

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

鷲見武富¹・八嶋厚²

¹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)

²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、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り、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する。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。

Key Words : discontinuity, wedge-type rock failure, stability analysis, water pressure seismic force

1. はじめに

不連続性岩盤斜面の安定解析手法には、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剛体要素法(DEM)¹⁾や弾性体ブロックで表現する不連続変形法(DDA)²⁾、不連続面をジョイント要素^{3),4)}で表現する有限要素法(FEM)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、不連続面分布が複雑な場合には要素分割に多大な労力を要する。このため、通常の解析では、最も危険な断面を選定し、2次元解析が実施されることが多い。また、重要斜面に対して3次元解析が実施される場合でも、解析モデルの作成に当たって不連続面分布が簡略化されるのが一般的である。

一方、極限平衡解析法は、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、Hoek and Bray⁵⁾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⁶⁾

や直方体要素を用いた方法⁷⁾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3次元安定解析を行うことは困難である。このため、通常の解析では数値解析と同様に、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には、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、現行の安定解析では、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することが知られており⁸⁾、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、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に岩盤斜面の安定性評価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。また、特にことわらない限り「水圧」という場合に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

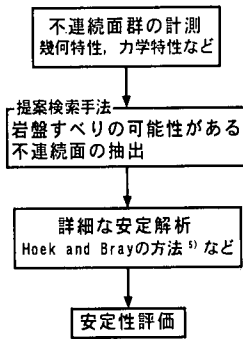


図-1 岩盤斜面の安定性評価フローにおける提案検索手法の位置付け

定な不連続面」と呼ぶことにする。

2. 既往検索手法と水圧, 地震力の取扱い

(1) 既往検索手法とその問題点

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^{8),9)}やブロック理論¹⁰⁾による方法が用いられてきた。

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, 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影響を及ぼすくさび効果についても, 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。

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。

このように従来の手法では, 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非常に煩雑となる。鷺見と八嶋¹¹⁾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簡易な安定性評価手法を提案した。鷺見と八嶋¹¹⁾の手法は, 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幾何的關係で表し, この関係に合う不連続面を不安定な不連続面として抽出するものである。ただし, この手法では地震力や水圧が考慮されておらず, 地震時や豪雨時などにおける岩盤斜面に対して適用することが出来なかった。そこで, 本論文では鷺見と八嶋¹¹⁾の手法を発展させ, 不連続面位置とくさび効果に加えて水圧と地震力を考慮した場合の, 不安定なくさび型不連続面の検索手法を提案する。

なお, 不連続面に沿った岩盤すべりには一面すべりとくさび型すべりがあるが⁹⁾, 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) 安定解析法における水圧と地震力の取扱い

例えば, 1993年8月の集中豪雨により, 鹿児島市の国道10号線沿いで不連続性岩盤斜面内に多数の崩壊が発生している¹²⁾。また, 国道229号線豊浜トンネル上部斜面の岩盤崩壊は, 岩盤の表面凍結によって流出口を閉塞された地下水が岩盤不連続面に高い水圧を発生させたことが主要因とされている¹³⁾。このように, 不連続性岩盤斜面において, 水圧は斜面の安定性に直接影響を与える。したがって, 岩盤斜面内の水圧分布を把握することは斜面の安定を検討する上で非常に重要であり, ジョイント要素を用いた応力変形解析と浸透流解析を連成させた解析手法の研究¹⁴⁾などが進められている。しかし, 現在では複雑な不連続面ネットワークに沿った地下水流, 特に地震時の地下水流挙動について定量的な評価を行うことが困難な状態にある。このため, 現行の安定解析では, 定常的な水圧分布のみを考慮した解析が行われることが多い。

兵庫県南部地震を始め地震時には多く岩盤崩壊が報告されており¹⁵⁾, 地震防災上, 岩盤斜面の安定性評価に地震力を考慮する必要がある。その場合, 基準地震力をを用いた動的解析を実施することにより, 地震動に対する岩盤ブロックの応答特性を考慮した安定性評価が可能となる。しかし, 動的解析は, 多くの入力パラメータを必要とし, 計算量も膨大になる。このため, 特に重要度の高い原子炉周辺斜面を除いて動的解析が実施されることは少なく, 通常斜面では設計震度法により静的な地震力を外力として与える方法が取られている。

