

# 岩盤斜面における不安定なくさび型不連続面の検索方法

日本地質コンサルタント(株) 正会員 鷲見武富  
岐阜大学地域共同研究センター 正会員 八嶋 厚

## 1. はじめに

不連続性岩盤斜面の主な安定解析法の一つに極限平衡解析法がある。極限平衡解析法は、岩盤ブロックを剛体として静的な力のつりあいのみで安定性を検討する解析法であり、個別要素法や有限要素法などの数値解析法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、一般斜面の安定解析に頻繁に用いられている。

不連続性岩盤斜面の3次元極限平衡解析法としては Hoek and Bray<sup>1)</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>2)</sup>や直方体要素を用いた方法<sup>3)</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、それらが形成するブロックは膨大な数となり、全てのブロックについて安定解析を行うことは困難である。このため、通常の解析では、最も危険と判断される断面を選定し、2次元解析が実施されることが多い。また、3次元解析が実施される場合でも、多数の不連続面群の中から抽出された特定の不連続面について安定解析が行われるのが一般的である。

このように、極限平衡解析法を用いた安定解析では、岩盤崩壊に関わる不連続面を予め抽出しておく必要があり、それらをいかに抽出するかが重要な問題となる。さらに、岩盤崩壊には地震力や水圧が大きく関与し、岩盤崩壊に関わる不連続面の抽出に際して、これらの要因を考慮することも必要である。本論文では、こうした問題に対し、水圧と地震力が考慮できる、多数の不連続面群の中から不安定な不連続面を検索するための手法を提案する。図-1に岩盤斜面の安定解析フローにおける提案検索手法の位置付けを示す。なお、岩盤崩壊には岩盤すべりやトップリング崩壊があるが、本論文では岩盤すべりのみを取り扱う。さらに、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。また、特にことわらない限り本文中で「水圧」という時は不連続面に作用する間隙水圧を指し、不連続面に沿って岩盤すべりが発生する可能性のある不連続面を「不安定な不連続面」と呼ぶことにする。

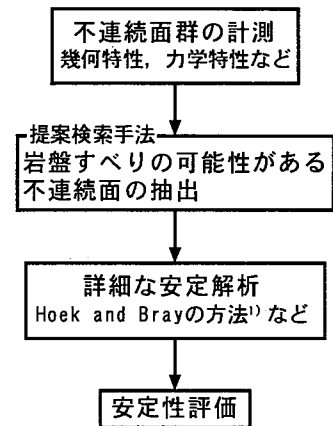


図-1 岩盤斜面の安定性評価フローにおける提案検索手法の位置付け

## 2. 既往検索手法の持つ問題点

従来、詳細な安定解析を必要とする不連続面の検索には、ステレオ解析法<sup>4)</sup>やブロック理論<sup>5)</sup>による方法などが用いられてきた。

不連続性岩盤斜面のステレオ解析法は、不連続面の方向とすべり摩擦角および岩盤斜面の方向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幾何的關係が3次元イメージとして直感的に理解でき、煩雑な計算を必要としないことから、現場での安定性評価に優れている。また、水圧や地震力を外力として解析に取り込むことも可能である。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考慮できない。さらに、くさび型すべりに対しては、くさび効果(2つの不連続面の挟み角がくさび型ブロックのすべり摩擦角に及ぼす影響)についても、別途に検討しなければならない。しかも、図式解法であることから、一度に多量の不連続面を解析対象とする場合には不向きである。

A method for extraction of the unstable wedge in rock slope ; Sumi, T. (Nihon-chishitsu Consultants Co.Ltd.), Yashima, A. (Gifu Univ. Center for Cooperative Research)

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検索する方法である。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、くさび効果についても別途に検討を要する。

このように、既往手法では不連続面位置やくさび効果を考慮する場合、不安定な不連続面の検索が煩雑となり、多数の不連続面を解析対象とする場合には不向きである。これに対して提案手法は、不連続面位置やくさび効果、水圧、地震力を考慮した場合の岩盤すべり条件を極限平衡論に基づく簡単な数式で表現している。このため、コンピュータプログラムの作成が容易で、多数の不連続面の解析に適している。また、提案手法は岩盤すべり条件を岩盤斜面と不連続面の傾斜方向および不連続面のすべり摩擦角の係数に帰着させているため、斜面形が複雑で解析対象とする岩盤ブロックの大きさや形状が不明確な場合にも適用できる。

