

確率論的手法を用いた掘削面における キープロック安定解析

大西有三¹・西山弘之²

¹正会員 Ph. D. 工博 京都大学工学部教授 (〒606-01 京都府京都市左京区吉田本町)

²正会員 東京電力(株) (〒409-06 山梨県大月市七保町瀬戸 1646)

従来、キープロック安定解析は確定論的に扱われてきた。しかし、この方法では地盤の物性値のばらつきを考慮することが出来ず、得られた解析結果にどれほどの信頼性があるか分からない。そこで、本研究では岩盤調査時に得られる地盤・岩盤の物性値のばらつきを考慮するため、設計で用いる物性値をパラメータごとに確率分布関数で表示し、評価法において確率変数として扱い、確率論的な検討を試みる。その際、簡便法として物性値の平均値と分散を用いる信頼性理論に基づく一次近似二次モーメント法を利用して、確率論的解析の有用性について考察を行う。

Key Words : *unstable rock block, dispersion of material properties, the probability of failure, performance function, the first order second moment method, design factors*

1. はじめに

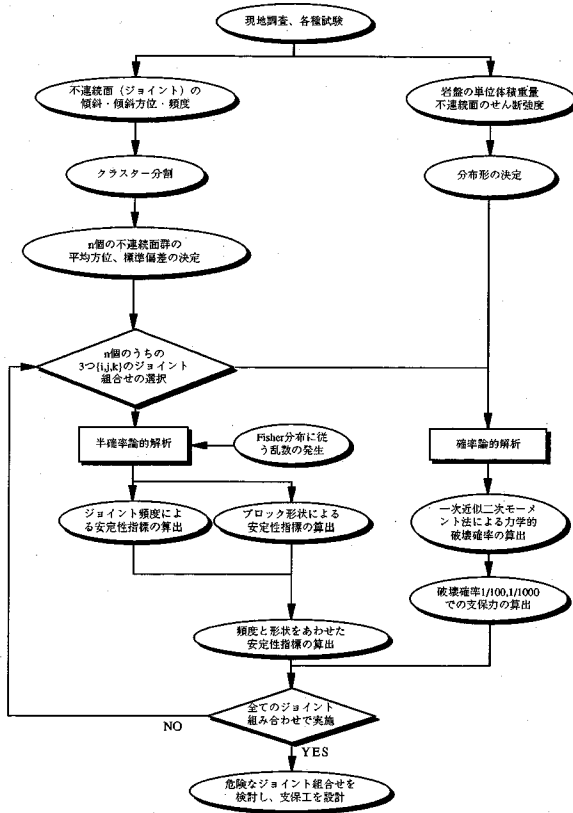
一般に岩盤には、比較的規則的に配列された複数組の不連続面群が存在し、それらが岩盤の力学特性に大きな影響を及ぼしている。それら不連続面群の地質的分布状況を把握し、キープロックの位置を予測して補強することは、安定解析における目的として非常に重要な事項の一つである。ここで、キープロックとは対象となる岩盤斜面あるいは掘削断面から抜け出す可能性のあるブロックを意味する。

従来、キープロック安定解析は確定論的に扱われてきた。確定論的方法とは、ばらつきを統計的に処理した後、平均値などの確定的な地盤物性値を決めて検討する方法である。しかし、この方法では地盤の物性値のばらつきを考慮することが出来ず、得られた解析結果にどれほどの信用性があるか分からない。そこで、本研究では岩盤調査時に得られる地盤・岩盤の物性値のばらつきを考慮するため、設計で用いる物性値をパラメータ毎に確率分布関数で表示し、評価法において確率変数として扱い、確率論的な検討を試みる。その際、簡便法として物性値の平均値と分散を用いる信頼性理論に基づく一次近似二次モーメント法を利用し、確率論的解析の有用性について考察を実施する。

2. 解析手順

解析手順のフローチャートを図-1に示し、以下に簡単な説明を加える。現地調査、各種試験から得られた地質不連続面の情報から、不連続面の傾斜、傾斜方位のデータ全てをステレオ投影図上に表し、卓越方向に分割する(クラスター分割)。そして、得られた n 個のクラスター毎の平均方位(確定値)、標準偏差を決定する。得られた n 個の確定値から3つの組み合わせを選び、それに掘削自由面を加えた4つの面で4面体ブロックを解析対象とする(四面体以上の面を持つブロックもあるが、数が少ないのでここでは考慮しない¹⁾)。それぞれの組み合わせにより得られた四面体ブロック毎に、半確率論的解析によるジョイントの頻度を考慮した指標とブロックの形を考慮した指標を算出し、ブロックの安定性指標を算定する。ここで安定性指標とは、どの組み合わせのブロックがすべり破壊を起こすキープロックとなる可能性が高いかという指標を意味する。

次に、実際にそのブロックの破壊確率を確率論的方法によって算出する。まず、用いる物性値をパラメータ毎に確率分布関数で表示し、定義した性能関数において確率変数として扱い、一次近似二次モーメント法を用いて破壊確率を求める。得られた結果では、破壊確率が高く構造物としては安全性が十分でないことが予想されるため、破壊確率が1/100あるいは1/1000になるように設計値を算定し、そのための支保力を算定する。