本論文で提案する手法は, 図-1で示したように, 岩盤

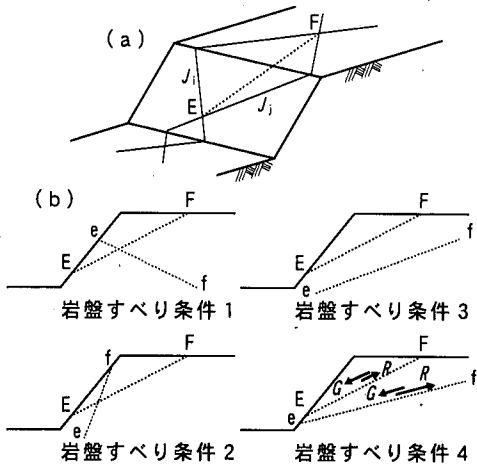


図-2 岩盤すべり条件の概念図
 (a)図:くさび型不連続面と交差線の関係
 J_1, J_2 :岩盤不連続面
 点線EF: J_1 と J_2 の造るくさび型不連続面の交差線
 (b)図:岩盤すべり条件の概念図
 点線EF:岩盤すべり条件を満たす交差線
 点線ef:岩盤すべり条件を満たさない交差線
 G:外力の交差線方向成分
 R:すべり抵抗力

斜面の安定性評価において、不安定な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。したがって、簡便化のため、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。

3. 岩盤すべり条件

提案検索手法は、一般的な岩盤斜面を対象としており、大深度地下空洞や山岳トンネルに比べて岩盤ブロックに作用する応力レベルが小さい。また、岩盤ブロックの安定性評価には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、本論文では岩盤ブロックを剛体として扱う。

Hoek and Bray⁹⁾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どうかは、交差線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に示す4つの条件を同時に満

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。

4つの岩盤すべり条件の概念図を図-2(b)に示す。このうち条件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^{6),9),10)}。一方、鷲見と八嶋¹¹⁾の手法と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關係を安全率 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、鷲見と八嶋¹¹⁾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ている。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、ブロックの力学的安定性を容易に評価することができる。本論文でも、岩盤すべり条件4の検討に、この見掛けすべり摩擦角を用いる。

4. 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。

岩盤すべり条件の定式化に必要な不連続面方向の表示は、傾斜ベクトルによる表記法を採用する。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)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

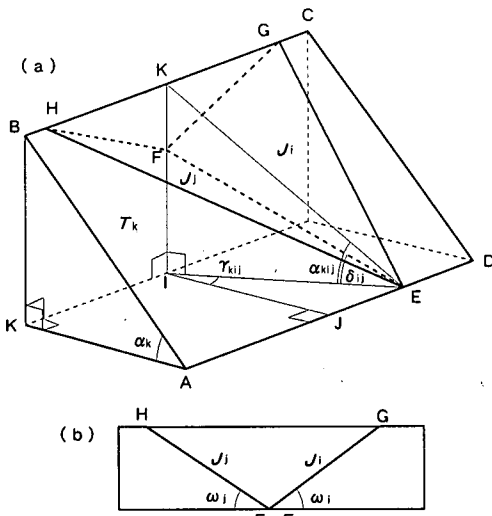


図-3 岩盤斜面と不連続面の幾何的關係

(b)図:(a)図のEFに垂直な断面
 平面ABCD:岩盤斜面の三角形要素 T_k の一部
 平面EFG:不連続面 J_i の一部
 平面EFH:不連続面 J_j の一部
 直線EF:不連続面 J_i と J_j が造る交差線 I_{ij}
 四面体EFGH:くさび型ブロック
 $\angle EIJ$: I_{ij} の傾斜方位と T_k の傾斜方位のなす角 γ_{kij}
 $\angle FEI$: I_{ij} の傾斜角 δ_{ij}
 $\angle BAK$: T_k の傾斜角 α_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 α_{kij}
 ω_i : I_{ij} に垂直な平面内での J_i の見掛けの傾斜角

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的關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。

(1) 不連続面位置とくさび効果を考慮した場合

鷲見と八嶋¹¹⁾は、不連続面位置とくさび効果を考慮した岩盤すべり条件を、以下のように定式化している。式中で用いる記号を図-3に示す。同図の四面体EFGHが注目するくさび型ブロックであり、このブロックの交差線EFに沿ったすべりを考える。

a) 岩盤すべり条件1の定式化

不連続面 J_i と J_j が形成する交差線 I_{ij} の傾斜方位と岩盤斜面 T_k の傾斜方位のなす角を γ_{kij} としたとき、岩盤すべりが発生するための条件1は式(1)で表される。

