theta)^2} \right]^{\frac{1}{2}} dx = 2\pi(1 - \cos \theta) \dots \dots \dots (8)$$

であるので、球の表面積 S_0 との面積比 s は、 $s = S_c / S_0 = (1 - \cos \theta) / 2 \times 100 (\%)$ で表わされる。

Hoek & Bray は s を 1% にとれば極密度の算定には十分であると提案している¹⁾。本論の場合、メッシュ分割の粗さと S_c の大きさの 2 つに密度コンターは影響される。そこで数通りの S_c と θ の組合せで密度コンターを描いてみたがそれほど差異は認められなかったので s は 1 (%) 程度、メッシュの粗さは図-7 の程度でよ

いと考えられる。図-7 ではメッシュ交点を 191 点としている。図-6 のような 59 点のポイントダイヤグラムに対して図-7 のメッシュで、 $s=1 (\%)$ について極密度を表わしたものを図-8 に示す。

極密度コンターが描かれるとこれにより卓越する節理面群を推定することができる。

4. キーブロックと安定解析

(1) キーブロックとステレオ投影

岩盤内にある不連続面系と掘削面によって、多くの有限なブロック群が形成される(図-9)。これらのブロックの中で掘削空間側に抜け出す可能性があるような末広がりが岩塊を、ゲンハーシとグッドマンは石造りアーチ橋におけるキーストーンにならってキーブロックと名づけ

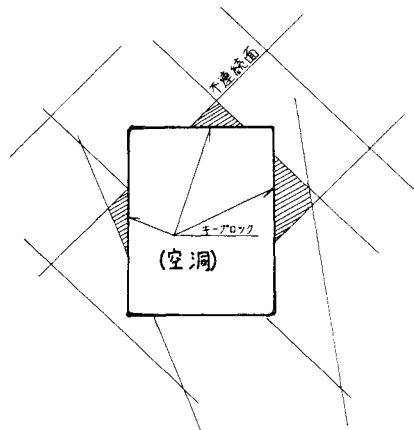


図-9 キーブロックの概念

ている⁵⁾。キープロックが空間側に抜け出すと、岩盤はモザイクが崩れるように崩壊する危険性がある。ステレオ投影では、図-9に示す斜線部の球面三角形がキープロックを表わす。

キープロックを発見し、これに適切な支保を施すことは有効な手法である。1枚の不連続面は岩盤を2つの半無限領域に分割する。岩盤内にM群の不連続面あるとすると、キープロックを形成する面の中の1つは掘削面であるので、Q面体のキープロックの個数Nは次式で表わされる。

$$N = {}_M C_{Q-1} = \frac{M!}{(M+1-Q)!(Q-1)!} \dots\dots\dots (9)$$

もし岩盤内に4群の不連続面があれば、4面体キープロックの個数は、式(9)よりM=4, Q=4としてN=4個で、また5面体キープロックは1個となるので、キープロックの総数は5個であることがわかる。

ステレオ投影を利用することでキープロックの存在や形状が求められる。岩盤に3群の不連続面がある場合を考える。この場合キープロックは4面体となる。

トポロジーの理論より次のことがいえる。“数枚の平面群により形成される有限多面体の領域は、平面群を1点を共有するように平行移動するとその1点に収束する⁵⁾”。ステレオ投影では平面群はステレオ球の中心を共有していて、かつ球の中心は投影されない点である。このことを考慮すると次のことがいえる。“ステレオ投影面上にある積領域の中で、掘削面を新たに投影したときに始めて有限となり、投影されなくなる積領域となるものがキープロックである”。図-10を用いてこのことを説明する。平面 α の上方領域を $\bar{\alpha}$ 、下方領域を $\underline{\alpha}$ で表わすと、斜線部は $(\underline{\alpha} \cap \underline{\beta} \cap \underline{\gamma})$ を表わしている。掘削面が水平であるとすれば、基本円が掘削面を表わし、円の内部が下方領域を表わす。掘削面を δ とすると $(\underline{\alpha} \cap \underline{\beta} \cap \underline{\gamma} \cap \delta)$ は投影されない積領域である、したがってこれがキープロックであるとわかる。この場合 $(\bar{\alpha} \cap \bar{\beta} \cap \bar{\gamma} \cap \delta)$ もキープロックとなることに注意する必要がある。ただし前者は天端に現われるもので、後者は底盤に現われる。