図一 解析フローチャート

3. 不連続面の統計処理

キーブロック解析を行う前に、現場で得られる各種計測パラメータの統計処理を行う。不連続面（以下ジョイントという）の表示は傾斜方位と傾斜を用いて行われるが、データ解析では等角ステレオネットが利用され、面の表示はその面の法線方向を示す点（極）で表される。そして、それらの極を卓越方向に分割する（クラスター分割）。クラスター分割により、ジョイントは n 個の卓越方向群に分けられる。クラスター分割で得られた各クラスター毎に、最も密度の高い点を平均方位（確定ジョイント）とする。また平均方位だけでは、ジョイントのばらつきを評価することが出来ないため、球面統計学を適用し、クラスター毎のばらつきを計算する。もし、極がクラスターとして一箇所の近傍に集まっているならば、割れ目の密度は球面正規分布形で表される。方向データのばらつきの程度（分散）は次の式の形の広がり角度で示される²⁾。

$$\Omega = \arcsin \sqrt{2 \left(1 - \frac{1}{N} K \right)} \quad (1)$$

ここに、 Ω は広がり角度、 N はサンプル数、 K は方

位分散係数である²⁾。この広がり角は通常の統計では標準偏差に相当する。いま検討している平面すべりでは、ある特定のジョイント群の広がり角は、そのジョイント群の傾きの標準偏差と考える。ここで、式(1)における方位分散係数 K の決定方法について述べる。ある円錐の中に密集した一群の単位ベクトル（ジョイント法線）の平均的な方位は、その円錐内のすべての単位ベクトルの合力 \mathbf{R} の方位によって決定される。もしすべてのジョイント法線が完全に平行であるならば、 \mathbf{R} の大きさは集合 N 内の法線の総数に等しくなる。ジョイントの方向は分散しているため、 \mathbf{R} の長さは N より短くなる。よって、方位の分散度の指標として方位分散係数は次のように定義される²⁾。

$$K = \frac{N-1}{N-|\mathbf{R}|} \quad (2)$$

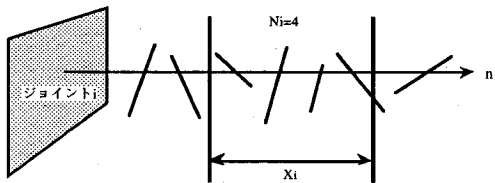
以上の方法により、各クラスターの平均方位と標準偏差が計算される。

4. 安定性指標の算出

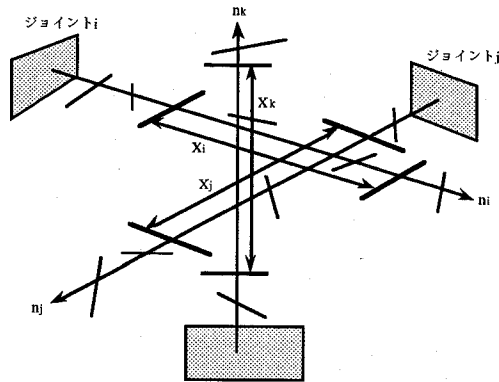
ブロックがすべり破壊を引き起こす要因については、過去の経験などから、少なくとも3つの独立した要因があるとされている¹⁾。その3つの要因とは、まず岩盤に含まれるジョイントの頻度、次に移動可能ブロックの形、最後に移動可能ブロックの力学的な釣り合い状態である。従来の研究では、この3つの要因をそれぞれジョイントの頻度による安定性指標、幾何学的な安定性指標、力学的な安定性指標として、3つの指標を掛け合わせたものをブロックの総合安定性指標にしていた¹⁾。しかし本研究では、ジョイントの頻度による安定性指標と幾何学的な安定性指標の2つを掛け合わせるによって、総合安定性指標とし、力学的な安定性指標は破壊確率として、総合安定性指標とは別に算出する。これは、従来の方法では3つの指標を掛け合わせるという評価法上、力学的安定性指標では危険だが、ジョイント頻度による指標は小さいという場合に、総合指標として小さくなり危険度が小さいと見なされる恐れがあるからである。つまり、そのジョイント組合せは実際にキーブロックとして発生する確率は低いものの、現われた場合にはとても危険であり、支保するなどの補強工を最も必要とするブロックになる可能性があるためである。そこで、まず以下にジョイントの頻度による安定性指標と幾何学的な安定性指標の算出方法について述べる。

(1) ジョイントの頻度による安定性指標 P (JC)

ジョイント頻度による条件とは、各クラスター内に含まれるジョイント群の頻度が斜面安定に及ぼす影響のことである。この指標はジョイント組み合わせによる条件

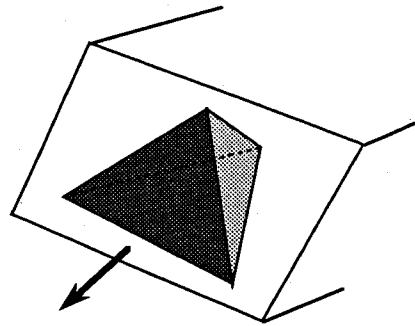


(a) ある区間 (Xi) に交差するジョイントの数

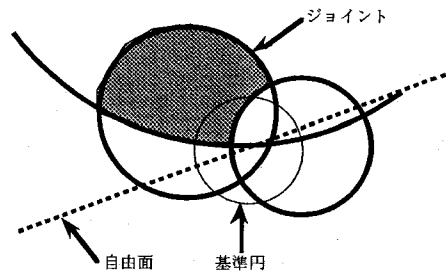


(b) 3つの区間で交差するジョイントの数

図-2 ジョイント法線と交差するジョイント群



(a) 広角JPの見取り図



(b) 広角JPの球面三角形の例

図-3 広角JPの概念図

ともよばれており、以後P (JC : Joint Combination) と表す。

各卓越方向群から選ばれたジョイントの組み合わせによってブロックの出来やすさは異なる。というのはジョイントとジョイントの間隔が密になっている卓越方向群ほど決められたジョイントと交差する可能性が大きくなりブロックも出来やすく、間隔の広い卓越方向群ほど決められたジョイントと交差する可能性が小さくなりブロックも出来にくいからである(図-2参照)。これを式で表現すると、ジョイント頻度による安定性指標の式として、以下ようになる。

$$P(JC) = (\lambda_i, \lambda_j, \lambda_k) |n_i \cdot n_j \times n_k| \quad (3)$$