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

b) 岩盤すべり条件2の定式化

交差線 I_{ij} の傾斜角を δ_{ij} とし、岩盤斜面 T_k の傾斜

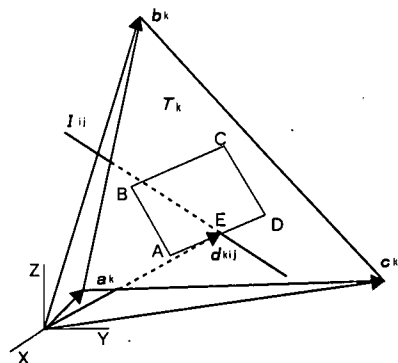


図-4 三角形要素 T_k と交差線 I_{ij} の幾何的關係
 図中の記号は図-3の記号に対応

角を α_k 、交差線 I_{ij} を含む鉛直断面内での岩盤斜面 T_k の見掛けの傾斜角を α_{kij} としたとき、岩盤すべり条件2は式(2)と式(3)で表される。

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

$$\alpha_{kij} = \tan^{-1}(\tan \alpha_k \cos \gamma_{kij}) \quad (3)$$

ただし、不連続面 J_i と J_j の傾斜角を β_i と β_j とし、両不連続面の傾斜方位のずれ角を η_{ij} としたとき、 δ_{ij} は次式で与えられる⁷⁾。

$$\tan \delta_{ij} = \frac{\tan \beta_i \tan \beta_j \sin \eta_{ij}}{\sqrt{\tan^2 \beta_i + 2 \tan \beta_i \tan \beta_j \cos \eta_{ij} + \tan^2 \beta_j}} \quad (4)$$

c) 岩盤すべり条件3の定式化

図-4に示すように、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。このとき、 I_{ij} が T_k 内を通過する条件は式(5)で表される。

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

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(5)が成立する必要がある。

d) 岩盤すべり条件4の定式化

岩盤すべり条件4の定式化に際して、以下の事項を仮定する。

- 仮定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。
- 仮定2: 不連続面 J_i に沿う破壊規準として、モール・クーロン式 ($\tau_i = c_i + \sigma_i \tan \phi_i$) を採用する。
- 仮定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る。

ただし、仮定2中の τ_i は不連続面 J_i のせん断抵抗力を表し、 c_i は粘着力、 σ_i は垂直応力、 ϕ_i はすべり摩擦角を表す。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

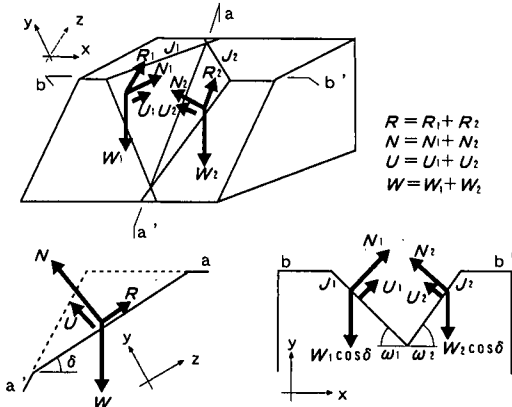


図-5 局所直交座標系x-y-zにおけるくさび型不連続面に作用する力

$$\begin{aligned} R &= R_1 + R_2 \\ N &= N_1 + N_2 \\ U &= U_1 + U_2 \\ W &= W_1 + W_2 \end{aligned}$$

a) 岩盤すべり条件1～条件3の定式化

水圧は、岩盤すべり条件1～条件3には関わらない。したがって、水圧を考慮した場合の岩盤すべり条件1～条件3は、水圧を考慮しない場合と同様に、式(1)～式(5)で表される。

b) 岩盤すべり条件4の定式化

岩盤すべり条件4の定式化に際して、水圧を考慮しない場合と同様、モーメントの影響は無視できるものとし(仮定1)、不連続面に沿う破壊規準としてモール・クーロン式を採用する(仮定2)。また、仮定3は次のように書き換える。

仮定3: くさび型ブロックに作用する外力として重力と水圧を考える。ただし、水圧は不連続面に垂直に作用するものとする。

上記仮定のもとで、図-5に示すような局所直交座標系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。座標系x-y-zのx軸は水平軸であり、z軸は交差線 I_{11} と平行に設定する。また、不連続面 J_1 に働く垂直力を N_1 で表し、せん断抵抗力を R_1 、水圧を U_1 、くさび型ブロックの重量を W で表す。さらに、力学的平衡状態にあるときの交差線の傾斜角(以後、つりあい角と記す)を δ_{11} で表す。ただし、ここではすべり破壊を考えているので、 $0 < \delta_{11} < \pi/2$ とする。また、水圧の合力は必ずしもくさび型ブロックの重心を通らないが、仮定1より、本研究ではモーメントのつりあいは考えず、力のつりあいのみを考える。

