

# 不連続面位置とくさび効果を考慮した 岩盤斜面の安定性評価手法

鷲見武富<sup>1</sup>・八嶋厚<sup>2</sup>

<sup>1</sup>日本地質コンサルタント株式会社 (〒501-3133 岐阜市芥見南山2-4-26)

<sup>2</sup>正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

不連続性岩盤斜面の安定解析において、多大な労力を要する3次元解析を一般化するためには、解析作業の省力化が課題となる。その手法の1つに、多くのブロックの中から3次元安定解析を必要とするブロックを抽出する安定性評価手法がある。本論文では、岩盤すべり条件の定式化を行い、くさび効果と不連続面位置を考慮した岩盤斜面の簡易な安定性評価手法を提案する。また、提案した手法による安定性評価結果と従来のステレオ解析による安定性評価結果を比較し、提案した安定性評価手法が危険ブロックの絞り込みに有効であることを提示する。

*Key Words : discontinuous plane, wedge-type rock failure, sliding frictional angle, stability analysis*

## 1. はじめに

大部分の岩盤は、節理や層理などの岩盤不連続面(以後、単に不連続面と記す)によって分断されている。このため、岩盤崩壊は不連続面に規制された岩盤すべりの形態を取ることが多く、岩盤斜面の安定性評価において不連続面の幾何特性や力学特性を解析にいかに取り込むかが問題となる。

### (1) 不連続性岩盤斜面の安定性評価手法

不連続性岩盤斜面の安定性評価手法には、数値解析法と極限平衡解析法がある。このうち数値解析法には、不連続面をジョイント要素<sup>1),2)</sup>で表現する有限要素法(FEM)や、不連続面で区切られた個々の岩塊を剛体ブロックで表現する個別要素法(DEM)<sup>3)</sup>などがある。これらの手法は、岩盤の変形や応力変化を微小時間ごとに追跡することができるが、多くの入力パラメータを必要とし、計算量も膨大になる。したがって、原子力発電所や重要幹線道路に沿う長大斜面などの安定解析を除いて実施されることは少ない。

一方、極限平衡解析は、岩盤ブロックを剛体として力のつりあいのみで安定性を検討する解析法であり、数値解析に比べて入力パラメータが少なく、計算量も少ない。また、この解析法は震度法による地震時の安

定性や地下水の影響も評価でき、岩盤斜面の安定解析に頻繁に用いられている。

3次元の極限平衡解析としては、Hoek and Bray<sup>4)</sup>による方法が有名である。ただし、この方法は、解析対象となる岩盤斜面を2つの平面(upper slope と face slope)からなる簡単なモデル斜面に置き換える必要があり、適用できる斜面が限定されている。そこで、形状の複雑な斜面に対しては、個々の岩盤ブロックの形状や大きさを作図により求め、各ブロックに作用する力のつりあいをベクトル計算により検討する方法<sup>5)</sup>などが用いられている。しかし、岩盤内に多数の不連続面が交錯する場合には、それらが形成するくさび型ブロックは膨大な数となり、全てのブロックについて詳細な3次元安定解析を行うことは困難である。このため、特に重要な斜面を除いて3次元解析が実施されることは少なく、一般斜面では2次元解析により斜面安定工などの設計が行なわれているのが現状である。その結果、岩盤掘削に伴い予期せぬ岩盤すべりが発生したり、逆に崩壊抑止工が過大となっている例が少なからず見られる。

一般斜面において3次元安定解析が行われることが少ない主な理由は、2次元での安定解析に比べて多大な労力を要することにある。したがって、不連続面の3次元分布を考慮し、実斜面に即した斜面安定工の設

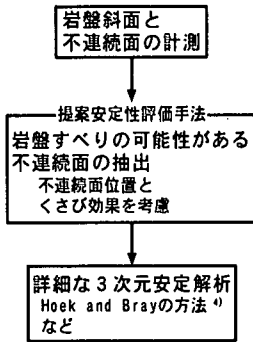


図-1 3次元安定解析フローにおける提案安定性評価手法の位置付け

計を一般化するためには、3次元安定解析の省力化が重要となる。

## (2) 不連続性岩盤斜面における3次元安定解析の省力化手法

3次元安定解析の省力化には二つの方法が考えられる。1つは、3次元安定解析そのものの簡便化である。この方法には、太田ほか<sup>9)</sup>の直方体要素を用いた安定解析法などがあるが、ステレオ投影やベクトル計算などを用いて解析パラメータを3次元座標から2次元座標に変換し、3次元空間と等価な2次元断面において安定解析を行う手法の開発も有効と考えられる。

他方は、岩盤内の全てのブロックについて3次元安定解析を行うのではなく、詳細な解析を必要とするブロックを絞り込み、可能な限り少ないブロックについて3次元安定解析を行う方法である。詳細な解析を必要とするブロックの抽出には、多田<sup>7)</sup>やグッドマン<sup>8)</sup>のステレオ解析法やグッドマンとシー<sup>9)</sup>のブロック理論を用いた方法がある。

不連続性岩盤斜面のステレオ解析法は、岩盤斜面の方向と不連続面の方向およびすべり摩擦角の関係をステレオネット上で検討し、不連続面に沿って岩盤すべりが発生する可能性を簡易に評価するものである。この方法は、不連続面と岩盤斜面の傾斜方向と傾斜角の関係が3次元イメージとして直感的に理解でき、個々の不連続面についての安定性を評価するのに優れている。しかし、ステレオネット上では平面の位置を表現することができず、岩盤斜面と不連続面の位置関係については別途に検討を要する。さらに、くさび型すべりに対しては、2つの不連続面の挟み角がすべり摩擦角に及ぼす影響(くさび効果)も別途に検討しなければならない。

一方、ブロック理論は、不連続面で囲まれた岩盤ブ

ロックの集合体の中から、トポロジーの概念を用いて移動可能なブロックを抽出する方法である。ただし、この手法が効果的なのは規則的な不連続面群(節理系)が分布する岩盤に対してであり、不規則な不連続面については個々に検討しなければならない。また、岩盤斜面と不連続面の位置関係や、くさび効果を考慮したすべり摩擦角の影響についても、別途に検討を要する。

以上のように、従来のステレオ解析法やブロック理論では、岩盤斜面と不連続面の位置関係やくさび効果が考慮されておらず、岩盤すべりに対して安定なブロックであっても不安定と評価される場合が多い。本論文では、こうした欠点を改善するため、不連続面位置とくさび効果を考慮した岩盤斜面の安定性評価手法を提案する。この手法は、特に、交錯する不連続面群によって形成される全てのくさび型ブロックの中から岩盤すべりの可能性のあるブロックを抽出するのに適しており、詳細な3次元安定解析を必要とするブロックの選定に有効である(図-1)。

なお、岩盤すべりには一面すべりとくさび型すべりがあるが、前者は後者の特殊な場合、すなわち幾何特性や力学特性が全く同じ2つの面によって形成されたくさび型すべりとして捉えることができる。このため、ここではくさび型すべりについてのみ検討する。

## 2. 不連続面位置とくさび効果を考慮した安定性評価手法

### (1) 岩盤すべり条件

岩盤の静的なすべり破壊を考えた場合、くさび型すべりが発生するか否かは、2つの不連続面の交差線(以後、単に交差線と記す)と岩盤斜面の幾何的關係および、くさび型ブロックに作用する外力とすべり抵抗力の關係に支配される。つまり、くさび型ブロックが次の4つの条件を同時に満足するときくさび型すべりが発生し、それ以外ではすべりは発生しない。

条件1: 交差線が斜面と直交方向あるいは反対方向へ傾斜しない。

条件2: 交差線の傾斜角が、交差線を含む鉛直断面における斜面の見掛けの傾斜角より小さい。

条件3: 交差線が斜面と交わる。

条件4: 外力の交差線方向成分がすべり抵抗力より大きい。

条件1と条件2は、交差線が岩盤斜面に対していわゆる流れ盤構造を形成するための幾何条件である。また条件3は、岩盤斜面と不連続面の位置に関わるもので、くさび型ブロックのすべり方向に自由面(岩盤斜面)が存在することを表している。前述のステレオ解