### 3. 岩盤すべり条件の定式化と検索手法

#### (1) 岩盤すべり条件

本研究では、岩盤ブロックの安定性評価に極限平衡解析法を用い、岩盤ブロックに変形が生じた後の挙動は検討対象としていない。このため、ここでは岩盤ブロックを剛体として取り扱う。

Hoek and Bray<sup>1)</sup>などによる岩盤斜面の静的なすべり破壊の条件を図-2の概念図を用いて説明する。まず、図-2(a)に示すように、不連続面  $J_1$  と  $J_2$  が交差してくさび型不連続面を形成するとき、2つの不連続面が交わってできる直線 EF を交差線と呼ぶことにする。この交差線に沿ってくさび型すべりが発生するか否かは、交差線と岩盤斜面の幾何学的関係および、くさび型ブロックに作用する外力とすべり抵抗力の関係に支配される。つまり、くさび型ブロックが次に示す4つの条件(図-2(b))を同時に満足するとき岩盤すべりが発生し、それ以外では静力学的に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斜面の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、変位を拘束しない解放面(岩盤斜面)がくさび型ブロックのすべる方向に存在することを表している。ステレオ解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、本論文で提案する検索手法では、解析対象とするくさび型不連続面について、上記4条件のすべてを照査することになる。

ところで、一般の極限平衡解析では、岩盤ブロックに作用する外力とすべり抵抗力の関係を安全率  $F_s$  で表すことが多い。この安全率の概念は、斜面安定工を設計する上で具体的な設計目標を与えることから、実務で頻繁に用いられている。しかし、安定性評価において、例えば  $F_s = 0.9$  が具体的に岩盤斜面のどのような状況を表しているのか理解し難い。そこで、提案手法では岩盤すべり条件4の検討に見掛けすべり摩擦角を用いる。見掛けすべり摩擦角とは、くさび型ブロックが力学的つりあい状態にあるときの交差線の傾斜角で定義される。つまり、見掛けすべり摩擦角は、くさび型ブロックが安定を保てる限界の交差線傾斜角を表す。したがって、実際の交差線の傾斜角と見掛けすべり摩擦角を比べることにより、ブロックの安定性を容易に評価することができる。

#### (2) 岩盤すべり条件の定式化

岩盤すべり条件の定式化に必要な不連続面方向の表示には、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(北から右回り方向の角度)と傾斜角(伏角)