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_{11} の方向に一致する。このため、x, y, z軸方向の力のつりあいより、

$$(N_1 + U_1) \sin \omega_1 - (N_2 + U_2) \sin \omega_2 = 0 \quad (10)$$

$$-W \cos \delta_{11} + (N_1 + U_1) \cos \omega_1 + (N_2 + U_2) \cos \omega_2 = 0 \quad (11)$$

$$-W \sin \delta_{11} + R_1 + R_2 = 0 \quad (12)$$

となる。不連続面に沿った破壊規準を

$$R_i = N_i \tan \phi_i \quad (13)$$

とすると、式(10)～(13)より

$$\begin{aligned} \tan \delta_{11} &= \frac{\sin \omega_1 \tan \phi_1 + \sin \omega_2 \tan \phi_2}{\sin(\omega_1 + \omega_2)} \\ &\quad - \frac{U_1 \tan \phi_1 + U_2 \tan \phi_2}{W \cos \delta_{11}} \end{aligned} \quad (14)$$

となる。

見掛けすべり摩擦角の定義より、式(14)の δ_{11} を ϕ_{11} と書き換えて、 ϕ_{11} について解けばくさび型ブロックの見掛けすべり摩擦角が求まる。式(14)と式(6)を比較すると式(14)の右辺第2項が水圧の影響によるつりあい角の減少分を表していることがわかる。

失われ、 $c_i = 0$ 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は、式(6)と式(7)を用いて式(8)で表される。

$$\tan \phi_{11} = \frac{\sin \omega_1 \tan \phi_1 + \sin \omega_2 \tan \phi_2}{\sin(\omega_1 + \omega_2)} \quad (6)$$

$$\tan \omega_1 = \frac{\sin \theta_{11} \tan \beta_1}{\cos \delta_{11} + \sin \delta_{11} \cos \theta_{11} \tan \beta_1} \quad (7)$$

$$\phi_{11} < \delta_{11} \quad (8)$$

ここで、 ϕ_{11} は不連続面 J_1 と J_2 がつくるくさび型ブロックの見掛けすべり摩擦角を表し、 ω_1 は交差線 I_{11} に垂直な平面内での不連続面 J_1 の見掛けの傾斜角を表す。また、 θ_{11} は交差線 I_{11} と不連続面 J_1 の傾斜方位のなす角を表し、次式で与えられる⁹⁾。

$$\tan \theta_{11} = \pm \frac{\tan \beta_1 + \tan \beta_2 \cos \eta_{11}}{\sin \eta_{11} \tan \beta_1} \quad (9)$$

式(6)～式(9)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。ただし、不連続面のせん断強度特性には寸法効果があり、一般に粗い不連続面ほどそれが顕著に現れることが知られている¹⁰⁾。このため、不連続面のすべり摩擦角は、評価対象とするブロック群の規模や不連続面の状態に応じて設定する必要がある。

(2) 不連続面位置とくさび効果に加えて水圧を考慮した場合

竊見と八嶋¹¹⁾の不連続面位置とくさび効果を考慮した岩盤すべり条件の定式化をもとに、水圧を考えた場合の岩盤すべり条件の定式化を行う。

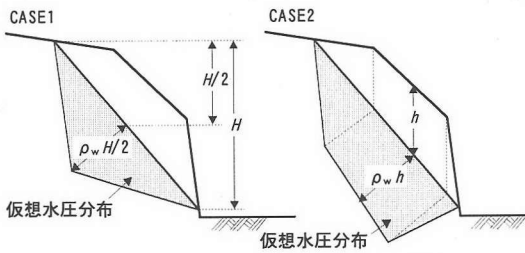


図-6 不連続面に作用する仮想水圧分布
CASE1: 交差線の midpoint に最大水圧 $\rho_w H/2$ が作用する
CASE2: 土被り厚さに等しい圧力水頭が作用する

式(14)から明らかなように、水圧を考慮する場合には、不連続面上での水圧分布を知る必要がある。しかし、不連続面上の水圧分布は、岩盤形状や交差する不連続面によって非常に複雑なものとなり、厳密に設定することはきわめて困難である。そこで、豪雨時などに生じる可能性のある極端な水圧分布として、図-6に示したCASE1とCASE2の2ケースを想定する。

CASE1の水圧分布は、岩盤すべりの安定解析においてしばしば用いられるもの⁴⁾で、くさび型ブロックが完全に不透水性の場合を想定している。このケースでは以下の仮定を設ける。

仮定4: くさび型不連続面は水で飽和している。

仮定5: 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6: くさび型不連続面が岩盤表面に現れる部分の水圧は大気圧に等しくなる。また、不連続面に沿う水圧は直線的に変化し、交差線の midpoint で最大水圧 $\rho_w H/2$ が発生する。ただし、 ρ_w は水の単位体積重量、 H はくさび型ブロックの交差線の高さを表す。