キープロックの形状は簡単な作図で求められる。図-

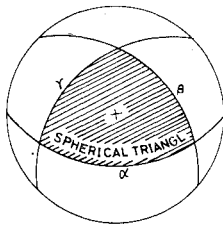


図-10 キープロックを示す球面三角形

11を水平天端面におけるものとする、球面三角形GHIがキープロックを表わしている。AB//ad, CD//eb, EF//ed, EF//ab, となるように図を描く(図-11)。

この場合 $\triangle abc$, $\triangle cde$ の2つの三角形が描かれるが、不連続面群の傾斜方向を考慮すると、 $\triangle abc$ が天端面に露出するキープロックの底面三角形であることがわかる。4面体の頂点fの位置は、底面三角形の各頂点を通り、OH, OI, OG, に平行な線を描くことで決定される。さらに頂点fを含むX-X平面でキープロックを切断したときの断面図を描くことでキープロックの高さが求められる。X-X面は、ステレオ投影図ではこれと平行な直径で表わされるので、角度 u , w を読み取ることで断面三角形の2底角が決定され必要な断面図が描ける⁷⁾。

ここで4面体 $abcf$ は、天端におけるキープロックを地山内部より俯瞰したものである。これと線対称に描いた図形が掘削空間側からみたキープロック形状である。したがって $\triangle a'b'c'$ が実際に天端で観測されるキープロックの底面三角形である。キープロックの体積は、体積=(底面積)×(高さ)/3、で計算できる。不連続面の群数が4以上となっても同様の手法でキープロックの形状が作図される。

(2) 外力とキープロックの動き

重力や水圧力などの力を作用させたときのキープロックの動きを知ることは重要である。斜面のくさびブロックについてはHocking⁸⁾やPanet¹²⁾が、またJ.M. Lucas⁹⁾はより一般的な場合についてのブロックの運動について検討している。本論では以下の方法でキープロックの動きを決定する。種々の外力の合力をFとす

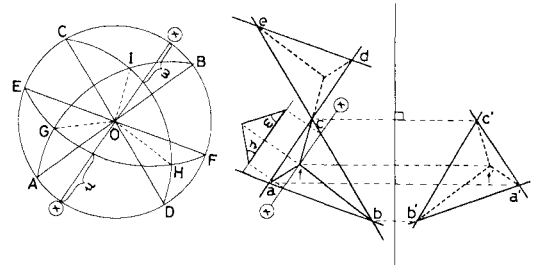


図-11 キープロック4面体の作図

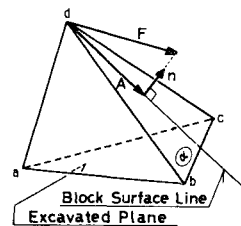


図-12 滑動方向ベクトルとキープロック

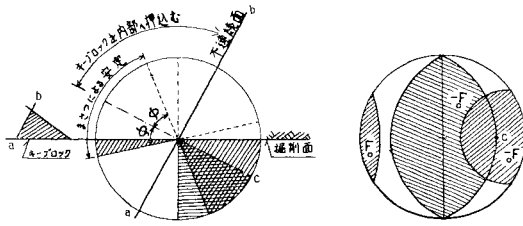


図-13 キーブロックの安定と作用合力 F

るとき、ブロックの地山内の頂点 d に F の始点を一致させる (図-12)。 F がキーブブロックの内部に向かうならば、ブロックはすべての不連続面から分離しつつ F の方向へ動く。 F がブロックの外部に向かうならば、 F に最も近い表面線 (block surface line) に沿って動く、表面線とは頂点 d と底面三角形の辺上の任意の点を結んだものである。 A を表面線上のベクトルでかつ F を表面に正射影したものとすると、ブロックは A の方向へ動く。ただし、ここではブロックの特性は均一で、異方的なせん断強度特性をもっておらず、またその移動が特定の方向に制限されるようなことがないという仮定のもとに回転運動の影響を無視している¹³⁾。 n をそれに沿ってすべりが生じる面の単位法線ベクトルとすると A は次式で決定される。

$$A = F - (F \cdot n)n \dots \dots \dots (10)$$

もし F がブロックのすべての面に対して 90° 以上の角度で外部に向かうならばブロックは地山内部に向かって押し込まれる格好となりブロックは動かない。

不連続面上のブロックの滑りの条件として、モルクーロンの式、 $\tau = c + \sigma \tan \phi$ (c はみかけの粘着力、 ϕ は不連続面の摩擦角) に従うものとする。粘着力を外力と考えると、ブロックの滑りに対する極限平衡条件は $\phi = \theta$ (θ は合力 F と面の法線のなす角) となる。この条件は法線を軸とした円錐面となる。この円錐を摩擦円錐と呼ぶ。 F が摩擦円錐の中に含まれるならばブロックは安定する¹⁴⁾。安全率は次式で表わされる。