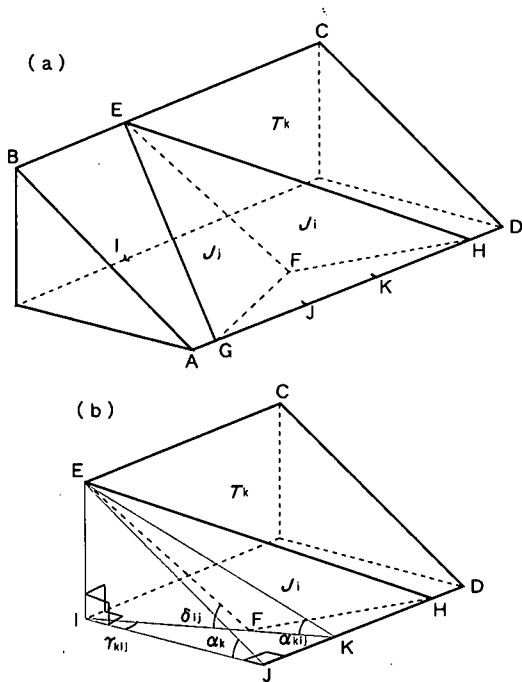


図-2 岩盤斜面と不連続面の幾何的關係  
 平面ABCD: 岩盤斜面の三角形要素  $T_k$  の一部  
 平面JECD: 岩盤斜面の三角形要素  $T_k$  の一部  
 平面EFH: 不連続面  $J_i$  の一部  
 平面EFG: 不連続面  $J_j$  の一部  
 直線EF: 交差線  $I_{ij}$  の一部

析やブロック理論では、不安定ブロックの抽出に条件1と条件2および条件4の一部が用いられている。一方、Hoek and Bray<sup>4)</sup>などの3次元安定解析では、解析対象とするくさび型ブロックについて、上記4条件の全てを照査している。ここで提案する安定性評価手法でも、これら4つの条件を用いる。ただし、条件4の検討に際して幾つかの仮定を設けることにより、くさび型ブロックに作用する力のつりあい条件を不連続面の幾何条件とすべり摩擦角との関係に帰着させている。このため、くさび型ブロックの形状や大きさが不明な場合でも、すべりに対する安定性の評価が可能となる。

## (2) 岩盤すべり条件の定式化

ここでは、多数の不連続面データのコンピュータ処理を視野に入れ、岩盤すべり条件の定式化を行う。

なお、地質学分野では一般に不連続面方向の表示に走向・傾斜を用いているが、本研究では数学的便宜から傾斜ベクトルによる表記法を採用した。傾斜ベクトルとは、不連続面の最急傾斜方向の単位ベクトルを表し、傾斜方位(北から時計回り方向の角度)と傾斜角(伏角)で表記される。交差線の傾斜方向も、傾斜ベクトルを用いて同様に表記する。不連続面は、この傾斜

ベクトルと不連続面上の任意の1点の3次元直交座標によって決定される。また、岩盤斜面(自由面)は、便宜上、三角形メッシュモデルで表すものとし、各三角形要素はそれぞれ3つの頂点の3次元直交座標で決定する。なお、この三角形要素は、岩盤斜面と交差線の幾何的關係を調べるために設定するものであり、くさび型ブロックに作用する外力とすべり抵抗力の關係には関与しない。このため、三角形メッシュモデルが岩盤斜面の複雑な形状を忠実に再現している必要はなく、岩盤斜面の大まかな輪郭と傾斜方向が表現されていれば良い。

### a) 岩盤すべり条件1の定式化

図-2(a)は、くさび型不連続面と岩盤斜面の幾何的關係を示した図であり、(b)はその中からくさび型不連続面の交差線と岩盤斜面の關係を抜き出して示したものである。これらの図で、平面ABCDと平面JECDは岩盤斜面の三角形要素  $T_k$  の一部を表し、 $\angle EJI$ は岩盤斜面の傾斜角  $\alpha_k$  を表す。また、平面EFHは不連続面  $J_i$  を、平面EFGは不連続面  $J_j$  を表す。直線EFは不連続面  $J_i$  と  $J_j$  が形成する交差線  $I_{ij}$  を表し、 $\angle EFI$ はその傾斜角  $\delta_{ij}$  を表す。岩盤斜面の傾斜方位と交差線  $I_{ij}$  の傾斜方位のなす角  $\angle JIK$  を  $\gamma_{kij}$  とし、直線EFを含む鉛直断面内での岩盤斜面の見掛けの傾斜角  $\angle EKI$  を  $\alpha_{kij}$  としたとき、岩盤すべりが発生するための条件1は次式で表される。

$$\gamma_{kij} < \pi/2 \quad (1)$$

### b) 岩盤すべり条件2の定式化

岩盤すべり条件2は、図-2の記号を用いると

$$\delta_{ij} < \alpha_{kij} \quad (2)$$

で表される。ここで、

$$\tan \alpha_{kij} = \frac{IE}{IK}, \quad \tan \alpha_k = \frac{IE}{IJ}, \quad \cos \gamma_{kij} = \frac{IJ}{IK} \quad (3)$$

であるので、式(2)は次式のように書き換えられる。

$$\delta_{ij} < \tan^{-1}(\tan \alpha_k \cdot \cos \gamma_{kij}) \quad (4)$$

### c) 岩盤すべり条件3の定式化

岩盤斜面の三角形要素  $T_k$  の頂点の位置ベクトルを  $a_k, b_k, c_k$  とし、 $T_k$  を含む平面と交差線  $I_{ij}$  の交点の位置ベクトルを  $d_{kij}$  とする(図-3)。このとき、 $I_{ij}$  が  $T_k$  内を通過する条件は次式で表される。

$$d_{kij} = a_k + m(b_k - a_k) + n(c_k - b_k) \quad 0 \leq m \leq n \leq 1 \quad (5)$$

$a_k, b_k, c_k, d_{kij}$  の座標をそれぞれ  $(X_{ki}, Y_{ki}, Z_{ki}), (X_{k2}, Y_{k2}, Z_{k2}), (X_{k3}, Y_{k3}, Z_{k3}), (X_{kij}, Y_{kij}, Z_{kij})$  とし、式(5)を成分表示すると

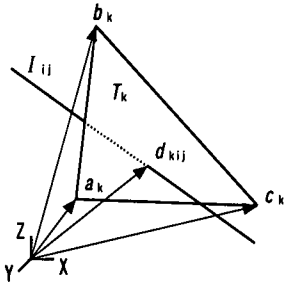


図-3 三角形要素と交差線の関係

$$\begin{cases} X_{ij} = X_{i1} + m(X_{i2} - X_{i1}) + n(X_{i3} - X_{i1}) \\ Y_{ij} = Y_{i1} + m(Y_{i2} - Y_{i1}) + n(Y_{i3} - Y_{i1}) \\ Z_{ij} = Z_{i1} + m(Z_{i2} - Z_{i1}) + n(Z_{i3} - Z_{i1}) \end{cases} \quad (6)$$

$0 \leq m \leq n \leq 1$

となる。したがって、交差線が岩盤斜面内を通過するためには、少なくとも1つの三角形要素に対して式(6)が成立しなければならない。

#### ④ 岩盤すべり条件4の定式化

本研究では、極限平衡解析を前提としており、岩盤すべり条件4の定式化に際して、以下の事項を仮定した。

- ① モーメントの影響は無視できる。すなわち、トッピングや回転を伴うすべりは考慮しない。
- ② 不連続面に沿う破壊基準として、モール・クーロン式 ( $\tau = c + \sigma \tan \phi$ ) を採用する。ただし、 $\tau$  は不連続面のせん断抵抗力、 $c$  は粘着力、 $\sigma$  は垂直応力、 $\phi$  はすべり摩擦角。
- ③ くさび型ブロックに作用する外力として重力のみを考え、水圧は作用しないものとする。