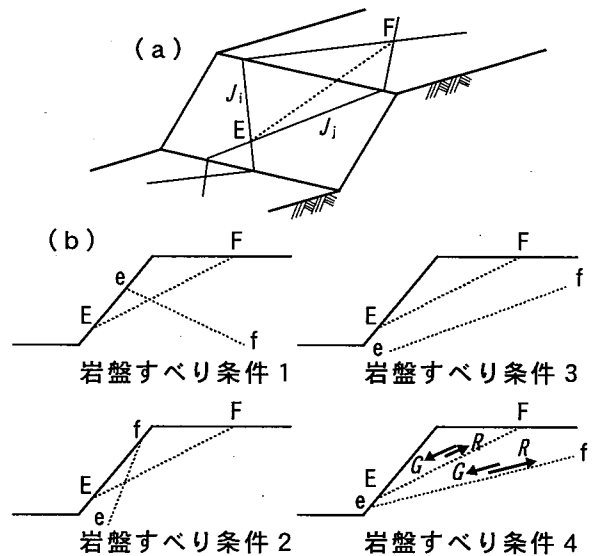


図-2 岩盤すべり条件の概念図

(a) 図：くさび型不連続面と交差線の関係

$J_1$ ,  $J_2$ : 岩盤不連続面

直線EF:  $J_1$ と $J_2$ の造るくさび型不連続面の交差線

(b) 図：岩盤すべり条件の概念図

直線EF: 岩盤すべり条件を満たす交差線

直線ef: 岩盤すべり条件を満たさない交差線

G: 外力の交差線方向成分

R: すべり抵抗力

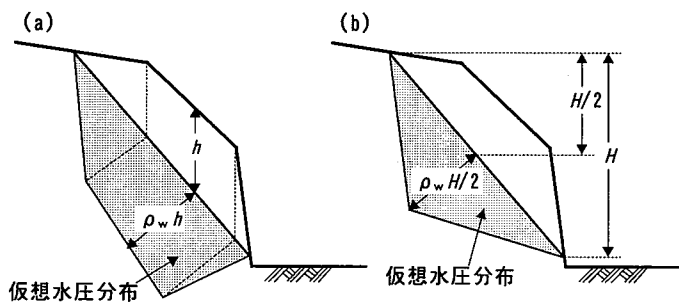


図-3 不連続面に作用する仮想水圧分布

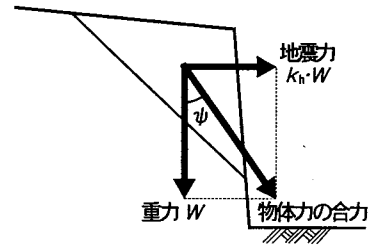


図-4 地震時の物体力の作用方向

で表記される。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。交差線も同様に、傾斜ベクトルと交差線上の任意の1点の3次元直交座標によって表記する。また、定式化の便宜上、岩盤斜面の表面形状は三角形メッシュで表現し、各三角形要素はそれぞれ3つの頂点の位置ベクトルで表すものとする。なお、この三角形要素は、岩盤斜面と交差線の幾何学的関係を調べるときにのみ用いるものであり、サイズは任意である。

本論文で提案する手法は、不安定なくさび型不連続面を検出するための予備的な解析手法として位置付けられている。そこで、簡便化のため、岩盤すべり条件4に関して以下の事項を仮定した。

仮定1：モーメントの影響は無視できる。つまり、トッピングや回転を伴うすべりは考慮しない。

仮定2：不連続面に沿う破壊規準として、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、 $\phi$ はすべり摩擦角を表す。

さらに、地下水による影響は水圧分布のみを考慮し、浸透破壊や岩盤ブロックの変位に伴う過剰間隙水圧は考えないものとする。また、地震力は設計震度法により静的な外力として作用させる方法を採用する。そこで、地下水と地震力条件として、以下の仮定を設けた。

仮定3：くさび型不連続面は水で飽和している。

仮定4：くさび型不連続面内の水の流速は小さく、無視できるものとする。

仮定5：水圧は不連続面に垂直に作用し、圧力水頭はその点の土被り厚さに等しいとする(図-3(a))。

仮定6：岩盤ブロックには水平方向の地震力のみ作用する。すなわち、鉛直震度は0とする(図-4)。

仮定6は、くさび型ブロック内にも多くの不連続面が存在する場合を想定した水圧分布仮定である。複雑な不連続面ネットワークに沿う水圧分布については不明確な点が多いが、この水圧分布は豪雨時などに生じる可能性がある極端な条件の代表的なものと考えられる。なお、この水圧分布の他にも、岩盤すべりの安定解析においてしばしば用いられる仮想水圧分布に図-3(b)の水圧分布がある<sup>1)</sup>。図-3(b)の水圧分布は、くさび型ブロックが完全に不透水性の場合を想定しており、交差線の上端から中点まではピエゾ水頭が一定で、交差線中点から下端まではピエゾ水頭が直線的に減少することを仮定している。しかし、モデル斜面を用いた解析により、一般に図-3(a)の方が安定性評価の上で安全側の水圧分布であることが報告されている<sup>5)</sup>。そこで、本論文では、不連続面の水圧分布として図-3(a)を採用した。

上記仮定のもとでくさび型ブロックにとって最も危険な状態は、例えば不連続面の膠結が完全に失われ、 $c = 0$ となった状態である。この状態において、岩盤斜面と不連続面が式(1a)または式(1b)の関係にあるとき、岩盤すべり条件1～4を同時に満足し、岩盤すべりが発生することになる。条件式の誘導については、鷲見と八嶋<sup>5),6)</sup>に詳しく述べられている。

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_{kij} \geq \pi/2 \\ \delta_{ij} \leq \tan^{-1} k_n \\ d_{kij} = a_k + m(b_k - a_k) + n(c_k - b_k) \quad (0 \leq m \leq n \leq 1) \\ \phi_{ij}^A < -\delta_{ij} \end{array} \right. \quad (1a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_{kij} < \pi/2 \\ \alpha_{kij} > \delta_{ij} \\ d_{kij} = a_k + m(b_k - a_k) + n(c_k - b_k) \quad (0 \leq m \leq n \leq 1) \\ \phi_{ij}^A < \delta_{ij} \end{array} \right. \quad (1b)$$