$$F_s = \tan \phi / \tan \theta \dots \dots \dots (11)$$

図-13 の $a-b$ が滑り面とすると、外力 F や $-F$ が摩擦円錐内にあるとブロックは摩擦で安定する。また $-F$ が大円で囲まれた斜線部内にあると F はブロックを空間側へ移動させる分力を生じないのでブロックは地山に押し込まれる格好となり安定する。

5. 傾斜半球投影法とキーブブロック

(1) 傾斜半球投影

現実の地下空洞の壁面や、掘削斜面は水平ではない。このようなとき、今までの水平下半球投影の手法を活かすために、図-14 に示すように下半球を掘削空間側に

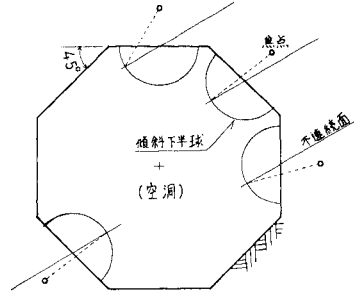


図-14 傾斜下半球投影の概念

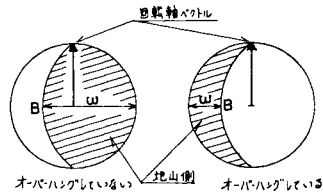


図-15 投影面の回転方向

位置させるような傾斜半球投影法が利用される⁶⁾。傾斜投影では、同一不連続面部の投影位置が、掘削面の傾斜に応じて変化する (図-14)。

ステレオ球を傾斜させるには、掘削面上にある水平直線を軸として回転するとよい。掘削面の傾斜ベクトルに対して右向き水平ベクトルを回転の軸ベクトルとすれば、掘削面が、オーバーハングしているかないかによって回転の方向が決まる (図-15)。水平半球投影で掘削面の大円が図-15 のようになっていると、斜線部が地山内部を表わす。下半球を空間側に出すには、投影面上より斜線部を消すとよいので、回転は、オーバーハングの場合は角度 ω の右回転、オーバーハングしていないときは角度 ω の左回転となる。不連続面を表わす極ベクトルは本質的には回転しないのであるから、投影面を規定している座標系を座標変換することで回転を表現する。

三次元直交右手系座標における座標変換は次式で示される。

$$x'_i = \alpha_{ij} x_j \dots \dots \dots (12)$$

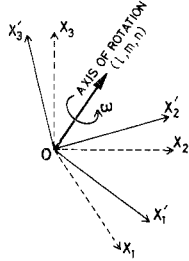
α_{ij} は、方向余弦 (l, m, n) の任意軸に対する回転のマトリクスで、Thomson & Tait (1962) が示したものをを用いる¹⁰⁾。回軸軸ベクトル T は、掘削面の法線ベクトルで z 成分が正のものを n とし、掘削面の傾斜ベクトルを D とすると次式で求められる。

$$T = D \times n \dots \dots \dots (13)$$

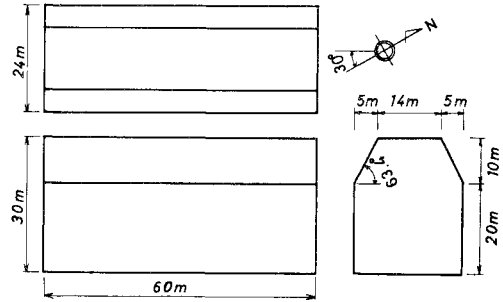
(12) を用いて座標軸を回転し、新座標系の $x'y'$ 平面を投影面としてステレオ投影を行うと傾斜投影が得られる。