仮定5は、不連続面に沿う浸透流による破壊を考えないための仮定である。また、仮定6は、交差線の上端から midpoint まではピエゾ水頭が一定で、交差線 midpoint 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。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して用いられることが多い⁴⁾。

ここで、くさび型ブロックの不連続面 J_i の面積を A_i としたとき、上記仮定のもとでくさび型ブロックの不連続面 J_i には

$$U_i = \frac{H}{6} \rho_w A_i \quad (15)$$

の水圧が作用することになる。このとき式(14)は、次式のようにになる。

$$\tan \delta'_{ij} = \frac{\sin \omega_i \tan \phi_i + \sin \omega_j \tan \phi_j}{\sin(\omega_i + \omega_j)} - \frac{H \rho_w}{6 W \cos \delta'_{ij}} (A_i \tan \phi_i + A_j \tan \phi_j) \quad (16)$$

式(16)には、依然として H や A_i 、 W など岩盤ブロックの形状に依存したパラメータが含まれている。したがって、式(16)を解くためには岩盤斜面の詳細な地形測量が必要となり、簡易な評価手法として不向きである。また、ブロックが不透水性であるとの仮定から、くさび型ブロック内に水で飽和した不連続面が多数分布する場合にはこのケースは適さない。さらに、岩盤斜面の形状が複雑で、交差線の上端と下端がくさび型ブロックの最高点と最低点とならない場合にも適用できない。これらのことから、CASE1の仮想水圧分布は、斜面形状が単純で小規模なくさび型ブロックに対してのみ適用可能と判断される。

CASE2の仮想水圧分布は、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ている。このケースはCASE1同様、岩盤内の不連続面は水で飽和し(仮定4)、不連続面に沿う水の流速は無視できるものとする(仮定5)。さらに、仮定6を次のように書き換える。

仮定6': くさび型不連続面に作用する圧力水頭はその点の土被り厚さに等しい。

岩盤の単位体積重量を ρ としたとき、これらの仮定のもとでくさび型ブロックの不連続面 J_i には

$$U_i = \frac{\rho_w}{\rho} W \frac{A_i \cos \omega_i}{A_i \cos \omega_i + A_j \cos \omega_j} \frac{1}{\cos \delta'_{ij} \cos \omega_i} \quad (17)$$

の水圧が作用することになる。ここで

$$A_i/A_j = h_u \quad (\infty \geq h_u \geq 0) \quad (18)$$

とおくと、式(14)は、

$$\tan \delta'_{ij} = \frac{\sin \omega_i \tan \phi_i + \sin \omega_j \tan \phi_j}{\sin(\omega_i + \omega_j)} - \frac{\rho_w}{\rho} \frac{h_u \tan \phi_i + \tan \phi_j}{h_u \cos \omega_i + \cos \omega_j} (1 + \tan^2 \delta'_{ij}) \quad (19)$$

となる。式(19)には依然として岩盤形状に依存するパラメータ h_u が含まれている。水圧の影響によるつりあい角の減少分を表す右辺第二項に注目し、

$$F(h_u) = \frac{h_u \tan \phi_i + \tan \phi_j}{h_u \cos \omega_i + \cos \omega_j} \quad (20)$$

とおくと、

$$\frac{dF}{dh_u} = \frac{\cos \omega_i \tan \phi_i - \cos \omega_j \tan \phi_j}{(h_u \cos \omega_i + \cos \omega_j)^2} \quad (21)$$

であるので、

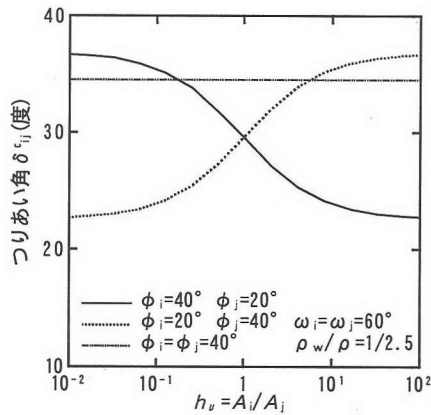


図-7 水圧分布の変化に伴うつりあい角 δ_{ij} の変化

$$\frac{\tan \phi_i}{\cos \omega_i} > \frac{\tan \phi_j}{\cos \omega_j} \quad (22a)$$

のとき $F(h_u)$ は単調増加し、 h_u が大きいほどつりあい角の減少分は大きくなり、その結果 δ_{ij} が小さくなる。逆に、

$$\frac{\tan \phi_i}{\cos \omega_i} < \frac{\tan \phi_j}{\cos \omega_j} \quad (22b)$$