上記仮定の下でくさび型ブロックにとって最も危険な状態は、例えば不連続面が完全に分離して、 $c=0$  となった状態である。この状態における岩盤すべり条件4の定式化を行う。

まず、不連続面  $J_1$  と  $J_2$  の傾斜角を  $\beta_1, \beta_2$  とし、両不連続面の傾斜方位のずれ角を  $\eta_{12}$  とする。このとき、不連続面  $J_1$  と  $J_2$  がつくる交差線  $I_{12}$  の傾斜角  $\delta_{12}$  と、交差線  $I_{12}$  と不連続面  $J_1$  の傾斜方位のなす角  $\theta_1$  は次式で与えられる<sup>7)</sup>。

$$\tan \delta_{12} = \frac{\tan \beta_1 \cdot \tan \beta_2 \cdot \sin \eta_{12}}{\sqrt{\tan^2 \beta_1 + 2 \tan \beta_1 \cdot \tan \beta_2 \cdot \cos \eta_{12} + \tan^2 \beta_2}} \quad (7)$$

$$\tan \theta_1 = \pm \frac{\tan \beta_1 + \tan \beta_2 \cdot \cos \eta_{12}}{\sin \eta_{12} \cdot \tan \beta_2} \quad (8)$$

次に、交差線  $I_{12}$  に垂直な平面内での不連続面  $J_1$  の

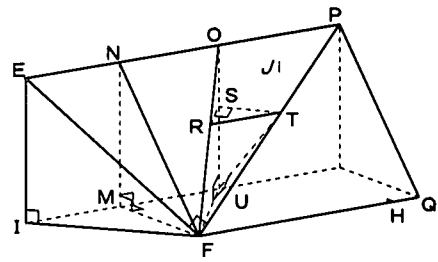


図-4 岩盤不連続面の真の傾斜角と見掛けの傾斜角の幾何学的関係

- 平面EFQP: 不連続面  $J_1$  の一部
- 直線EF: 交差線  $I_{12}$  の一部
- $\angle NFM$ :  $J_1$  の傾斜角  $\beta_1$
- $\angle EFL$ :  $I_{12}$  の傾斜角  $\delta_{12}$
- $\angle MFL$ :  $I_{12}$  の傾斜方位と  $J_1$  の傾斜方位のなす角  $\theta_1$
- $\angle UFR$ :  $J_1$  の走向と  $\theta_1$  の角度をなす鉛直断面における  $J_1$  の見掛けの傾斜角  $\rho_1$
- $\angle UFT$ :  $I_{12}$  に垂直な平面内での  $J_1$  の見掛けの傾斜角  $\omega_1$

見掛けの傾斜角  $\omega_1$  を求める。図-4は、不連続面  $J_1$  の傾斜角  $\beta_1$  と見掛けの傾斜角  $\omega_1$  の幾何学的な状態を示した図である。同図中の節点記号は図-2中の記号に対応している。平面EFQPは不連続面  $J_1$  を表し、直線EFは交差線  $I_{12}$  を表す。また、 $\angle NFM$  は傾斜角  $\beta_1$  を表し、 $\angle UFT$  は見掛けの傾斜角  $\omega_1$  を表す。さらに、 $\angle MFL$  は交差線  $I_{12}$  の傾斜方位と不連続面  $J_1$  の傾斜方位のなす角  $\theta_1$  を表す。不連続面  $J_1$  の傾斜方位と  $\pi/2 - \theta_1$  の角度をなす鉛直断面における不連続面  $J_1$  の見掛け上の傾斜角  $\angle UFR$  を  $\rho_1$  とすると、見掛けの傾斜角  $\omega_1$  は、

$$\begin{aligned} \tan \omega_1 &= \frac{UT}{FU} = \frac{UT}{US+SO} \tan \rho_1 \\ &= \frac{UT \cdot \tan \rho_1}{UT \cdot \cos \delta_{12} + SR \cdot \tan \rho_1} \\ &= \frac{UT \cdot \tan \rho_1}{UT \cdot \cos \delta_{12} + ST \cdot \tan(\pi/2 - \theta_1) \cdot \tan \rho_1} \\ &= \frac{\tan \rho_1}{\cos \delta_{12} + \sin \delta_{12} \cdot \tan(\pi/2 - \theta_1) \cdot \tan \rho_1} \quad (9) \end{aligned}$$

となる。

$$\tan \rho_1 = \cos(\pi/2 - \theta_1) \cdot \tan \beta_1 \quad (10)$$

であるので、式(9)は式(10)より

$$\tan \omega_1 = \frac{\sin \theta_1 \cdot \tan \beta_1}{\cos \delta_{12} + \sin \delta_{12} \cdot \cos \theta_1 \cdot \tan \beta_1} \quad (11)$$

となる。

ここで、局所直交座標系  $x-y-z$  におけるくさび型ブロックの力学的平衡状態を考える(図-5)。ただし、 $x$  軸は水平軸であり、 $z$  軸は交差線  $I_{12}$  と平行に設定する。

不連続面  $J_1$  に働く垂直力を  $N_1$ 、せん断抵抗力を  $R_1$

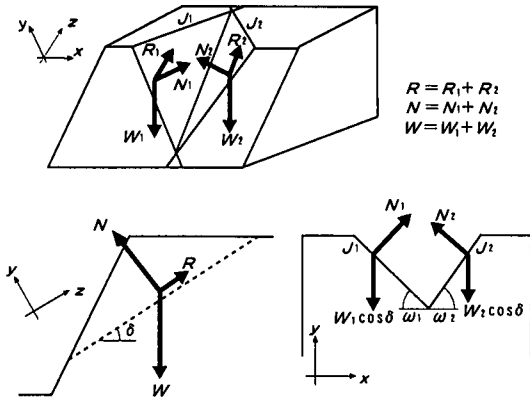


図-5 くさび型不連続面に作用する力

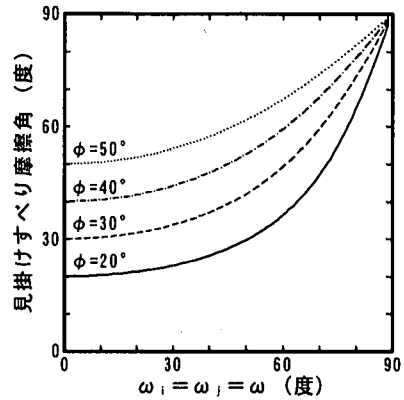


図-6 挟み角と見掛けすべり摩擦角の関係

とし、くさび型ブロックの重量を $W$ とする。さらに、力学的平衡状態にあるときの交差線の傾斜角を $\delta_{ij}^c$ とする。くさび型ブロックの移動方向すなわちせん断力の作用方向は交差線 $I_{ij}$ の方向に一致するため、 $x$ 軸、 $y$ 軸、 $z$ 軸方向の力 $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ のつりあいより、

$$\sum F_x = N_1 \cdot \sin \omega_1 - N_2 \cdot \sin \omega_2 = 0 \quad (12)$$

$$\sum F_y = -W \cdot \cos \delta_{ij}^c + N_1 \cdot \cos \omega_1 + N_2 \cdot \cos \omega_2 = 0 \quad (13)$$

$$\sum F_z = -W \cdot \sin \delta_{ij}^c + R_1 + R_2 = 0 \quad (14)$$

となる。不連続面 $J_i$ のすべり摩擦角を $\phi_i$ とすると、破壊規準は

$$R_i = N_i \tan \phi_i \quad (15)$$

で表されるので、式(14)は

$$\sum F_z = -W \cdot \sin \delta_{ij}^c + N_1 \cdot \tan \phi_1 + N_2 \cdot \tan \phi_2 = 0 \quad (16)$$

と書き換えられる。さらに、式(12)により式(13)と式(16)は、

$$W \cdot \cos \delta_{ij}^c = N_1 \left[ \cos \omega_1 + \frac{\sin \omega_1}{\sin \omega_2} \cos \omega_2 \right] \quad (17)$$

$$W \cdot \sin \delta_{ij}^c = N_1 \left[ \tan \phi_1 + \frac{\sin \omega_1}{\sin \omega_2} \tan \phi_2 \right] \quad (18)$$