λ は単位長さあたりのジョイントの平均的な数を表している。 n はジョイントの単位法線ベクトルであり、 i, j, k は n 個あるジョイント群の内から任意の3面を選ぶことを意味する。式(3)はMauldonの方程式とよばれ³⁾、ジョイント頻度による安定性指標を計算することができる。

(2) 幾何学的な安定性指標P(k)

キューブロックの幾何形状によって、自由面から実際に移動可能ブロックがすべる危険性を評価することができる¹⁾。ここでJPとは、ステレオ投影基準球内でジョイント平面のみが構成する底面を持たない多角錐である。側面は全てジョイントで基準球の中心を通過しており、原

点が多角錐の頂点である。ここではクラスター分割で得られた n 個のジョイント群の内、任意の3面で構成された3角錐であり、その形状によって幾何学的にすべりやすいブロックとすべりにくいブロックとに分類する。つまり、それぞれの移動可能ブロックの破壊する危険性の程度が形状的な要因から表されるといえる。

JP内に囲まれた面と面の角度(IA=Interplaner Angle)が大きいものを広角JPといい、ステレオ投影図での球面三角形の面積は大きくなる。逆に、IAが小さいものを狭角JPといい、球面三角形の面積は相対的に小さくなる。現場観測の結果から破壊を起こしたブロックの形は、狭角JPより広角JPの方が圧倒的に多いことが判明しており¹⁾、広角JPの高い危険性を示している。そこで幾何学的にすべりやすいブロックを広角JPといい、すべりにくいブロックを狭角JPと言う(図-3参照)。

JPはIAの値を反映する3つのジョイントで囲まれた球面三角形を持っていて、その球面三角形の面積は移動可能JPの破壊を起こす危険性の程度を表し、球面三角形の面積が大きくなるにつれて、自由面からブロックが抜け得る可能性が大きくなる。したがって、JPの幾何学的な安定性指標はJPの球面三角形面積をステレオ投影球の表面積の比の値で表すことができ、以下の式を示す¹⁾。

$$P(k) = \frac{(A+B+C-\pi)R^2}{4\pi R^2} \quad (4)$$

A, B, C は3つのジョイントで構成されるJPの境界平面間の内角で, Rはステレオ投影図の基本円の半径である. よって, 式(4)によって幾何学的な安定性指標を求めることができる.

(3) 総合的な安定性指標 P(B)

ジョイント頻度による安定性指標 P(JC), 幾何学的な安定性指標 P(k) の2つの指標から総合安定性指標を求めることができる. 2つの指標は互いに独立である. なぜならキープロックの幾何学形状はジョイントの頻度でなく, ジョイントの方向に関係するからである. したがって, 2つの指標を掛け合わせるによって以下の総合安定性指標 P(B) が得られる.

$$P(B) = P(JC)P(k) \quad (5)$$

式(5)により, 不安定なキープロックの出現し易さを評価することができる.

5. 力学的破壊確率の算出

斜面の破壊確率の考え方は, 斜面の安定性評価をより合理的に行うためにシステムの信頼性理論と結び付けられ, 色々な系列の手法へと展開している. そのため, 斜面の信頼性解析の研究の考え方にもそれぞれの要因に着目した流れがある⁴⁾. 本研究においては, 破壊確率は正規分布に従う安全率が1.0を下回る確率であると定義し, 確率手法として修正係数のばらつきを一次近似二次モーメントで表現する方法を選択した.

解析対象の四面体ブロックのすべりモードは一面すべりと二面すべりに分けて解析を行った(図-4参照). ここで性能関数を定義する前に, 以下のような仮定を設定する.

- ジョイントでは, 摩擦のみを考え, 粘着力の項は無視する.
- 岩盤のすべり面での水圧は考慮しない.
- 風化の進行やクリープなどの時間効果は考えない.
- パラメータ間の相関性は無視する.

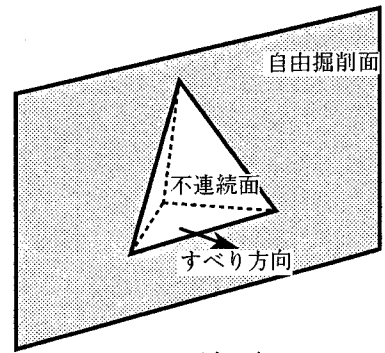
これらの仮定の下で, まず一面すべりの安全率 F は次のように表される.

$$F = \tan\phi / \tan\theta \quad (6)$$

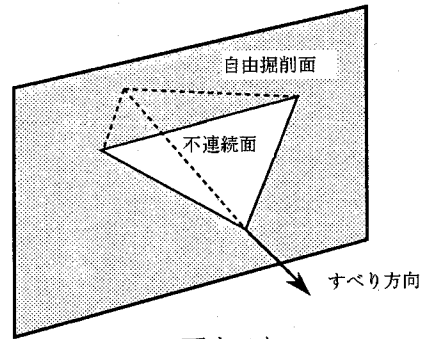
ここで ϕ , θ はそれぞれ, すべり面の摩擦角と傾斜角である. 確率変数 $X = \{\phi, \theta\}$ において関数 $g(X) > 0$ のとき, ブロックの安定が保たれるような関数(性能関数)を次のように設定する.