(2) 掘削面の形状とキーブブロック

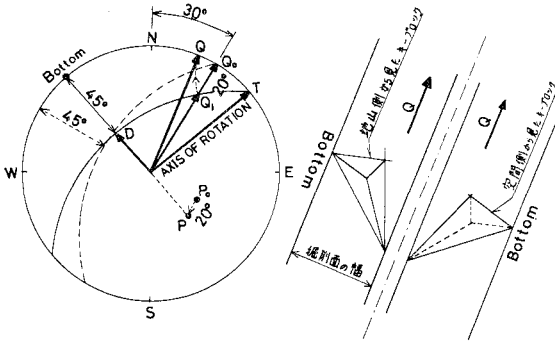
傾斜投影によって得られるキーブブロックの底面三角形



図一16 座標変換と回転の軸ベクトル



図一18 地下空洞の形状



図一17 回転に伴う形状基準ベクトル Q の移動

と掘削面の形状との相対関係がわかると、掘削面に現われる最大のキープロックがわかる。このために新たに形状基準ベクトル Q を定義する。 Q は掘削面の形状を描くときの基本線を決定するものであって掘削面内にあれば任意にとってよい。図一14の断面のトンネルでトンネル軸が $30^\circ/20^\circ$ に傾斜している場合、左肩ハンチ面に現われるキープロックについて考える。 Q をトンネル軸の方向にとる。トンネル軸が水平な場合のハンチ面の極が P_0 で 20° 傾斜した場合の極が P である。回転軸ベクトルが T になるのは前述のとおりである。このとき Q は Q_0 から Q_1 として小円に沿って Q へ移動し掘削面を表わす基本円上に位置するようになる(図一17)。Bottom は掘削面の傾斜方向を示している。 Q に平行にハンチの稜線を描くと、これに納まる最大のキープロックが決定される。先に述べたように線対称な図を描くと掘削面に現われるキープロックの底面三角形が求められる。

6. 解析例

図一6に示すような節理系を有する岩盤内に、図一18のような地下空洞を掘削する場合、天端、西側肩ハンチ、北側妻壁の各面に予想されるキープロックについて検討する。岩盤で卓越する節理は

次の3群である(図一8)。

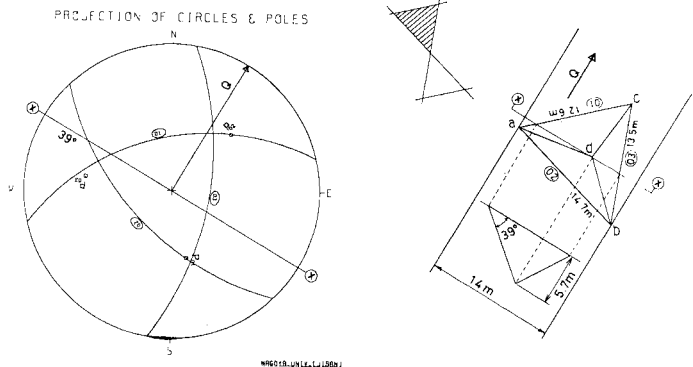
01... $347^\circ/50^\circ$ ($\phi=30^\circ$), 02... $226^\circ/58^\circ$ ($\phi=20^\circ$), 03... $99^\circ/61^\circ$ ($\phi=30^\circ$)。節理面の粘着力はないものとし、摩擦角 ϕ をそれぞれ上に示すように仮定する。節理群の名称を 01, 02, 03 で表わした。なお各投影は傾斜投影したものを示してある。ブロックに作用する外力としては、重力、水圧力、地震力などがあるが、安定性の初期検討としては、重力方向への幾何学的な安定性を考慮すればよいので、ここでは重力について考える。

(1) 天端

形状基準ベクトル Q を $30^\circ/0^\circ$ にとる。図一19の4面体 $abcd$ が最大キープロックである。重力の方向は、基本円の中心 O となり、球面三角形の中に含まれるので、このブロックは鉛直に落下する可能性がある。キープロックの体積はヘロンの公式を用いて図より求められ、 $V = (1/3) \times 5.7 \times \sqrt{20.4 \times (20.4 - 12.6) \times (20.4 - 13.5) \times (20.4 - 14.7)} = 150.3 \text{ m}^3$ となる。岩の単位体積重量を $\gamma = 2.6 \text{ tf/m}^3$ とすると、このキープロックの重量は、 $W = 2.6 \times 150.3 = 390.8 \text{ tf}$ となり必要な安全率を $F_s = 1.2$ とすれば、加えるべき支保力 B は鉛直方向に、 $|B| = 1.2 \times 390.8 = 468.9 \text{ t}$ となる。