と書き換えられる。ここでは、岩盤すべりを考えているので、 $0 < \delta_{ij}^c < \pi/2$ とし、式(18)の両辺を式(17)の両辺で割ると、

$$\begin{aligned} \tan \delta_{ij}^c &= \frac{\sin \omega_2 \cdot \tan \phi_1 + \sin \omega_1 \cdot \tan \phi_2}{\cos \omega_1 \cdot \sin \omega_2 + \sin \omega_1 \cdot \cos \omega_2} \\ &= \frac{\sin \omega_2 \cdot \tan \phi_1 + \sin \omega_1 \cdot \tan \phi_2}{\sin(\omega_1 + \omega_2)} \end{aligned} \quad (19)$$

が得られる。式(19)は、不連続面 $J_i$ と $J_j$ がくさび型不連続面を形成することにより、すべり摩擦角が $\phi_i$

と $\phi_j$ から見掛け上 $\delta_{ij}^c$ に変化することを表している。この効果がくさび効果であり、 $\delta_{ij}^c$ を見掛けすべり摩擦角と呼び $\phi_{ij}^*$ で表すことにする。図-6に、 $\omega_i = \omega_j = \omega$ 、 $\phi_i = \phi_j = \phi$ の場合の見掛けすべり摩擦角 $\phi_{ij}^*$ の変化を示す。

以上より、不連続面 $J_i$ と $J_j$ が造るくさび型ブロックの見掛けすべり摩擦角 $\phi_{ij}^*$ は、不連続面の傾斜角とすべり摩擦角および両不連続面の傾斜方位のずれ角から、式(7)、式(8)、式(11)と次式をもって計算される。

$$\phi_{ij}^* = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \omega_j \cdot \tan \phi_i + \sin \omega_i \cdot \tan \phi_j}{\sin(\omega_i + \omega_j)} \right) \quad (20)$$

定義から、すべり摩擦角 $\phi_{ij}^*$ が交差線の傾斜角 $\delta_{ij}$ より小さいとき、外力の交差線方向成分がすべり抵抗力より大きくなる。したがって、岩盤すべり条件4は、

$$\phi_{ij}^* < \delta_{ij} \quad (21)$$

で表される。式(21)にはくさび型ブロックの形状や大きさに関するパラメータが含まれておらず、力のつりあい条件が不連続面の幾何条件とすべり摩擦角の関係に帰着されていることが判る。

### (3) 安定性評価手法の提案

前節で定式化した岩盤すべり条件1~4は、式(22)のようにまとめられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_{kij} < \pi/2 \\ \phi_{ij}^* < \delta_{ij} < \tan^{-1}(\tan \alpha_k \cdot \cos \gamma_{kij}) \\ X_{kij} = X_{k1} + m(X_{k2} - X_{k1}) + n(X_{k3} - X_{k2}) \\ Y_{kij} = Y_{k1} + m(Y_{k2} - Y_{k1}) + n(Y_{k3} - Y_{k2}) \\ Z_{kij} = Z_{k1} + m(Z_{k2} - Z_{k1}) + n(Z_{k3} - Z_{k2}) \\ 0 \leq m \leq n \leq 1 \end{array} \right. \quad (22)$$

$\gamma_{kij}$ : 交差線 $I_{ij}$ と岩盤斜面の三角形要素 $T_k$ の傾斜方位のなす角

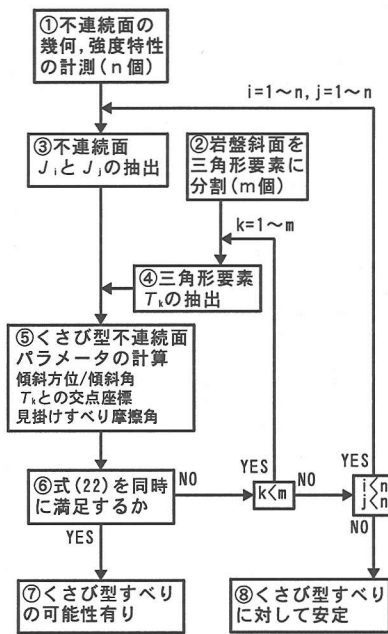


図-7 提案安定性評価手法のフロー

$\delta_{ij}$  : 交差線  $I_{ij}$  の傾斜角

$\alpha_k$  : 岩盤斜面の三角形要素  $T_k$  の傾斜角

$\phi_{ij}^a$  : くさび型不連続面の見掛けすべり摩擦角

$(X_{ki}, Y_{ki}, Z_{ki}) \sim (X_{kj}, Y_{kj}, Z_{kj})$  : 岩盤斜面の三角形要素  $T_k$  の頂点座標

$(X_{kij}, Y_{kij}, Z_{kij})$  : 三角形要素  $T_k$  を含む平面と交差線  $I_{ij}$  の交点座標

岩盤斜面  $S$  に対するくさび型不連続面の安定性評価は、式 (22) を用いて、次の手順で行う (図-7)。

- ①不連続面の幾何特性 (傾斜方位, 傾斜角, 通過座標) と強度特性 (すべり摩擦角) の計測を行う。
- ②岩盤斜面あるいは岩盤掘削面を三角形要素に分割する。
- ③不連続面  $J_i$  と  $J_j$  の組み合わせを作成する。
- ④岩盤すべりを検討する三角形要素  $T_k$  を選ぶ。
- ⑤くさび型不連続面パラメータ (交差線の傾斜ベクトル, 三角形要素との交点座標, 見掛けすべり摩擦角) を計算する。
- ⑥⑤の計算結果が式 (22) を満足するか否かを調べる。
- ⑦式 (22) が同時に満足されていれば, 不連続面  $J_i$  と  $J_j$  が形成するくさび型ブロックが三角形要素  $T_k$  内 (岩盤斜面  $S$  内) ですべり可能性がある。逆に, 式 (22) を 1 つでも満たさなければ, たとえ不連続面の粘着力が 0 になった場合でも, 三角形要素  $T_k$  内ではくさび型すべりは発生しない。これを全ての三角形要素について調べる。式 (22) を同時に満すような三角形要素が 1 つでも存在すれば,

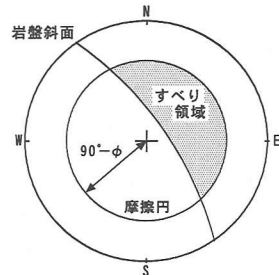


図-8 岩盤すべり条件のステレオ表示

$J_i$  と  $J_j$  が作るくさび型不連続面に沿って岩盤斜面  $S$  内ですべりが発生する可能性がある。

- ⑧不連続面の組み合わせを換えて④～⑦の手順を繰り返す。全ての不連続面について, 式 (22) を同時に満足するような組み合わせが存在しなければ, 岩盤斜面  $S$  はくさび型すべりに対して安定と評価される。

筆者らは, 式 (22) を組み込んだコンピュータプログラムを作成し, 不連続性岩盤斜面の簡易安定性評価や詳細な 3 次元安定解析 (粘着力や岩盤ブロックの形状などを考慮した 3 次元安定解析) を必要とするくさび型不連続面の抽出に用いている。

### 3. 従来の安定性評価手法との比較

本論文で提案した不連続性岩盤斜面の安定性評価手法は, ステレオ投影やブロック理論などを用いた従来の安定性評価手法に比べて, 多くの岩盤すべり条件について検討している。したがって, 条件が増えた分だけ危険ブロックの絞り込みが可能になる。ここでは, 簡単な不連続性岩盤斜面モデルにより, 従来のステレオ投影を用いた安定性評価手法と本論文で提案した安定性評価手法による評価結果を比較する。