$$g(X) = \tan\phi - \tan\theta = 0 \quad (7)$$

破壊確率を求める計算において, 確率変数の情報を平



一面すべり



二面すべり

図-4 キープロックの一面すべりと二面すべり

均値と分散である一次および二次モーメントに限定せざるを得ないことが多い. この条件下では, 性能関数が確率変数の線形和で表現できれば, 性能関数の平均値と分散を容易に得ることができる. この定式化はCornell⁵⁾によって提案され, 二次モーメント定式化と呼ばれ, 信頼性の尺度を性能関数の平均値を標準偏差で除した値(図形上では原点から破壊曲面への最短距離にあたる)で定義する. また一般には性能関数が非線形であるため, これを確率変数の平均値においてテーラー展開し, 二次以降の項を無視して, 線形化(一次近似)される. このためこの手法は一次近似二次モーメント法と呼ばれる⁶⁾.

したがって, 確率変数 $X = \{\phi, \theta\}$ の平均と分散を $\bar{X}_i, \sigma_i^2, i=1, 2$ として, 平均値が0, 標準偏差が1.0になるように次式で基準化する.

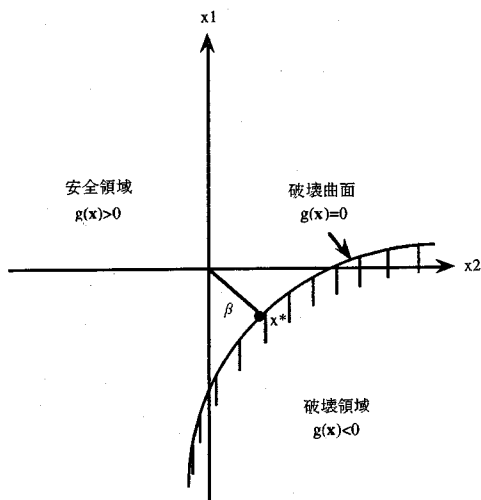
$$x_i = \frac{X_i - \bar{X}_i}{\sigma_i}, \quad i=1, 2 \quad (8)$$

この基準化した値を式(7)に代入して次式が得られる.

$$g(x) = \tan(\sigma_\phi \phi' + \bar{\phi}) - \tan(\sigma_\theta \theta' + \bar{\theta}) = 0 \quad (9)$$

$\sigma_\phi, \sigma_\theta$: 摩擦角と傾斜角の標準偏差

ϕ', θ' : 摩擦角と傾斜角の基準化された値



図一五 基準化した空間における破壊領域と安全領域

$\bar{\phi}, \bar{\theta}$: 摩擦角と傾斜角の平均値

式(9)は基準化した空間における安全領域と破壊領域を分ける破壊基準関数であり、基準化した空間において、破壊曲面は元の関数の変換した形 $g(x)$ となる。図一五に、基準化した空間における安全領域と破壊領域を示す。変換式から考慮して、この基準化した空間の原点は確率変数 x が平均的にその値を最もとりやすいと期待できる点である。それでこの原点が破壊曲面からどれだけ離れているかが安全性を示す一つの尺度と考えてよい。つまり破壊曲面が原点から遠くに動くにつれて、安全領域が大きくなる。そのため、安全性を示す指標 β (信頼性指標と呼ぶ) を原点から破壊曲面への最小距離で表現する考えが生まれ、Shinozuka⁷⁾ は、原点から距離 β にある破壊曲面上の点 x^* は、最も破壊しそうな点であることを示し、これを設計点と呼んだ。このとき、破壊確率 P_F は次のように表されることが分かっている⁶⁾。

$$P_F = \Phi(-\beta) \quad (10)$$

ここに、 $\Phi(\cdot)$ は標準正規分布の累積分布関数である。この信頼性指標 β は安全性(信頼性)を評価する物差しとして広く用いられている。

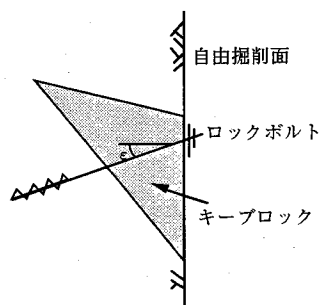
次に、二面すべりの破壊確率を算出する。手順は一面すべりと全く同じであるが、二面すべりの場合の安全率 F は次式で表される⁸⁾。

$$F = \frac{\cos\theta_a + \cos\theta_b}{1 + \cos\theta_{na, nb}} \times \frac{\tan\phi}{\sin\theta} = k \times \frac{\tan\phi}{\sin\theta} \quad (11)$$

ここで、 ϕ は摩擦角、 θ はすべり交線の傾斜角、

θ_a, θ_b はすべり面 a, b の傾斜角を、また $\theta_{na, nb}$ はすべり面 a, b の法線ベクトル間の角度を意味している。したがって、二面すべりの性能関数を次のように設定する。

$$g(X) = k \tan\phi - \sin\theta = 0 \quad (12)$$



図一六 補強工を施工した岩盤斜面(断面)

ここでの確率変数は θ, ϕ であり、 k は定数として扱う。その理由として k のばらつきを乱数発生させて標準偏差を調べると θ に比べて小さい値であることが分かっているためである。