ここで、

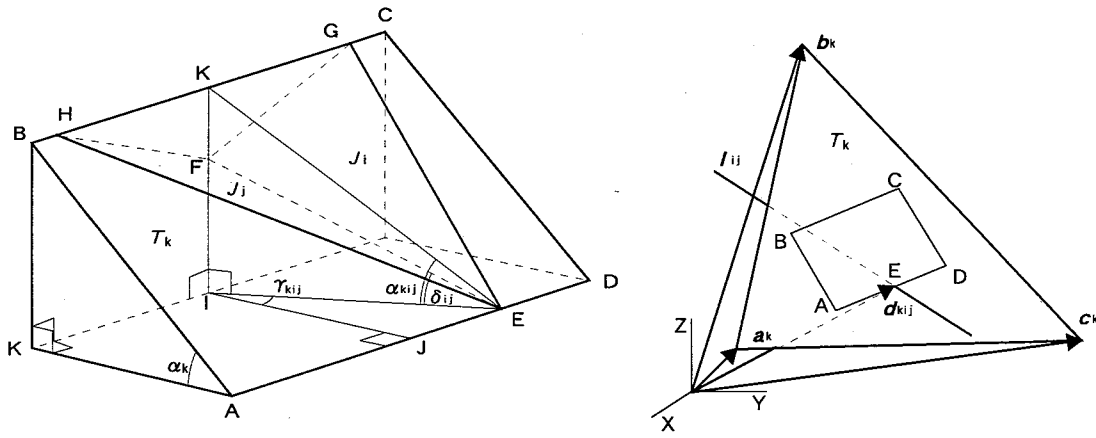


図-4 岩盤斜面と不連続面の幾何的關係

平面ABCD：岩盤斜面の三角形要素  $T_k$  の一部  
 四面体EFGH：くさび型ブロック  
 平面EFG：不連続面  $J_1$  の一部  
 平面EFH：不連続面  $J_2$  の一部  
 直線EF：不連続面  $J_1$  と  $J_2$  が造る交差線  $I_{ij}$

$\angle EIJ$ ： $I_{ij}$  の傾斜方位と  $T_k$  の傾斜方位のなす角  $\gamma_{kij}$   
 $\angle FEI$ ： $I_{ij}$  の傾斜角  $\delta_{ij}$   
 $\angle BAK$ ： $T_k$  の傾斜角  $\alpha_k$   
 $\angle KEI$ ： $I_{ij}$  を含む鉛直断面内での  $T_k$  の見掛けの傾斜角  $\alpha_{kij}$   
 $a_k, b_k, c_k$ ： $T_k$  の頂点の位置ベクトル  
 $d_{kij}$ ： $T_k$  を含む平面と  $I_{ij}$  の交点の位置ベクトル

$$\alpha_{kij} = \tan^{-1}(\tan \alpha_k \cos \gamma_{kij}) \quad (2)$$

$$\tan \delta_{ij} = \frac{\tan \beta_i \tan \beta_j \sin \eta_{ij}}{\sqrt{\tan^2 \beta_i + 2 \tan \beta_i \tan \beta_j \cos \eta_{ij} + \tan^2 \beta_j}} \quad (3)$$

$$\phi_{ij}^A = \delta_{ij}^c - \tan^{-1} k_h \quad (4)$$

$$\tan \delta_{ij}^c = \frac{\sin \omega_i \tan \phi_j + \sin \omega_j \tan \phi_i}{\sin(\omega_i + \omega_j)} - \frac{\rho_w \tan \phi_i}{\rho \cos \omega_i} (1 + \tan^2 \delta_{ij}^c) \quad \text{ただし} \quad \frac{\tan \phi_i}{\cos \omega_i} \geq \frac{\tan \phi_j}{\cos \omega_j} \quad (5)$$

$$\tan \omega_i = \frac{\sin \theta_i \tan \beta_i}{\cos \delta_{ij} + \sin \delta_{ij} \cos \theta_i \tan \beta_i} \quad (6)$$

$$\tan \theta_i = \pm \frac{\tan \beta_i + \tan \beta_j \cos \eta_{ij}}{\sin \eta_{ij} \tan \beta_i} \quad (7)$$