#### (1) 岩盤すべり条件のステレオ表示

3 次元空間の方位データを 2 次元平面に投影する有効な方法にステレオ網への投影がある。ステレオ網には等角投影網と等面積投影網があり, 平面や直線の方位の相互関係を調べる時には前者を用いる。ステレオ投影の原理についてはグッドマン<sup>9)</sup>などが記述している。なお, 投影方法には視点を基本球の頂点に置いた下半球投影と, 下底に置いた上半球投影があるが, 本論文では下半球投影を用いる。

多田<sup>9)</sup>やグッドマン<sup>9)</sup>は, 外力として重力のみが作用し, せん断抵抗として摩擦力のみを考えた場合の岩盤すべりの幾何的条件を, 図-8 のようにステレオ表示し

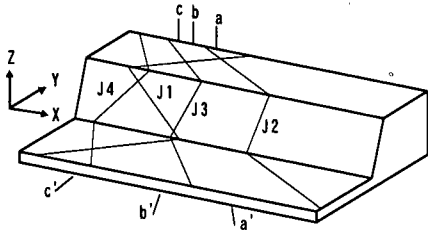


図-9 安定性評価手法の比較に用いた岩盤斜面モデル  
Y軸+方向が磁北方向

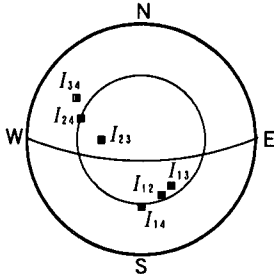


図-10 ステレオ解析結果  
大円：岩盤斜面(傾斜方位180度, 傾斜角68度)  
小円：摩擦円(すべり摩擦角30度)  
■：交差線の傾斜ベクトル

ている。図-8で大円は岩盤斜面の最急傾斜方向を表し、この大円の外側(凸側)に交差線の傾斜ベクトルが投影されるとき、岩盤すべり条件1と2を満足することになる。一方小円は、くさび型ブロックのすべり摩擦角を $\phi$ としたとき、鉛直軸のまわりに $90^\circ - \phi$ の角半径を持つ円錐を表す。この小円を摩擦円と呼び、交差線の傾斜ベクトルが摩擦円の内側に投影されれば岩盤すべり条件4を満たすことになる。したがって、大円と摩擦円に囲まれた三日月形領域は、岩盤すべり条件1と2および4を同時に満足する領域(以下、すべり領域と呼ぶ)を示している。ステレオ解析では、交差線の傾斜ベクトルのステレオ投影がこのすべり領域内に位置するブロックを、くさび型すべりの可能性のあるブロックとして抽出する。ただし、従来のステレオ解析では、岩盤ブロックのすべり摩擦角にくさび効果を考慮せず、摩擦円に不連続面本来のすべり摩擦角をそのまま用いているのが一般的である。これは、くさび効果を考慮した場合、摩擦円の作図が煩雑となりステレオ解析の簡便さが失われるためと、くさび効果を考慮しないことが斜面の安定性評価に対して安全側に働くためである。したがって、ステレオ解析により抽出された崩壊の危険性のあるブロックの中には、力学的に安定したブロックも含まれることになる。

## (2) 安定性評価結果の比較

比較には図-9と表-1に示す岩盤斜面モデルを用いた。また、不連続面のすべり摩擦角は30度とした。

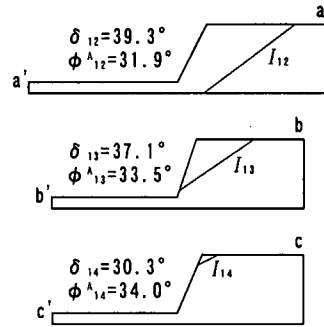


図-11 交差線と岩盤斜面の関係  
断面位置は図-10に対応  
 $\delta$ ：交差線の傾斜角  
 $\phi^1$ ：見掛けすべり摩擦角

表-1 安定性評価手法の比較に用いた不連続面データ

不連続面	傾斜方位 (度)	傾斜角 (度)	通過位置		
			X座標	Y座標	Z座標
J1	135.0	40.0	17.0	0.0	0.0
J2	225.0	60.0	16.0	0.0	0.0
J3	215.0	65.0	24.0	0.0	0.0
J4	235.0	45.0	8.0	0.0	0.0

表-2 提案安定性評価手法による評価結果

不連続面の組合せ	交差線		見掛けすべり摩擦角	岩盤すべり条件				評価
	傾斜方位	傾斜角		1	2	3	4	
J1-J2	147.5	39.3	31.9	●	●	—	●	—
J1-J3	160.8	37.1	33.5	●	●	●	●	▼
J1-J4	180.8	30.3	34.0	●	●	●	—	—
J2-J3	270.6	50.5	38.3	—	—	—	●	—
J2-J4	289.2	30.4	40.0	—	—	—	—	—
J3-J4	301.9	21.4	41.1	—	—	—	—	—

単位：度 ●：条件を満足 ▼：くさび型すべり発生

ステレオ解析による安定性評価結果を図-10に示す。岩盤斜面を表す大円と摩擦円に囲まれたすべり領域内には、交差線 $I_{12}$ と $I_{13}$ 、 $I_{14}$ の傾斜ベクトルが位置する。したがって、ステレオ解析では、これらを交差線に持つ3つのくさび型ブロックが岩盤すべりに対して危険と評価された。

一方、本論文で提案した安定性評価手法による解析結果を表-2に示す。提案した安定性評価手法では、 $I_{13}$ を交差線に持つブロックのみがくさび型すべりに対して危険と評価された。ステレオ解析で岩盤すべりに対して危険と評価された $I_{13}$ を交差線に持つブロックについては、表-2と図-11のa-a'断面に示したように交差線が斜面内に現れず、岩盤すべり条件3を満足していないことが判る。また、 $I_{14}$ を交差線に持つブロックについては、表-2と図-11のc-c'断面に示したように交差線の傾斜角が見掛けすべり摩擦角より小さく、岩盤すべり条件4を満足していないことが判る。

次に、本論文で提案した安定性評価手法による危険ブロックの絞り込みの効果について、定量的に検討す

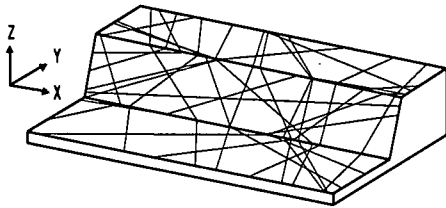


図-12 20面の不連続面を発生させた例

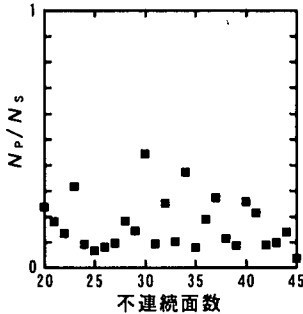


図-13 不連続面数とブロックの絞り込み効果の関係

る。検討には図-9と同じ岩盤斜面内に多数の不連続面をランダムに発生させたモデルを用いた。図-12に20面の不連続面を発生させた例を示す。なお、不連続面のすべり摩擦角は30度とした。

図-13は、発生させた不連続面の数と危険ブロックの絞り込みの効果の関係を示したものである。絞り込みの効果は、本論文で提案した安定性評価手法により抽出された危険ブロックの数 $N_f$ をステレオ投影を用いて抽出された危険ブロックの数 $N_s$ で除した値( $N_f/N_s$ )で評価した。図-13をみると、 $N_f/N_s$ の値は不連続面数と無関係に概ね0.05~0.45の間にある。これは、提案した安定性評価手法により、危険ブロックの数がステレオ投影を用いた安定性評価手法の1/2~1/20に絞り込まれたことを表している。絞り込みの効果は、不連続面の規則性やすべり摩擦角の大きさ、岩盤斜面の規模や形態によって異なるが、一般の不連続性岩盤斜面においても、同程度の絞り込み効果が期待できる。