以後の解析手順は一面すべりと同様に行い、最終的に破壊確率 P_F が算出される。

6. 設計値の算出と支保力の算定

前節では、与えられた条件下での破壊確率を算出したが、実際問題解決のためには破壊確率低減のための設計値を算出する必要がある。二次モーメント信頼性解析では、設計値を平均値に設計係数を乗ずる形で導入する。

$$x^* = \gamma_0 \mu_x \quad (13)$$

ここに、 x^* は設計値、 μ_x は平均値、 γ_0 は設計係数である。この関係は、平均値の値にかかわらず、変動係数がほぼ一定であり、ばらつきのあるパラメータに対して有効である。

ここで、設計係数を計算するに当たり、どのレベルの破壊基準の確率値を目標とするか考える。Meyerhof⁹⁾ やその他の研究者によると、目安として 1/100 から 1/1000 の範囲が用いられているので、本研究においてもその値を設定する。これは、一般の土木構造物の破壊確率が 10^{-4} から 10^{-6} のオーダーの値といわれているのに対して、大きい値となっている。

また目標とした破壊確率を得るために信頼性指標 β の値は以下ようになる。

$$\text{破壊確率 } 1/100 \text{ に対して } \beta = 2.3$$

$$\text{破壊確率 } 1/1000 \text{ に対して } \beta = 3.0$$

この信頼性指標を得るために設計係数は摩擦角の平均値に対して設定する。まず、摩擦角の平均値に乘じた設計係数を変数として性能関数に組み込むと、式(8)は次のように定義される。

$$\phi^* = x^* = \frac{X_\phi - \gamma_0 \bar{X}_\phi}{\sigma_\phi} \quad (14)$$

よって式(14)から設計値が決定する。そして設定し

た破壊確率を得るために、図-6のようなロックボルトによる補強工を考える。ロックボルトは水平面から傾斜角 ε で施工すると仮定し、ロックボルトの張力を A (kN)、ブロックの重量を W (kN) とすると、ロックボルトの張力 A は次の式で表される。

$$A = W(\tan\theta - \tan\phi^*)\xi \quad (15)$$

$$\xi = \cos\theta / [\cos(\theta + \varepsilon) + \sin(\theta + \varepsilon)\tan\phi^*] \quad (16)$$

A : ロックボルトの張力 (kN)

W : ブロックの重量 (kN)

θ : すべり面 (線) の傾斜角

ϕ^* : 摩擦角の設計値

ε : ロックボルトの水平面からの傾斜角

したがって、ブロックの重量がわかれば支保力が計算される。しかし、支保力算出のための設計値は式 (13) と異なり、次の式で表される。

$$\phi^* = \mu_0 / \gamma_0 \quad (17)$$

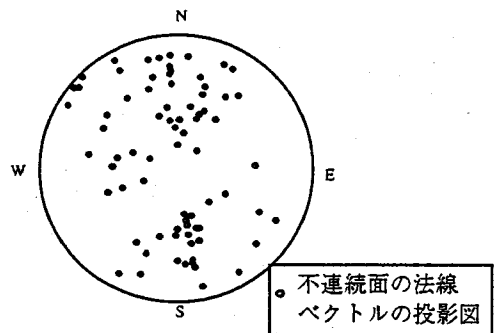
これは、目標とする破壊確率を得るには応力パラメータとして摩擦角の平均値に設計係数を乗じて、設計値を増加させる必要があるが、逆に、支保力算出の場合のように、強度パラメータとして摩擦角の平均値を扱う場合には、設計係数で除して設計値を低減させる必要があるためである¹⁰⁾。したがって式 (17) で求められた設計値と実際のすべり面の摩擦角の差を支保力で補強することにより、破壊確率を1/100あるいは1/1000まで低くすることが可能になる。実際の解析では力学的破壊確率が高いと予想されるブロックについてのみ、設計係数を算出し、支保力を考慮する。

7. 解析例

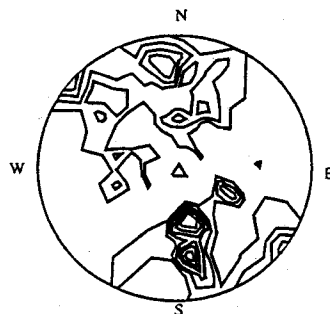
これまで述べた手順に従い、実際のジョイントデータを用いてキーブロック安定解析を行う。今回解析に用いたデータは実際の斜面のジョイントデータで、現場は東南面を向いた鉱山斜面であり、平成3年に崩壊が発生している。

解析に使用した斜面におけるジョイントの傾斜方位と傾斜データ数は83個で、それらをクラスター分割をする。図-7 (a), (b), (c) は斜面のジョイントデータのステレオ投影図である。クラスター分割の結果、5つのクラスターが得られた。平均方位は各クラスターの平均値 (確定値) であり、標準偏差は式 (1) から計算される。解析にあたり掘削面のデータは実際の崩壊斜面と同じ値を採用し、傾斜方位を45°、傾斜角を90°で設定している。クラスター毎の傾斜方位、傾斜、頻度、方位分散係数、標準偏差の計算結果を表-1に示す。

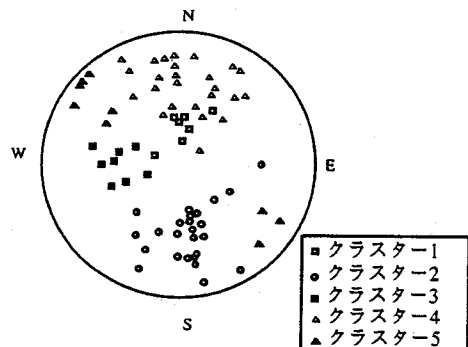
次に、得られた5つのクラスターから任意の3つのクラスターを選択し、さらに掘削面を加えた4面体で安定