のときは $F(h_u)$ は単調減少し、 h_u が小さいほど δ_{ij} も小さくなる。また、

$$\frac{\tan \phi_i}{\cos \omega_i} = \frac{\tan \phi_j}{\cos \omega_j} \quad (22c)$$

のときは δ_{ij} は h_u に関わりなく一定の値をとる。図-7に、 $\rho_w/\rho=1/2.5$ 、 $\omega_i=\omega_j=60^\circ$ とした場合の h_u とつりあい角 δ_{ij} の関係を例示する。ここでは不安定なくさび型不連続面の抽出を目的としていることから、くさび型ブロックにとって最も不利な状態を想定し、式(22a)の関係のときは $h_u=\infty$ 、式(22b)あるいは式(22c)の関係のときは $h_u=0$ とする。これは、水圧によるつりあい角の減少を、それがより効果的に作用する方の不連続面で評価することを意味している。このとき式(19)は次のように書き換えられる。

$$\tan \delta_{ij} = \frac{\sin \omega_i \tan \phi_i + \sin \omega_j \tan \phi_j}{\sin(\omega_i + \omega_j)} - \frac{\rho_w}{\rho} \frac{\tan \phi_i}{\cos \omega_i} (1 + \tan^2 \delta_{ij}) \quad (23a)$$

ただし、

$$\frac{\tan \phi_i}{\cos \omega_i} \geq \frac{\tan \phi_j}{\cos \omega_j} \quad (23b)$$

となるように J_i と J_j を選ぶ。

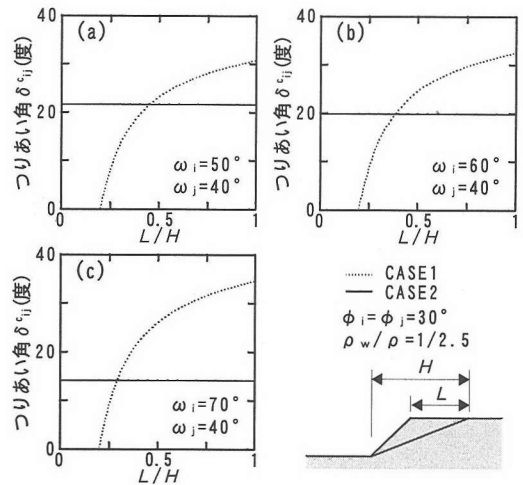


図-8 くさび型ブロック形状 L/H とつりあい角 δ_{ij} の関係
交差線と斜面の傾斜方向を同じに設定

式(23a)には岩盤形状に依存するパラメータが含まれておらず、岩盤と水の単位体積重量比 ρ_w/ρ を設定すれば δ_{ij} を求めることができる。したがって、CASE2は安定性評価を行う上でCASE1に比べて好都合な想定水圧分布と言える。しかし、実際の岩盤斜面では、CASE1のような水圧分布が発生する可能性もある。このため、安定性評価を行う上でCASE1とCASE2のどちらが安全側の水圧分布であるかを検討しておく必要がある。

図-8に、くさび型ブロックの形状を交差線の平面全長 H とその天端長 L の比 L/H で表したときの、 L/H の変化に伴うCASE1とCASE2のつりあい角 δ_{ij} の変化を示す。なお、CASE1ではくさび型ブロックを完全な不透水性としているのに対して、CASE2ではブロック内に水で飽和した無数の不連続面の存在を仮定している。このため、岩盤と水の単位体積重量比 ρ_w/ρ は厳密にはCASE1とCASE2で異なるが、ここでは両ケースとも $\rho_w/\rho=1/2.5$ とした。同図から、CASE2のつりあい角は岩盤形状に関わらず一定であり、一方、CASE1の場合はくさび型ブロックの体積が大きいほど (L/H が大きいほど) つりあい角が大きくなることからわかる。図-8(c)の例では、 $L/H > 0.3$ のときCASE2のつりあい角がCASE1に比べて小さく、 $L/H < 0.3$ ではCASE2のつりあい角がCASE1より大きくなる。このように、CASE2はCASE1に比べて常に小さいつりあい角を与えるわけではない。しかし、同じ規模のくさび型ブロックを考えた場合、ブロックの体積が大きくなれば、CASE2の方が小さいつりあい角を与える傾向にあることがわかる。