である。ただし、不連続面  $J_1$  と  $J_2$  の傾斜角を  $\beta_i$  と  $\beta_j$  とし、両不連続面の傾斜方位のずれ角を  $\eta_{ij}$ 、岩盤斜面  $T_k$  の傾斜角を  $\alpha_k$  とする。また、 $\gamma_{kij}$  は不連続面  $J_1$  と  $J_2$  が形成する交差線  $I_{ij}$  の傾斜方位と岩盤斜面の三角形要素  $T_k$  の傾斜方位なす角であり、 $\delta_{ij}$  は交差線  $I_{ij}$  の傾斜角、 $\alpha_{kij}$  は交差線  $I_{ij}$  を含む鉛直断面内での岩盤斜面  $T_k$  の見掛けの傾斜角である。さらに、 $a_k, b_k, c_k$  は三角形要素  $T_k$  の頂点の位置ベクトルであり、 $d_{kij}$  は  $T_k$  を含む平面と交差線  $I_{ij}$  の交点の位置ベクトルである。これらの記号の意味を図-4 に示す。図-4 の四面体 EFGH が注目したくさび型ブロックであり、上式はこのブロックの交差線 EF に沿ってすべりが発生するための条件式である。このとき、式(4)の  $\phi_{ij}^A$  はくさび型不連続面の見掛けすべり摩擦角を表し、右辺第 2 項で地震力を考慮している。また、式(5)の  $\delta_{ij}^c$  は力学的平衡状態にあるときの交差線の傾斜角であり、右辺第 1 項でくさび効果を考慮し、第 2 項で水圧の影響を考慮している。 $\omega_i$  は交差線に垂直な断面における不連続面  $J_1$  の見掛けの傾斜角を表す。なお、 $k_h$  は水平震度であり、 $k_h=0$  とおけば上式は地震力を考慮しない場合の条件式となる。また、 $\rho$  は岩盤の単位体積重量、 $\rho_w$  は水の単位体積重量であり、 $\rho_w/\rho=0$  とおけば水圧を考慮しない場合の条件式となる。