(a) すべてのジョイントデータのステレオ投影図



(b) コンター図



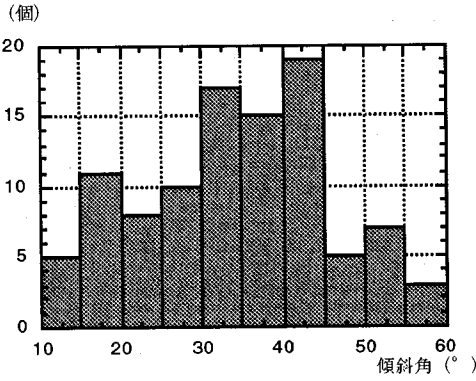
(c) クラスター分割後のステレオ投影図

図-7 ジョイントデータのステレオ投影図

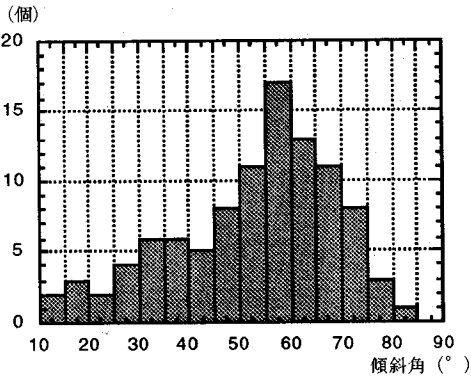
表-1 崩壊斜面のジョイントデータ

クラスター番号	1	2	3	4	5	掘削面
傾斜方位 (°)	0	170	270	10	330	45
傾斜角 (°)	35	59	50	67	88	90
頻度 λ (本/m)	0.07	0.31	0.07	0.28	0.10	-
方位分散係数 K	20	11	22	10	28	-
標準偏差 Ω (°)	17	25	16	26	14	-

性指標を算出する。しかし、図-7のステレオ投影図からも分かるように各クラスターは平均値を中心にそれぞれ



(a) クラスタ-1で100回乱数を発生させた場合 (平均傾斜角 35°)



(b) クラスタ-2で100回乱数を発生させた場合 (平均傾斜角 59°)

図-8 Fisher分布に従って100回乱数を発生させた場合

ればらついているため、各平均値のみで4面体を構成して安定性指標を算出すると、クラスター毎のばらつきを考慮することが出来ない。そこで、今回の解析では、クラスター毎のばらつきを考慮するために、各クラスターの確定値(平均値)を中心とし、式(1)で得られた標準偏差の値を用いて乱数を発生させることにより、ジョイントの3次元的なばらつきを考慮する方法を用いた。本解析では、乱数発生の際にジョイントの分布を特徴づける確率分布として、その取り扱いの容易さからFisher分布を適用した。Fisher分布を表す確率密度関数は、球中心から球面上の点に向かう単位ベクトルを x_i 、分布の中心方向となす角を α とすると、以下のように表される。

$$f(x_i) = \frac{K}{4\pi \sinh K} \exp(K \cos \alpha) \quad (18)$$

ここで、 K は分布の集中性を支配するパラメータである方位分散係数で、式(2)で定義される。その値が大きくなるほど散らばりの小さい集中した分布形となる。方位分散係数は表-1で既に計算されているため、その値を使用することによって、各クラスター毎に乱数

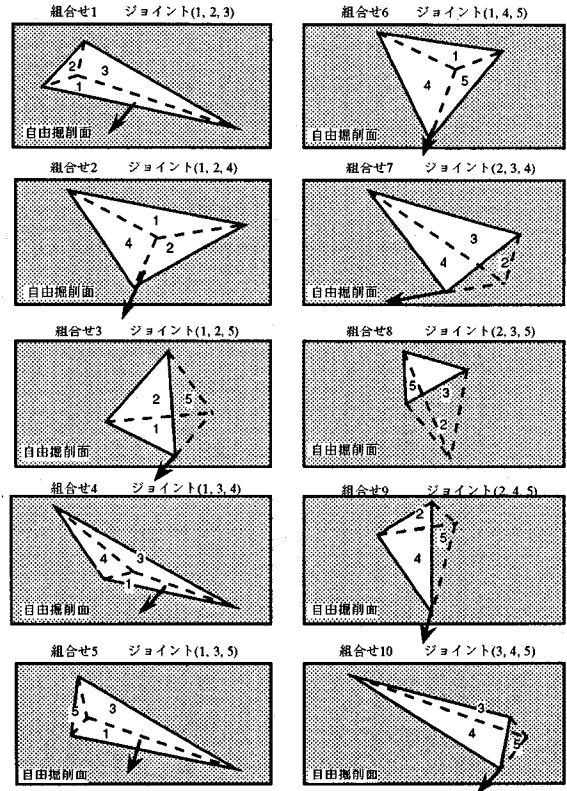


図-9 自由掘削面(東南面)に現われるブロックの見取り図

を発生させることができる。

次に式(18)に従い、クラスター毎に乱数を発生させる。Fisher分布にしたがって100個の乱数を発生させた結果を図-8に示す。図-8(a)では、クラスター1の乱数を表しており、図-8(b)では、クラスター2の乱数を表示している。クラスター1のばらつきが10°から60°までで比較的小さい範囲に対して、クラスター2のばらつきは10°から85°と広範囲にわたっている。これは、ばらつきを示す標準偏差がそれぞれ17、25とクラスター2の方が値が大きいため、乱数結果は妥当であるといえる。また5つの確定値からは10個のジョイント組合せが得られるが、それぞれの組合せにより自由掘削面東南面(傾斜方位45°)に現われるブロックの見取り図を図-9に示す。図-9では東南面に現われるブロックのすべり面(すべり線)やブロックの形状を理解することができる。