#### 4. 提案安定性評価手法の実岩盤への適用性

本論文で提案した安定性評価手法の実岩盤への適用性を、実際にくさび型すべりが発生した岩盤斜面<sup>9)</sup>により検討する。

##### (1) 崩壊斜面の状況

岐阜県郡上郡大和町に位置する尾根型斜面において、道路改良工事に伴い岩盤斜面を掘削していたところ、掘削斜面内に様々な規模のくさび型すべりが発生した。

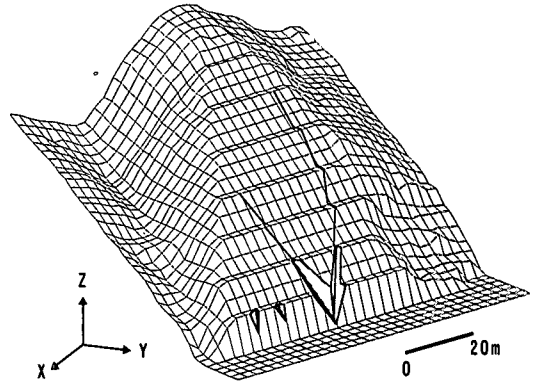


図-14 岩盤すべりが発生した岩盤斜面の鳥瞰図  
Y軸+方向が磁北方向  
ハッチ部分：くさび型崩壊箇所

表-3 不連続面の計測データ

不連続面	傾斜方位 (度)	傾斜角 (度)	通過位置		
			X座標	Y座標	Z座標
K1	335.0	67.0	23.0	24.6	269.5
K2	64.0	75.0	16.8	18.2	285.0
K3	326.0	89.0	11.6	22.5	285.0
K4	103.0	51.0	23.0	24.6	269.5
K5	358.0	77.0	35.1	11.1	278.0
K6	125.0	52.0	34.6	11.6	278.0
K7	358.0	70.0	41.6	5.6	278.0
K8	150.0	85.0	41.1	6.1	278.0
K9	104.0	50.0	27.3	17.7	278.0
K10	314.0	80.0	28.5	16.7	278.0
K11	346.0	83.0	35.5	10.8	278.0
K12	95.0	40.0	13.8	20.5	285.0
K13	355.0	75.0	13.9	28.9	278.0
K14	155.0	72.0	13.2	29.6	278.0

当該掘削斜面は、延長約50m、高さ約55mを有し、勾配1:1.0~1:0.3で6段の小段が設けられていた。地質は中生代の塊状砂岩からなり、菊地ら<sup>10)</sup>の岩級区分に従うとD級~C<sub>M</sub>級に区分された。

くさび型すべりは、掘削斜面中軸部に高さ約45m、幅約15mの大規模なものが発生し、最下段のり面と2段目のり面内の4箇所の高さ2~15m、幅1~5mの小~中規模なものが発生した(図-14)。4箇所の小~中規模なくさび型すべりは、掘削後にくさびブロックが完全に滑落した。しかし、大規模なくさび型すべりは、滑落を予見してH鋼を建て込んだコンクリート擁壁と押さえ盛土が仮設されていたため、くさびブロックの移動量は20cm程度に留まった。また、最下段と2段目のり面には、1~5m規模のくさび型を形成しながら崩壊に到らなかった不連続面が幾つか観察された。

表-3に不連続面の計測データをまとめるとともに、表-4にくさび型を形成した不連続面の組み合わせを示す。大規模なくさび型すべりは、不連続面K1とK4が造るくさび型不連続面(以下、K1-K4のように表記する)に沿って発生した。



表-4 くさび型を形成する不連続面の組合せ

くさび型すべりが発生した不連続面組合せ			くさび型すべりが発生しなかった不連続面組合せ		
K1-K2	K1-K4	K3-K4	K1-K12	K6-K11	K9-K10
K5-K6	K7-K8		K13-K14		

地下水位は、これらのくさび型不連続面より下位に位置することがボーリング調査により確認された。また、砂岩片の人工不連続面(ダイヤモンドカッターによる切断面を#150のカーボランダムにて研磨、接触面積10~32cm<sup>2</sup>、自然乾燥状態)のすべり摩擦角は、テイルト試験により23±2度の値が得られている<sup>10)</sup>。

(2)くさび型すべりの安定性評価結果

表-3の不連続面データを用い、表-4のくさび型不連続面について、掘削のり面に対する安定性評価を実施した。その結果を表-5に示す。安定性評価に際し、不連続面のすべり摩擦角には、人工不連続面のすべり摩擦角の平均値(23度)を用いた。

実際にすべりが発生したくさび型不連続面K1-K4およびK3-K4とK5-K6については、提案した安定性評価手法でも危険と評価された。これに対して、K1-K2とK7-K8は実際にくさび型すべりが発生したにもかかわらず、安定と評価された。逆に、K1-K12は危険と評価されたが、くさび型すべりは発生していなかった。

安定性評価結果と実岩盤の挙動が異なったくさび型不連続面のうち、K1-K2は岩盤すべり条件3(交差線と掘削のり面の位置条件)のみを満足していない。また、このくさび型不連続面は、最下段のり面内でK3-K4と交錯していた。これらのことから、K1-K2は掘削のり面に対しては安定していたが、K3-K4のすべりにより形成された新たな自由面に対して不安定となり、すべりが発生した可能性がある。

一方、K7-K8は岩盤すべり条件1~3を満足している。このことから、安定性評価結果と実岩盤の挙動の不一致は、岩盤すべり条件4に関わるすべり力とすべり抵抗力の関係が正しく設定されなかったことに起因したものと判断される。地下水位がすべり面より下位に位置することから外力に重力のみを考え、実際に変位が発生していることからせん断抵抗力に摩擦力のみを考えた場合、すべり力とすべり抵抗力の関係は交差線の傾斜角と不連続面のすべり摩擦角との関係に帰着する。このうち、交差線の傾斜角は不連続面の幾何データから確定的に決定されるため、不連続面のすべり摩擦角の設定に問題が残ることになる。ここで、くさび型不連続面K7-K8が岩盤すべり条件4を満足する(危険と評価される)ようなすべり摩擦角を求めると19度以下となる。この値は、設定したすべり摩擦角に比べ

表-5 提案安定性評価手法による評価結果

不連続面の組合せ	交差線		見掛けすべり摩擦角	岩盤すべり条件				評価結果	実斜面
	傾斜方位	傾斜角		1	2	3	4		
K1-K2	6.5	63.5	29.0	●	●	—	●	—	▼
K1-K4	47.7	35.1	33.3	●	●	●	●	—	▼
K1-K12	50.3	30.8	29.7	●	●	●	—	—	▼
K3-K4	55.2	39.7	38.9	●	●	●	●	—	▼
K5-K6	76.7	40.4	34.7	●	●	●	●	—	▼
K6-K11	70.7	36.8	38.9	●	●	●	—	—	—
K7-K8	65.3	46.7	52.6	●	●	●	—	—	▼
K9-K10	38.9	26.7	40.2	●	●	●	—	—	—
K13-K14	76.0	30.4	52.2	●	●	●	—	—	—

単位：度 ●：条件を満足 ▼：くさび型すべり発生

てやや小さい。

くさび型不連続面K1-K12についても、岩盤すべり条件1~3を満足している。このことから、安定性評価結果と実岩盤の挙動の不一致は、すべり力とすべり抵抗力の関係が正しく設定されなかったことに起因したものと判断される。K7-K8と同様に外力に重力のみを考え、せん断抵抗力に摩擦力のみを考えると、くさび型不連続面K1-K12が岩盤すべり条件4を満足しない(安定と評価される)ようなすべり摩擦角は24度以上となる。この値は、安定性評価に際して設定したすべり摩擦角より僅かに大きな値となる。

以上のように、提案した安定評価手法は、当該斜面で発生した主要なくさび型すべりに対して妥当な評価を与え、実岩盤に対しても有効であることが検証された。ただし、幾つかのくさび型不連続面に関しては、安定性評価結果と実岩盤の挙動が一致しなかった。その主な原因は、不連続面のすべり摩擦角の設定にあったと判断された。したがって、この手法を実岩盤に適用する場合には、不連続面のすべり摩擦角をいかに設定するかが非常に重要な問題となる。