### (3) 不安定なくさび型不連続面の検索手法

前節の岩盤すべり条件式を用いて、くさび型不連続面の安定性評価を以下に示す手順(図-5)で行う。

①水圧条件( $\rho_w/\rho$ )と震度( $k_h$ )を設定する。

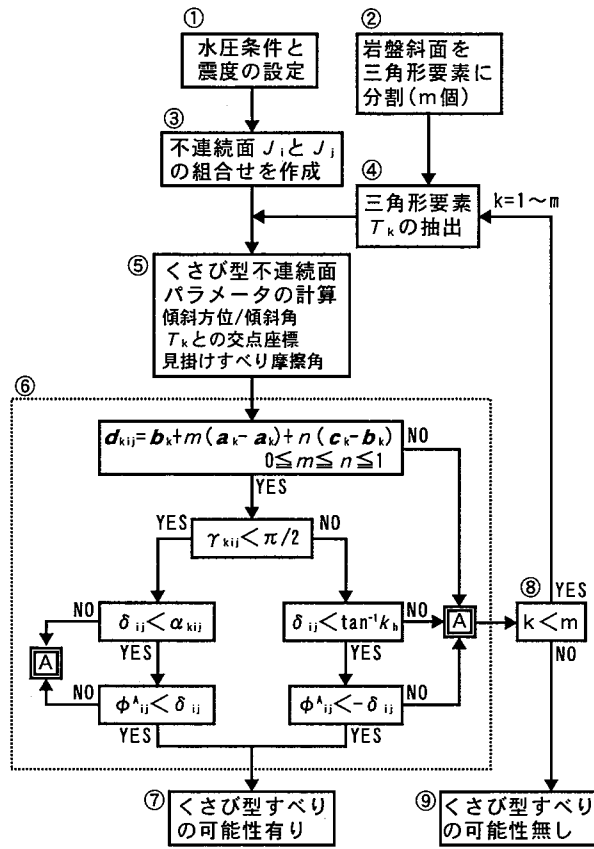


図-5 くさび型不連続面の安定性評価フロー

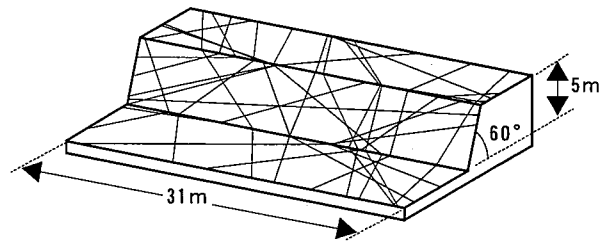


図-6 検索手法の比較に用いたモデル斜面  
図は20面の不連続面を発生させた例

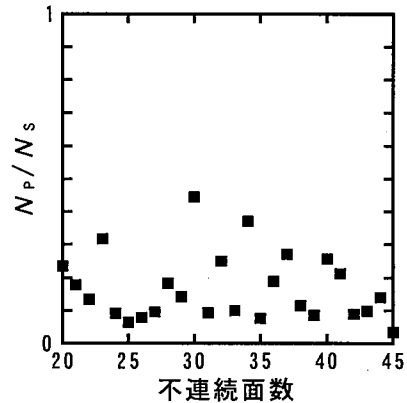


図-7 検索手法不連続面数と  
絞り込み効果の関係

- ②岩盤斜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など)を計算する。
- ⑥式(1a)または式(1b)が成立するか否かを調べる。ここで,  $\alpha_{kij}$  は交差線  $I_{ij}$  を含む鉛直断面内での  $T_k$  の見掛けの傾斜角であり, 式(2)から求まる。また,  $\delta_{ij}$  は交差線  $I_{ij}$  の傾斜角で, 式(3)から求まる。  $\phi^A_{ij}$  はくさび型不連続面の見掛けすべり摩擦角であり, 式(4)と式(5)から求まる。水圧を考慮しない場合は, 式(5)中の  $\rho_w$  を 0 とおく。  $k_h$  は水平震度であり, 地震力を考慮しない場合は 0 とおく。
- ⑦式(1a)または式(1b)が成立すれば, 不連続面  $J_i$  と  $J_j$  が形成するくさび型不連続面に沿って岩盤すべりが発生する可能性がある。
- ⑧式(1a)と式(1b)が成立しない場合は, 次の三角形要素について⑤と⑥を繰り返す。
- ⑨全ての三角形要素について式(1a)と式(1b)が成立しない場合には,  $J_i$  と  $J_j$  が作るくさび型不連続面はすべりに対して安定と評価される。

不連続面の組み合わせを換えて③～⑨の手順を繰り返し, 不安定なくさび型不連続面群を抽出する。

#### 4. 既往検索手法との比較

提案した検索手法による危険ブロックの絞り込みの効果を, 定量的に検討する。検討には高さ5m, 幅31m, 勾配60度の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-6)。同図には20面の不連続面を発生させた例を示している。なお, 不連続面のすべり摩擦角は30度とした。

図-7は, 発生させた不連続面の数と不安定なくさび型不連続面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, 提案手法により抽出された不安定なくさび型不連続面の数  $N_p$  をステレオ投影により抽出された不安定なくさび型不連続面の数  $N_s$  で除した値 ( $N_p/N_s$ ) で評価した。図-7をみると,  $N_p/N_s$  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, 提案手法により, 不安定なくさび型不連続面数がステレオ解析を用いた方法の 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。

## 5. 提案手法の適用性の検討

本論文で提案した検索手法の適用性を、実際にくさび型すべりが発生した岩盤斜面により検討する。

### (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。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、D~C<sub>M</sub>級に岩級区分された。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-8)。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、滑落を予測して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-1に不連続面の計測データをまとめるとともに、表-2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。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、ティルト試験により23±2度の値が得られている<sup>7)</sup>。

### (2) 不安定なくさび型不連続面の検索結果

表-1の不連続面データを用い、表-2のくさび型不連続面について、常時(水圧、地震力を考慮しない場合)の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-3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、提案手法でも不安定なくさび型不連続面として抽出された。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は不安定なくさび型不連続面として抽出されたが、くさび型すべりは発生していなかった。