ジョイント頻度による安定性指標P(JC)とブロックの幾何学的な安定性指標P(k)の計算結果と2つの安定性指標を掛け合わせて得られる安定性指標P(B)の計算結果もあわせて図-10に示す。安定性指標の解析結果より、危険なジョイント組合せは、組合せ7(2,3,4)が最も危険であり、次いで組合せ10(3,4,5)が危

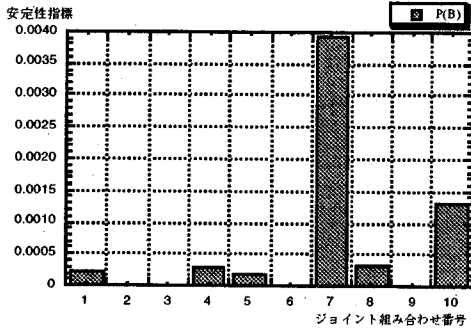
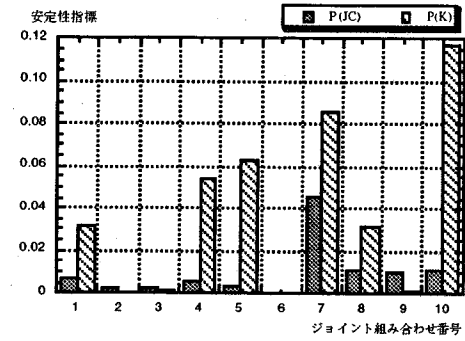
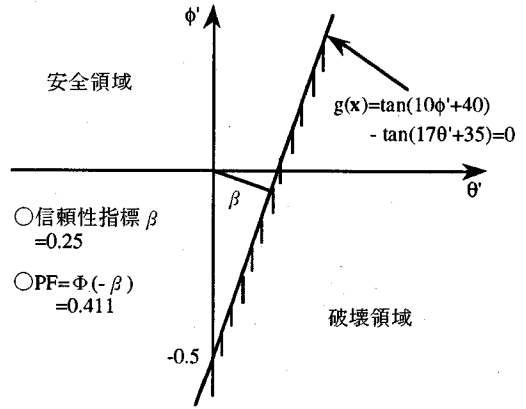
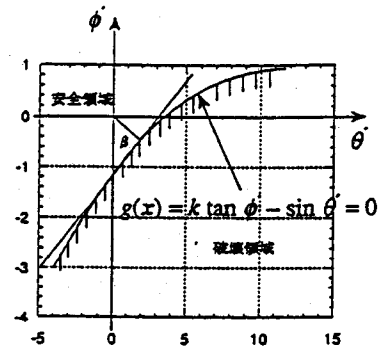


図-10 各ブロックの安定性指標

険であることが分かる。安定性指標から危険度の高いブロックが検出できたので、次に力学的破壊確率から危険ブロックを検出する。実際の崩壊斜面からのデータを基にした本解析では摩擦角の平均値を40°、標準偏差を10°と設定して破壊確率の算出を行った。一次近似二次モーメント法を用いて一面すべりと二面すべりの両方について破壊確率を算出する。一面すべりでクラスター1がすべり面の場合の基準化した領域における破壊領域を例として図-11 (a) に示す。信頼性指標が0.25であることから、破壊確率は0.411であった。また2面すべりの基準化した領域における破壊領域を図-11 (b) に示し、各ジョイント面での一面すべりと交差するジョイント線での二面すべりの破壊確率の計算結果を図-12に棒グラフとして示す。信頼性指標から危険度が高いと判断されたブロックのすべり面(すべり線)は組合せ7のブロックがすべり面2, 4ですべる二面すべり、組合せ10のブロックがすべり面4, 5ですべる二面すべりである。また、確率論的解析による破壊確率は図-12より組合せ7のブロックが0.011、組合せ10のブロックが0.916で組合せ10のブロックが危険であることが分かる。したがって、組合せ10は両方の観点から危険であることが分かり、補強工の必要なブロックであると判断できる。また、図-9, 10から、一面すべりの危険性はほとんどないといえる。というのは、図-9に示したようにジョイントと自由掘削面との関係から、一面すべ



(a) クラスター1がすべり面の場合の破壊領域



(b) 2面すべりの破壊領域の例

図-11 基準化した領域での破壊領域と安全領域

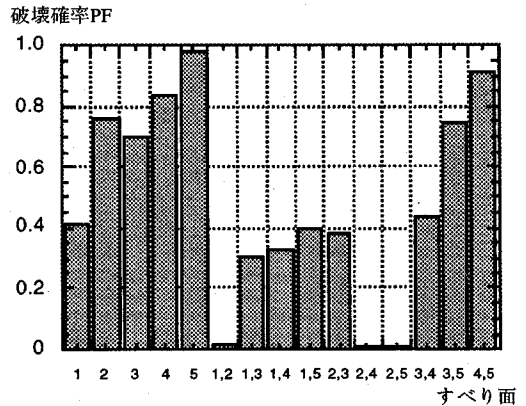


図-12 すべり面(線)ごとの破壊確率

りは組み合わせ番号が1, 4, 5だけで、いずれもジョイント面1に沿うすべりであり、図-10からその組み合わせでの危険性は低いことが分かる。

破壊確率を1/100, 1/1000にまで低減させるための支保力を算出する。すべてのジョイント組合せについて計算するのはここでは省略し、1つの例で計算することに

して、すべり面1で一面すべりをおこす任意のブロックの支保力を算定する。クラスター1の確定値の傾斜角が35°、破壊確率1/100のときの設計係数は2.0、破壊確率1/1000のときの設計係数は2.35であることはすでに計算されている。また支保工のロックボルトの傾斜角を10°に設定すると、支保力は次のように計算される。