図-9は、高さ5m、傾斜45度の半無限モデル斜面内にランダムに発生させた71組のくさび型不連続面について、CASE1とCASE2のつりあい角を比較したものであ

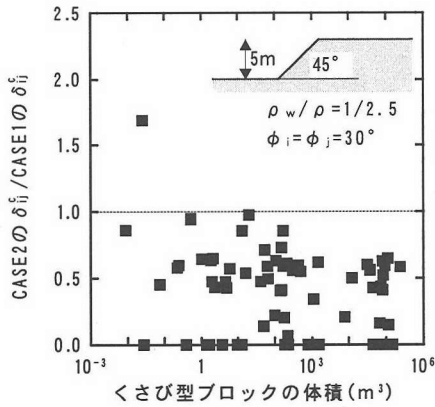


図-9 CASE1とCASE2のつりあい角 δ_{ij} の比較

る。モデル斜面では、71組のくさび型不連続面のうち1組の例外を除き、CASE1よりCASE2で小さいつりあい角が得られた。例外となったくさび型不連続面が形成するブロックの体積は 0.025m^3 で、全くくさび型ブロック中で2番目に小さいものであった。さらに、高さ50mの鉛直斜面で71組のくさび型不連続面について同様な比較を行ったところ、全てのくさび型不連続面でCASE2の方が小さいつりあい角を与えることが確認された。

これらのことから、崩壊発生時に大きな被害が予想される大型ブロックに対しては、CASE2の方が安定性評価の上で安全側の水圧分布とみなせる。さらに、前述したようにCASE2の力のつりあい式は岩盤形状に関わるパラメータを含んでいない。したがって、本論文では形状の複雑な岩盤斜面内の水圧分布としてCASE2を採用し、水圧を考慮したくさび型ブロックに作用する力のつり合い式を式(23a)と(23b)で表す。ただし、 $\rho_w \neq 0$ 、 $\phi_i \neq 0$ のとき、

$$\frac{\sin \omega_i \tan \phi_i + \sin \omega_j \tan \phi_j}{\sin(\omega_i + \omega_j)} < \frac{\rho_w \tan \phi_i}{\rho \cos \omega_i} \quad (24)$$

であれば、式(23a)に $\delta_{ij} \geq 0$ となる解は存在しない。これは、水圧が重力の水圧方向成分より大きくなり、ブロックが浮き上がる場合に相当する。したがって、式(24)の場合には $\delta_{ij} = 0$ とする。

以上より、水圧を考慮した岩盤すべり条件4は、式(23a)の δ_{ij} を ϕ_{ij}^\wedge と書き換えた次式を用いて、式(8)で表される。

$$\tan \phi_{ij}^\wedge = \frac{\sin \omega_i \tan \phi_i + \sin \omega_j \tan \phi_j}{\sin(\omega_i + \omega_j)} - \frac{\rho_w \tan \phi_i}{\rho \cos \omega_i} (1 + \tan^2 \phi_{ij}^\wedge) \quad (25a)$$

ただし、

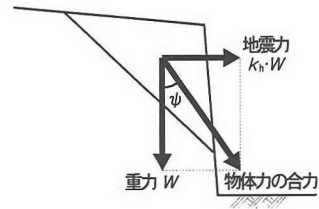


図-10 地震時の物体力の作用方向

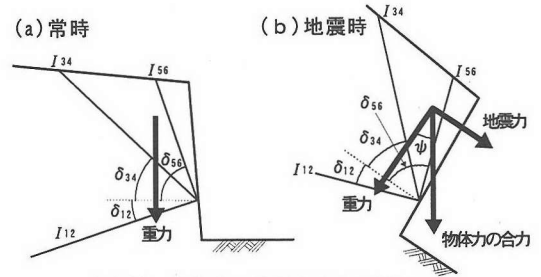


図-11 物体力の作用方向を基準とした岩盤斜面と交差線の関係

$$\frac{\tan \phi_i}{\cos \omega_i} \geq \frac{\tan \phi_j}{\cos \omega_j} \quad (25b)$$

となるように J_i と J_j を選ぶ。また、 $\rho_w \neq 0$ 、 $\phi_i \neq 0$ のとき、式(24)の関係が成り立てば $\phi_{ij}^\wedge = 0$ とする。なお、 $\rho_w / \rho = 0$ と置けば、式(25a)は水圧を考えない場合の見掛けすべり摩擦角の算出式(6)となる。