5. 不連続性岩盤斜面の安定性評価事例

(1)自然斜面の安定性評価事例

a)斜面状況

評価対象斜面は、岐阜県吉城郡上宝村に位置する岩壁斜面で、延長約120m、最大高さ約60mを有する(図-15)。地質は中生代の花崗閃緑岩からなる。岩質は概ね新鮮堅硬であるが、数cm~数十cm間隔の直方状節理系が発達するとともに、岩盤斜面全体を横切るような大規模不連続面が多数分布し、岩盤は様々な規模のブロックに分断されている。岩盤斜面内には、くさび型すべりなど多数の岩盤崩壊跡が観察できる。

b)大規模不連続面調査

岩盤斜面の安定に直接係わる大規模不連続面の幾何特性を把握するために、ステレオ写真解析により不連

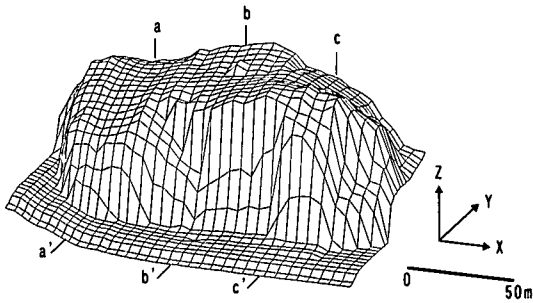


図-15 安定性評価対象斜面の鳥瞰図  
Y軸+方向が磁北方向

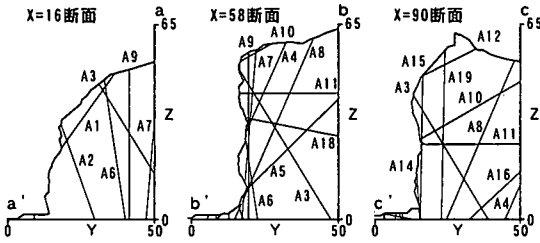


図-16 代表断面における大規模不連続面の分布状況

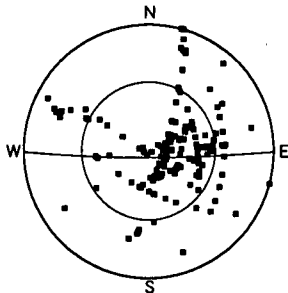


図-17 ステレオ解析結果

大円：代表的な岩盤斜面(傾斜方位180度, 傾斜角85度)  
小円：摩擦円(すべり摩擦角32度)  
■：交差線の傾斜ベクトル

統面調査を実施した。調査手順を以下に示す。

- ①岩盤斜面のステレオ写真(斜め写真)を撮影する。
- ②現地において大規模不連続面を抽出する。
- ③現地計測が可能な不連続面の最急傾斜方向をクリノメータにより計測する。
- ④ステレオ写真上で、現地抽出した不連続面を同定する。
- ⑤ステレオ写真解析により、不連続面トレースの主要点の3次元座標を三点以上計測する。
- ⑥⑤の3次元座標から、不連続面の傾斜方位と傾斜角を求める。
- ⑦③の現地計測結果を考慮して⑥の傾斜方位と傾斜角を修正し、各不連続面の傾斜方位と傾斜角を決定する。

抽出した大規模不連続面は19本であった。表-6に不連続面データをまとめるとともに、図-16に代表的断

表-6 大規模不連続面の計測データ

不連続面	傾斜方位 (度)	傾斜角 (度)	通過位置		
			X座標	Y座標	Z座標
A1	210.0	58.0	15.7	13.4	23.1
A2	15.0	71.0	16.1	13.1	30.8
A3	15.0	59.0	58.4	13.7	46.3
A4	129.0	74.0	58.5	14.9	31.8
A5	105.0	75.0	58.5	14.6	10.6
A6	22.0	82.0	40.0	19.0	40.0
A7	215.0	86.0	61.1	13.6	35.8
A8	163.0	67.0	58.5	14.6	10.6
A9	27.0	89.9	58.5	14.6	10.6
A10	125.0	44.0	64.8	12.3	47.9
A11	90.0	28.0	58.4	12.6	42.0
A12	105.0	62.0	99.1	14.8	33.6
A13	147.0	88.0	101.5	10.1	18.5
A14	348.0	86.0	90.6	9.4	14.4
A15	175.0	89.0	90.5	11.0	22.6
A16	106.0	73.0	76.2	10.5	29.5
A17	108.0	78.0	71.7	13.9	32.3
A18	80.0	48.0	76.4	12.7	14.3
A19	106.0	73.0	80.7	11.3	20.4

表-7 提案安定性評価手法による評価結果

不連続面の組合せ	交差線		見掛けすべり摩擦角
	傾斜方位	傾斜角	
A1-A8	210.2	58.0	32.1
A1-A4	193.0	56.8	35.8
A1-A5	174.6	52.5	41.2
A4-A7	138.9	73.8	35.4
A6-A18	103.8	45.5	38.8
A7-A10	128.9	43.9	33.1
A9-A10	116.9	43.7	34.6

単位：度

面における不連続面の分布状況を示す。

不連続面のすべり摩擦角は、壁面強度とJRC<sup>13)</sup>値から Barton<sup>13)</sup>のせん断強度式を用い32度と推定した。

### c)安定性評価結果

表-6の不連続面データを用い、現況斜面のくさび型すべりに対する安定性評価を本論文で提案した安定性評価手法とステレオ解析により実施した。

ステレオ解析結果を図-17に示す。岩盤斜面の代表的な最急傾斜方向を表す大円と摩擦円に囲まれたすべり領域内には45個の傾斜ベクトルが位置し、ステレオ解析ではこれらの交差線を持つくさび型不連続面が岩盤すべりに対して不安定と評価される。したがって、従来の方法では、これら45組のくさび型不連続面について、詳細な3次元安定解析が必要となる。

一方、本論文で提案した安定性評価手法により不安定と評価されたくさび型不連続面を表-7に示す。同表には交差線の傾斜方位と傾斜角、見掛けすべり摩擦角も併記した。表-7に示したように、本論文で提案した安定性評価手法では、7組のくさび型不連続面が不安定と評価された。この7組以外のくさび型不連続面は、粘着力が0になった場合でも、岩盤すべりが発生する可能性はない。したがって、不連続面の現在の粘着力

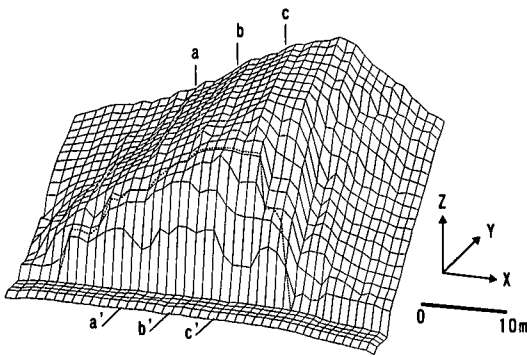


図-18 安定性評価手法対象斜面の鳥瞰図  
Y軸+方向が磁北方向  
点線：計画岩盤掘削線

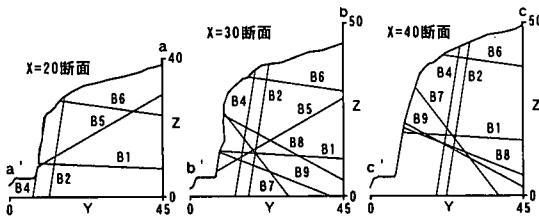


図-19 代表的断面における大規模不連続面の分布状況

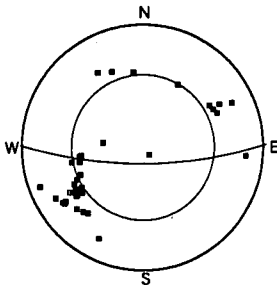


図-20 ステレオ解析結果

大円：岩盤掘削のり面(傾斜方位180度, 傾斜角73度)  
小円：摩擦円(すべり摩擦角28度)  
■：交差線の傾斜ベクトル

や有効面積, 岩盤ブロックの形状などを考慮した詳細な3次元安定解析は, 表-7の7組についてのみ実施すれば良いことになる。

以上のように, 本論文で提案した安定性評価手法を用いることにより, 解析作業が大幅に省力化できた。

## (2) 岩盤掘削面の安定性評価事例

### a) 斜面状況

評価対象斜面は, 岐阜県高山市に位置する岩壁斜面で, 延長約60m, 最大高さ約35mを有する(図-18)。地質は, 古生代のチャートからなる。岩質は概ね新鮮堅硬であるが, 厚さ数cm～十数cmで層理が発達するとともに, 岩盤斜面全体を横切るような大規模不連続面が多数分布し, 岩盤は様々な規模のブロックに分断さ