(2) 西側肩ハンチ面

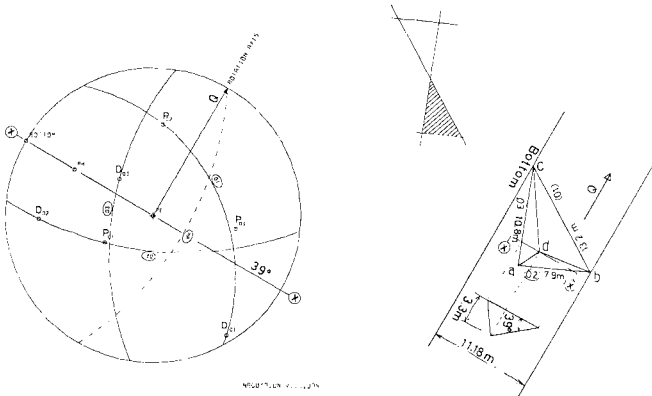
Q を天端と同様、 $30^\circ/0^\circ$ にとると、傾斜投影図は図



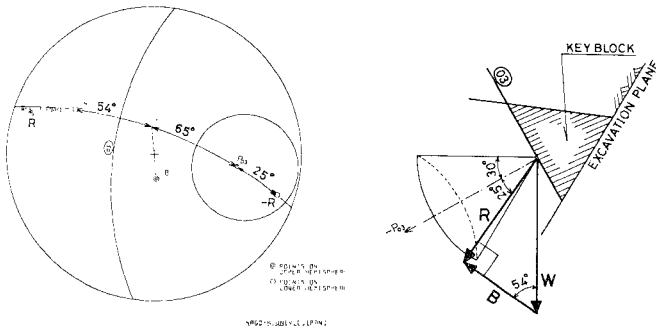
図一19 天端面に予想されるキープロック

—20 のようになり最大のキープロックの形状が決まり、4 面体 $abcd$ のような格好となる。キープロックの体積と重量は、天端のときと同様にして、それぞれ、 $V=46.9 \text{ m}^3$ 、 $W=121.9 \text{ tf}$ となる。図—21 の P_H が水平面の極、すなわち重力の方向を示している。 P_H と最も近い表面線は、03 節理面の傾斜ベクトル D_{03} であるので、このキープロックは D_{03} の方向へ滑り落ちる可能性があ

る。このキープロックに必要な支保力 B は次のように求められる。節理面 03 に対する $\phi=30^\circ$ の摩擦円を描く (図—21)。 W と B の合力 R の逆ベクトル $-R$ が摩擦円内にくるようにする。 W と P_{03} を含む大円でキープロックを切断したものが図—21 の右側の図である。安全率 $F_s=1.2$ を確保するには R と 03 面の法線のなす角は、 $\theta=\tan^{-1}(\tan 30^\circ)/1.2 \approx 25^\circ$ となる。すると R の位置が決まる。なお外力ベクトルの投影には全球投影を用い、一重まるは下半球投影、二重まるは上半球投影を表わしている。 R と $-R$ は中心に対して点对称な位置にある。 B の方向と大きさは、ベクトルの合成で求められ、コンピュータでプロットさせたものが図—21 に示してある。この図は傾斜投影図であるので、式 (12) の逆変換を行い、水平な投影面に B を投影して B の方向と大きさが求められる。結果として、 $|B|=71.7 \text{ tf}$ 、方向は、 $280^\circ/-36^\circ$ (負号は水平から上向きであることを示す) と得られた。



図—20 側壁に予想されるキープロック



図—21 滑り面の摩擦円錐と支保力 B の関係

位置が決まる。なお外力ベクトルの投影には全球投影を用い、一重まるは下半球投影、二重まるは上半球投影を表わしている。 R と $-R$ は中心に対して点对称な位置にある。 B の方向と大きさは、ベクトルの合成で求められ、コンピュータでプロットさせたものが図—21 に示してある。この図は傾斜投影図であるので、式 (12) の逆変換を行い、水平な投影面に B を投影して B の方向と大きさが求められる。結果として、 $|B|=71.7 \text{ tf}$ 、方向は、 $280^\circ/-36^\circ$ (負号は水平から上向きであることを示す) と得られた。