検索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。

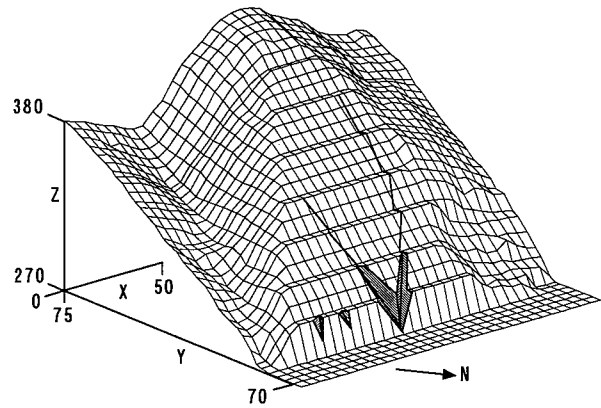


図-8 岩盤すべりが発生した岩盤掘削斜面の鳥瞰図  
ハッチ部分：くさび型崩壊箇所

表-1 不連続面の計測データ

不連続面	傾斜方位 (度)	傾斜角 (度)	通過座標(m)		
			X	Y	Z
K1	335.0	67.0	39.3	62.5	269.5
K2	64.0	75.0	38.7	53.6	285.0
K3	326.0	89.0	32.0	53.6	285.0
K4	103.0	51.0	39.3	62.5	269.5
K5	358.0	77.0	57.3	60.0	278.0
K6	125.0	52.0	56.6	60.0	278.0
K7	358.0	70.0	65.8	60.0	278.0
K8	150.0	85.0	65.1	60.0	278.0
K9	104.0	50.0	47.1	60.0	278.0
K10	314.0	80.0	48.6	60.0	278.0
K11	346.0	83.0	57.8	60.0	278.0
K12	95.0	40.0	34.9	53.4	285.0
K13	355.0	75.0	29.6	60.0	278.0
K14	155.0	72.0	28.6	60.0	278.0

表-2 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 K5-K6 K7-K8	K1-K12 K6-K11 K9-K10 K13-K14

表-3 提案検索手法による評価結果

不連続面 の組合せ	交差線 傾斜角	見掛け すべり 摩擦角	岩盤すべり条件				検索 結果	実 斜面
			1	2	3	4		
K1-K2	63.5	29.0	●	●	-	●	-	▼
K1-K4	35.1	33.3	●	●	●	●	▼	▼
K1-K12	30.8	29.7	●	●	●	●	▼	-
K3-K4	39.7	38.9	●	●	●	●	▼	▼
K5-K6	40.4	34.7	●	●	●	●	▼	▼
K6-K11	36.8	38.9	●	●	●	-	-	-
K7-K8	46.7	52.6	●	●	●	-	-	▼
K9-K10	26.7	40.2	●	●	●	-	-	-
K13-K14	30.4	52.2	●	●	●	-	-	-

単位：度 ●：条件を満足 ▼：不安定なくさび型不

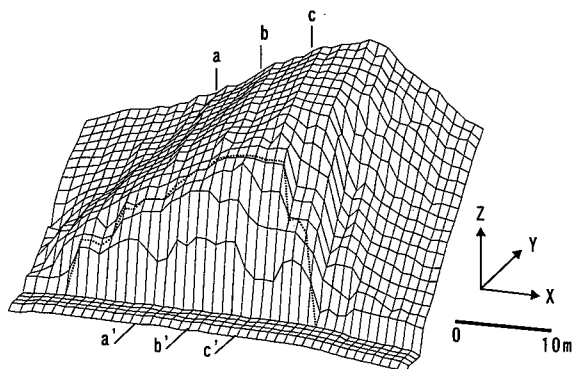


図-9 提案手法適用斜面の鳥瞰図

Y軸+方向：磁北 点線：計画岩盤掘削線

表-4 不連続面の計測データ

不連続面	傾斜方位(度)	傾斜角(度)	通過座標(m)		
			X	Y	Z
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

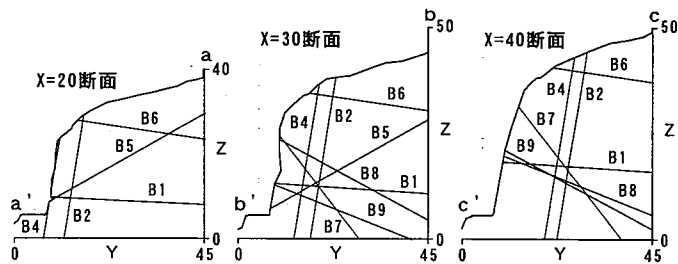


図-10 代表的断面における大規模不連続面の分布状況

表-5 提案検索手法による評価結果

不連続面の組合せ	交差線傾斜角	水圧、地震力を考慮せず		地震力を考慮		水圧を考慮		水圧、地震力を考慮	
		見掛けすべり摩擦角	検索結果	見掛けすべり摩擦角	検索結果	見掛けすべり摩擦角	検索結果	見掛けすべり摩擦角	検索結果
B1-B4	21.5	35.1	—	23.8	—	0.0	▼	-11.3	▼
B1-B5	17.8	30.1	—	18.7	—	17.8	▼	6.5	▼
B1-B8	22.2	29.5	—	19.0	▼	16.9	▼	5.6	▼
B2-B5	9.8	39.8	—	28.5	—	0.0	▼	-11.3	▼
B3-B5	4.7	37.7	—	26.4	—	8.0	—	-3.3	▼
B4-B5	12.1	39.4	—	28.1	—	0.0	▼	-11.3	▼
B4-B7	13.6	57.2	—	45.9	—	3.6	▼	-7.7	▼
B5-B7	12.5	35.1	—	23.8	—	14.6	—	3.3	▼
B5-B8	16.1	31.8	—	20.5	—	18.0	—	6.7	▼