表-8 大規模不連続面の計測データ

不連続面	傾斜方位 (度)	傾斜角 (度)	通過位置		
			X座標	Y座標	Z座標
B1	277.0	28.0	40.0	8.6	14.0
B2	152.0	82.0	20.0	7.5	6.0
B3	338.0	70.0	9.6	7.2	6.0
B4	148.0	82.0	30.0	9.5	15.0
B5	168.0	30.0	30.0	9.0	9.0
B6	282.0	35.0	9.0	11.2	14.0
B7	318.0	60.0	65.2	24.2	35.0
B8	298.0	40.0	64.0	16.2	27.5
B9	22.0	30.0	62.0	10.9	18.0

表-9 提案安定性評価手法による評価結果

不連続面 の組合せ	交差線		見掛け すべり 摩擦角	岩盤すべり条件			
	傾斜方位	傾斜角		1	2	3	4
B6-B7	247.4	30.0	32.3	●	●	—	—
B6-B8	257.3	32.5	29.3	●	—	—	●

単位：度 ●：条件を満足

れている。当該斜面は, 道路改良工事に伴い岩盤掘削が計画されている。

### b) 大規模不連続面調査

現地において大規模不連続面を抽出し, クリノメータにより傾斜方位と傾斜角を計測した。抽出した大規模不連続面は9本であった。表-8に, 不連続面の計測データをまとめるとともに, 図-19に代表的断面における不連続面の分布状況を示す。

不連続面のすべり摩擦角は同種の岩石のせん断試験結果から, 28度と推定した。

### c) 安定性評価結果

表-8の不連続面データを用い, 当該岩盤斜面を現道路肩から勾配 1:0.3 (73度) で掘削した場合(図-18の点線)のくさび型すべりに対する安定性評価を行った。ステレオ投影を用いた安定性評価手法と本論文で提案した安定性評価手法による解析結果を以下に比較する。なお, 当該斜面では, ボーリング調査により解析領域内に地下水位がないことが確認されている。

ステレオ投影を用いた安定性評価結果を図-20に示す。岩盤掘削のり面を表す大円と摩擦円に囲まれたすべり領域内には2個の傾斜ベクトルが位置し, ステレオ解析ではこれらの交差線を持つくさび型不連続面が岩盤すべりに対して不安定と評価される。

一方, 本論文で提案した安定性評価手法では, 全てのくさび型不連続面が岩盤すべりに対して安定と評価された。表-9に, ステレオ解析で不安定と評価された2組のくさび型不連続面について, 本論文で提案した安定性評価手法による評価結果を示す。同表から, ステレオ解析で不安定と評価された2組のくさび型不連続面は, 岩盤すべり条件3を満足しておらず, 交差線が掘削のり面内に出現しないことが判る。

以上のように, 当該岩盤斜面では, 勾配 1:0.3で掘

削する限りにおいては、たとえ不連続面の粘着力が0であってもくさび型すべりに対して安定と判断され、詳細な3次元安定解析を省略できた。

## 6. 結 語

本論文では、詳細な3次元安定解析を必要とする岩盤ブロックの抽出を目的とし、不連続面位置とくさび効果を考慮した岩盤斜面の安定性評価手法を提案した。この手法は、従来のステレオ解析やブロック理論による手法に比べて厳しい岩盤すべり条件を用いている。したがって、条件が増えた分だけ厳密な評価が可能となり、不安定ブロックの絞り込みが期待できる。また、くさび型ブロックに作用する力のつりあい条件を不連続面の幾何条件とすべり摩擦角の関係に帰着させているため、複雑な形状の岩盤斜面に対しても適用できる。さらに、岩盤すべり条件を簡単な数式で表現しているため、コンピュータプログラムの作成が容易で、多数の不連続面データの解析に適している。

提案した安定性評価手法を簡単な不連続性岩盤斜面モデルと実際の岩盤斜面に適用した結果、従来のステレオ解析による方法に比べて危険ブロックが絞り込まれていることが確認された。ただし、提案した手法は、水圧を考慮しない条件下で、不連続面の粘着力が0になった場合のくさび型岩盤すべりに対する安定性を評価するものである。このため、岩盤斜面内に地下水が存在する場合には適用することができない。今後は、水圧も考慮した簡易な安定性評価手法を構築して行く予定である。

## 参考文献

- 1) Aydan, Ö., Ichikawa, Y. and Kawamoto, T.: Numerical modelling of discontinuities and interface in rock mass,

(1999.11.11 受付)

- 第4回計算力学シンポジウム報文集, 日本科学技術連盟, pp.254-261, 1990.
- 2) 八嶋厚, 鷺見武富, 岡二三生, 足立紀尚: 岩盤不連続面に対するひずみ軟化型弾塑性モデル, 土木学会論文集, No.596/III-43, pp.111-121, 1998.
- 3) Cundall, P.A.: A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock system, *Proc. Int. Sympo. ISRM*, Nancy, Vol.2, pp.129-136, 1971.
- 4) Hoek, E. and Bray, J.W.: *Rock Slope Engineering*, Revised 3rd edition, The Institution of Mining and Metallurgy, pp.341-351, 1981.
- 5) R.E.グッドマン: 不連続性岩盤の地質工学, 森北出版, 371p, 1976.
- 6) 太田秀樹, 大森晃治, 寺田武彦: 不連続性岩盤斜面におけるすべり岩体の特定と安定性の評価, 土木学会論文集, No.424/III-14, pp.217-225, 1990.
- 7) 多田元彦: くさび型岩盤斜面崩壊の簡易安定解析法とその摘要例, 応用地質, Vol.34, No.1, pp.25-33, 1993.
- 8) R.E.グッドマン, G.H.シー: ブロック理論と岩盤工学への応用, 土木工学社, 359p, 1992.
- 9) 鷺見武富: ステレオネットを用いた岩盤分離面のすべり摩擦角推定事例, 応用地質, Vol.36, No.6, pp.448-454, 1996.
- 10) 菊地宏吉, 藤枝誠, 岡信彦, 小林隆志: ダム基礎岩盤の耐荷性に関する地質工学的総合評価, 応用地質特別号, pp.103-118, 1984
- 11) 鷺見武富: くさび型岩盤斜面崩壊のステレオネットによる解析事例, 日本応用地質学会平成6年度研究発表会講演論文集, pp.17-25, 1994.
- 12) 岩の力学連合会: ISRM指針, Vol.3, 岩盤不連続面の定量的記載法, 1985.
- 13) Barton, N.: Review of a new shear-strength criterion for rock joints, *Engineering Geology*, Vol.7, pp.287-332, 1973.

## AN EVALUATION METHOD OF STABILITY IN ROCK SLOPE CONSIDERING WEDGE EFFECT AND LOCATION OF THE DISCONTINUOUS PLANE

Taketomi SUMI and Atsushi YASHIMA

In the analysis of slope stability in discontinuous rock, it is very important to simplify the way needed for finding out a dangerous block in three-dimensional analysis. There exists a stability evaluation method by which the blocks which needed to be evaluated are picked up among numerous blocks. In this paper, a simple stability evaluation method is proposed by formulating a failure condition of the rock, taking into consideration the wedge effect and the location of the discontinuous plane. By comparing the results obtained from the proposed method with those from stereographic analysis, it is shown that the proposed method is effective in identifying the dangerous block.