(3) 北側妻壁

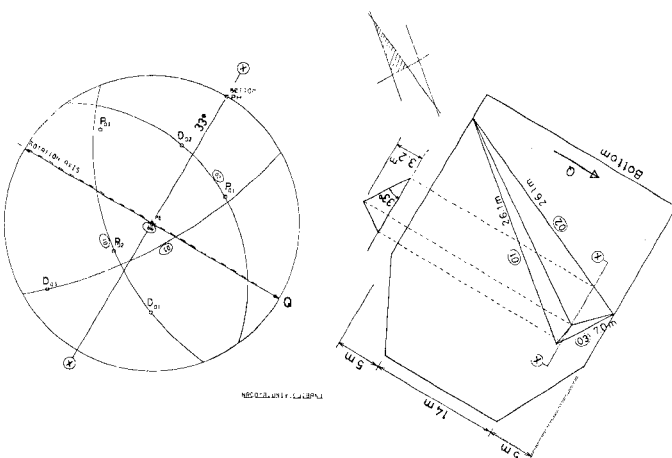
Q を $120^\circ/0^\circ$ として傾斜投影したものが、図—22 である。キープロックの形状は、かなり細長いものになっている。このブロックは、節理面 02 に沿って、 D_{02} 方向へ滑り落ちる可能性がある。必要な支保力の計算は、前の例と同様に行うと得られる。

図—20, 22 における点線は水平面を表わしている。また、各キープロックの図は地山側からの俯瞰図となっており、これらと線対称な図を描くことで、掘削断面に現われるキープロックの底面三角形を描くことができる。

7. あとがき

本研究は、岩盤における不連続面 (主に節理) 系の観測を活かした地下空洞の三次元的設計手法をシステム化しようとするものである。その流れを要約すると次のようになる。

- ① ボーリングや表面調査等による不連続面群の観測。
- ② コンピュータ処理による卓越不連続面群の決定。
- ③ 掘削形状に応じて傾斜投影法を用いたコンピュータ作図を行い、キープロックの形状、大きさを決定する。



図—22 妻壁に予想されるキープロック

④ キープロックに作用する、重力、水圧力、地山応力、粘着力などの外力群の合力を投影し、これからキープロックの移動方向を求め、必要な安全率を確保するための支保力の大きさと方向を求める。

ステレオ投影をコンピュータで計算作図することで、以上の手法が、視覚的にかつ十分な精度で行えるようになった。これによって現場において、掘削面に現われる節理面群のデータから、随時キープロックを検出し、必要な支保を施工することができると思われる。また地下空洞の設計段階においても、掘削時のキープロックの予想が可能であり、最適な掘削形状、掘削位置の検討ができるであろう。

最後に、本研究を進めるにあたり、貴重な助言と励ましをいただいた名古屋大学工学部の市川康明助手、熊本大学工学部の尾原祐三助手、名古屋大学院生の京屋孝史氏、ならびに東急建設(株)の星野彰土木技術部長、寺沢慎電算センター室長、同センターの徳丸精宏氏に、ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Hoek, E. and Bray, J. (小野寺・吉中 共訳) : 岩盤斜面工学, 朝倉書店.
- 2) Goodman, R.E. : Theme B-Surface and Near-surface Excavations, General Report, 5th I. S. R. M., 1983.
- 3) International Society for Rock Mechanics Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 15, pp. 319~368, 1978.
- 4) 土木学会 : 土木技術者のための岩盤力学, pp. 37~42, 昭和 50 年改訂版.
- 5) Gen Hua Shi and Goodman, R. E. : A New Concept for Support of Underground and Surface Excavations in Discontinuous Rocks Based on A Keystone Principle, Proc. of 22nd U.S. Sympo. on Rock Mech., pp. 310~316, 1981.
- 6) Priest, S. D. : The Use of Inclined Hemisphere Projection Methods for the Determination of Kinematic Feasibility Slide Direction and Volume of Rock Blocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 17, pp. 1~23, 1980.
- 7) Hoek, E. and Brown, E. T. : Underground Excavation in Rock, Institution of Mining and Metallurgy, pp. 61~85, pp. 183~196, 1982.
- 8) Hocking, G. : A Method for Distinguishing between Single and Double Plane Sliding of Tetrahedral Wedges, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 13, pp. 225~226, 1976.
- 9) Lucus, J. M. : A General Stereographic Method for Determining the Possible Mode of Failure of Any Tetrahedral Rock Wedge, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 17, pp. 57~61, 1980.
- 10) Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W. : Fundamentals of Rock Mechanics, London, Chapman and Hall.
- 11) Goodman, R. E. : Introduction to Rock Mechanics, J. Wiley & Sons, New York, pp. 417~434, 1980.
- 12) Panet, M. : Discussion on "Graphical stability analysis of slopes in jointed rock" by John K. W., J. Soil Mech. and Found. Div. Proc. A. S. C. E., Vol. 95, SM 2, pp. 685~686 (March 1969).
- 13) 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. (1983. 8. 10・受付)