単位：度 ▼：不安定なくさび型不連続面

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、検索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(不安定なくさび型不連続面と評価される)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、検索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(安定なくさび型不連続面と評価される)ようなすべり摩擦角は24度以上となる。この値は、検索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、提案検索手法は、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、検索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値にあったと判断される。

## 6. 提案手法の実岩盤への適用例

提案手法を、掘削が計画されている岩盤斜面に適用した例を紹介する。

### (1) 斜面状況

適用斜面は、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-9)。地質は、古生代の層状チャートからなる。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れている。現地において、これらの大規模不連続面の傾斜方位と傾斜角をクリノメータにより計測した。計測した大規模不連続

面は9本であった。表-4に、不連続面の計測データをまとめるとともに、図-10に代表的断面における不連続面の分布状況を示す。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。また、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。

## (2) 不安定なくさび型不連続面の検索結果

表-4の不連続面データを用い、当該岩盤斜面が現道路肩から勾配 1:0.3(73度)で掘削された場合(図-9の点線)について、常時(水圧と地震力が作用しない条件)と地震時や豪雨時などを想定した条件で、不安定なくさび型不連続面の検索を行った。検索に際し、 $\rho_w/\rho=1/2.5$ とし、地震時の震度は $k_h=0.20$ とした。

表-5に常時と地震時、豪雨時を想定した検索結果の比較を示す。検索の結果、水圧と地震力を同時に考慮した場合には、全72組のくさび型不連続面のうち表-5に示す9組が不安定な不連続面として抽出された。また、水圧のみを考慮した場合には、この9組のくさび型不連続面のうち3組が安定と評価され、残る6組が不安定な不連続面として抽出された。さらに、地震力のみを考慮した場合には1組のみが不安定な不連続面として抽出された。一方、常時にはこれら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。なお、表-5中の地震力と水圧を同時に考慮した場合の見掛けすべり摩擦角が負の値になっているものは、交差線が斜面に対して逆傾斜しているにも拘わらず、岩盤すべりの危険性が有ることを示している。

以上より、当該岩盤斜面は、勾配 1:0.3で掘削する限りにおいて、常時であれば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る。しかし、地震力や水圧を考慮した設計を行う場合には、表-5に示したくさび型不連続面に対して詳細な安定解析を実施する必要がある。

## 7. まとめ

不連続性岩盤斜面の安定解析において、岩盤内に分布する全ての不連続面を解析に取り込むことは困難である。したがって、解析対象とする不連続面をいかに抽出するかが重要な問題となる。また、岩盤崩壊には地震力や水圧が大きく関与することが知られており、岩盤崩壊に関わる不連続面の抽出に際して、これらの要因を考慮することも必要である。本論文では、こうした問題に対し、水圧と地震力を考慮できる、岩盤すべりの可能性がある不連続面を検索するための手法を提案した。この手法では、極限平衡論に基づく岩盤すべり条件を岩盤斜面と不連続面の傾斜方向および不連続面のすべり摩擦角の関係に帰着させている。このため、斜面形が複雑で解析対象とする岩盤ブロックの大きさや形状が不明確な場合にも適用できる。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。

提案手法をモデル斜面や実際の岩盤斜面に適用した結果得られた知見を、以下にまとめる。

- ①複数の不連続面をランダムに発生させた岩盤斜面モデルでは、提案手法を用いることにより、不安定なくさび型不連続面数をステレオ解析法の1/2~1/20に絞り込むことができた。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。
- ②提案手法を実際にくさび型崩壊が発生した岩盤斜面に適用した結果、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、提案手法が実岩盤に対しても有効であることが確認された。

## 参考文献

- 1) Hoek, E. and Bray, J. W. : Rock Slope Engineering, Revised 3rd edition, *The Institution of Mining and Metallurgy*, pp.341-351, 1981.
- 2) R.E.グッドマン：不連続性岩盤の地質工学，森北出版，371p.，1976.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 鷺見武富，八嶋厚：岩盤斜面における水圧と地震力を考慮した不安定なくさび型不連続面の検索手法，土木学会論文集，投稿中
- 6) 鷺見武富，八嶋厚：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，土木学会論文集，No.659/III-52，pp.265-276，2000.
- 7) 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.