・破壊確率1/100のとき

摩擦角の設計値は次のように計算される。

$$\phi^* = 40^\circ / 2.0 = 20^\circ, \xi = 0.8192 / 1.364 = 0.601$$

したがって、支保力 A (kN) は次のように計算される。

$$\begin{aligned} A &= W(\tan\theta - \tan\phi^*)\xi \\ &= W(\tan 35^\circ - \tan 20^\circ) \cdot 0.601 \\ &= 0.202W \text{ (kN)} \end{aligned}$$

・破壊確率1/1000のとき

設計値は同様にして次のように計算される。

$$\phi^* = 40^\circ / 2.35 = 17.0^\circ, \xi = 0.8192 / 1.306 = 0.627$$

したがって、支保力 A は次のように計算される。

$$A = 0.247W \text{ (kN)}$$

よってブロックの重量 W が分かれば、支保力が計算される。

8. 結 論

実際に崩壊したブロックのすべり面の傾斜角が約50°であり、今回の解析の結果からジョイント組合せ10(3, 4, 5)のすべり交線の平均傾斜角が58°と近い値が得られている。また組合せ10は危険と予測されるブロックであるため、解析結果が妥当であると考えられる。またすべりモードはジョイント4, 5の二面すべりであり、破壊確率の値が0.916と非常に高いことから、この斜面において崩壊の可能性が高いことが示されている。

本研究では力学的破壊確率を前の2つの指標と分けて別々に算出する評価法にすることによって、より細かい解析が可能になった。つまり、安定性指標から危険であると判断されるブロックと破壊確率から危険であると判断されるブロックを別々に検出することで、ブロックの危険度を別の観点から判断できるからである。

最後に、確率論的解析による破壊確率の算出方法については、従来の半確率論的解析では考慮されなかった地盤の物性値のばらつきを、パラメータ毎に確率分布関数で表示することにより解析に取り入れることが出来た。また、信頼性理論に基づく一次近似二次モーメント法により、安全基準に最も影響を与えるパラメータを決定し、

簡単に破壊確率が計算されることも示した。また、ある一定の破壊確率を与える設計係数や支保力の算定などの試みも行った。これらの研究によって、破壊確率を小さくするだけでなく、岩盤斜面の効率的な補強による施工費用の軽減にも役立つ可能性がある。

しかし、これらの設計係数や性能関数は特定の破壊モード(平面すべりやくさびすべり)にのみ有効である。このように安全性の考えに基づいた確率手法を適用するには破壊モードを前もって決定しなければならないという問題点も残されている。また、本研究では粘着力や水圧といったパラメータについては考慮していないので、そういうパラメータも含んだ信頼性解析を進める必要がある。さらに、二面すべりなど複数のジョイントが関係する場合、ジョイントごとの摩擦角を考慮した解析を行うと、より信頼性の高い結果が得られるであろう。

参考文献

- 1) Hatzor, Y. and Goodman, R. E. : Determination of the 'Design Block' for Tunnel Supports in Highly Jointed Rock, Fractured and Jointed Rock Masses, *Comprehensive Rock Engineering*, Vol.2, pp.263-292, 1993.
- 2) Goodman, R. E. (赤井浩一・川本眺万・大西有三共訳) : 不連続性岩盤の地質工学, 森北出版株式会社, 1978.
- 3) Mauldon, M. : Probability Aspects of the Removability of Tetrahedral Blocks, Technical Note. *Int. J. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 16, pp.339-362, 1979.
- 4) 大友敬三, 伊藤洋, 新孝一: 地盤工学における信頼性設計に関する研究の現状と今後の課題, 電力中央研究所, 1984.
- 5) Cornell, C. A. : Structural Safety Specification Based on Second-Moment Reliability Analysis, Final Report, Symp on Concepts of Safety of Structures and Methods of Design, Zurich, IABSE, London, 1969.
- 6) 鈴木誠: 地盤物性値の空間分布特性の確率論的記述と地盤工学における信頼性設計の基礎的研究, 名工大博士論文, pp.49-58, 1990.
- 7) Shinozuka, M. : Basic Analysis of Structural Safety, *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol.109, pp.721-740, 1983.
- 8) Hock, E. and Bray, J. W. (小野寺 透・吉中龍之進共訳) : 岩盤斜面工学, 朝倉書店, 1976.
- 9) Meyerhof, G. G. : Limit State Design in Geotechnical Engineering, *Structural Safety* 1 (1), pp.67-71, 1982.
- 10) Genske, D. D. and Walz, B. : Probabilistic Assessment of The Stability of Rock Slopes, *Structural Safety*, 1991. (1995. 8. 29 受付)

THE STABILITY ANALYSIS OF KEY BLOCK AT EXCAVATION SURFACE WITH PROBABILISTIC APPROACH

Yuzo OHNISHI and Hiroyuki NISHIYAMA

In discontinuous rock mass whose behavior is mainly controlled by joints, it is the most important concern for us to find potentially unstable rock blocks. The block theory can determine a number of unstable blocks in the rock system, if the mechanical properties of joints are known. However, the strength parameters of rock joints are very often dispersive. In this paper, an attempt is made to analyze the stability of tetrahedral block by probabilistic approach. Application of performance function to a plane sliding failure mode and a wedge sliding failure mode was discussed by using the first order second moment method. It was also discussed how we can reduce the probability of failure within a certain range for the critical block by using a support system.