(3) 不連続面位置とくさび効果、水圧に加え地震力を考慮した場合

ここでは、地震力を設計震度法により静的な外力として加えた場合の岩盤すべり条件の定式化を行う。定式化に際し次の仮定を設ける。

仮定7: 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。

上記仮定のもとでは、地震力(水平力)がくさび型不連続面の交差線を含む鉛直断面内で岩盤斜面側へ作用するとき、くさび型ブロックの安定に関して最も不利な状態となる。このとき、水平震度を k_h とすると、くさび型ブロックには $k_h W$ の水平力が作用する。したがって、くさび型ブロックに作用する物体力の合力の作用方向は、図-10に示すように重力の作用方向(鉛直下方)から

$$\psi = \tan^{-1} k_h \quad (26)$$

だけ岩盤斜面側へずれることになる。地震力を考慮する場合の岩盤すべり条件は、この物体力の合力の作用方向を基準に考える必要がある。

a) 岩盤すべり条件1の定式化

図-11に、常時と地震時における物体力の作用方向

を基準とした岩盤斜面と交差線の関係を示す。同図の I_{12} のように、常時に交差線が岩盤斜面に対して逆傾斜する場合でも、地震力を考えると見掛け上の流れ盤となる場合がある。よって、ここでは交差線の傾斜方位と岩盤斜面の傾斜方位の関係を図-3(b)の γ_{kij} を基準に $\gamma_{kij} < \pi/2$ と $\gamma_{kij} \geq \pi/2$ の場合に分けて考える。

まず、 $\gamma_{kij} < \pi/2$ の場合には、図-11(b)の I_{34} のように $\delta_{ij} \leq \pi/2 - \phi$ であれば岩盤すべり条件1を満足する。これに対して、図-11(b)の I_{56} のように $\pi/2 - \phi < \delta_{ij} \leq \pi/2$ であれば、地震時に交差線は岩盤斜面と反対側へ傾斜するため、不連続面に沿ったすべりは発生しない。ただし後者の場合、不連続面から剥落するモードの岩盤崩壊の可能性が新たに生じることになる。

一方、 $\gamma_{kij} \geq \pi/2$ の場合には、図-11(b)の I_{12} のように $\delta_{ij} < \phi$ であれば、地震時に交差線は岩盤斜面に対して見掛けの上で流れ盤となり、条件1を満足する。

以上より、岩盤すべり条件1は、

$$\begin{cases} \gamma_{kij} < \pi/2 \\ \delta_{ij} \leq \pi/2 - \phi \end{cases} \quad (27a)$$

または

$$\begin{cases} \gamma_{kij} \geq \pi/2 \\ \delta_{ij} < \phi \end{cases} \quad (27b)$$

で表される。 $0 \leq \delta_{ij} \leq \pi/2$ であるので、式(27a)は $\phi=0$ のとき式(1)と等価となる。一方、式(27b)は $\phi=0$ のとき成立し得ない。したがって、 $\phi=0$ とおくことによって、式(27a)と式(27b)は地震力を考えない場合の岩盤すべり条件1を表すことができる。

b) 岩盤すべり条件2の定式化

交差線の傾斜方位と岩盤斜面の傾斜方位の関係を、条件1と同様に、 $\gamma_{kij} < \pi/2$ と $\gamma_{kij} \geq \pi/2$ の場合に分けて考える。

まず、 $\gamma_{kij} < \pi/2$ の場合には、 $\delta_{ij} \leq \pi/2 - \phi$ のとき $\delta_{ij} < \alpha_{kij}$ であれば条件2を満足する。これに対して、 $\pi/2 - \phi < \delta_{ij} \leq \pi/2$ のときは、地震時に交差線が岩盤斜面と反対側へ傾斜し、 $\delta_{ij} < \alpha_{kij}$ であれば不連続面から剥落するモードの崩壊の可能性が新たに生じる。

一方、 $\gamma_{kij} \geq \pi/2$ の場合には、 $\delta_{ij} < \phi$ であれば α_{kij} との関係に関わらず、全ての場合に岩盤すべり条件2を満足する。

以上より、岩盤すべり条件2は、式(27b)または

$$\begin{cases} \gamma_{kij} < \pi/2 \\ \delta_{ij} \leq \pi/2 - \phi \\ \delta_{ij} < \alpha_{kij} \end{cases} \quad (27c)$$

で表される。 $0 \leq \delta_{ij} \leq \pi/2$ であるので、条件1と同様、

$\phi=0$ のとき式(27b)は成立し得ず、一方、式(27c)は式(2)と等価となる。したがって、 $\phi=0$ とおくことによって、式(27b)と式(27c)は地震力を考慮しない場合の岩盤すべり条件2を表すことができる。

c) 岩盤すべり条件3の定式化

岩盤すべり条件3は、岩盤斜面と交差線の位置に関わるもので、物体力の合力方向の変化には影響されない。したがって、不連続面位置とくさび効果を考慮した場合の条件式(5)がそのまま採用できる。

d) 岩盤すべり条件4の定式化

式(23a)は、誘導に際して物体力に重力のみを考えたものであるが、重力と地震力の合力方向がくさび型不連続面の交差線を含む鉛直断面に平行する場合にも成立する。ただし、このときの δ_{ij} は、水平面からの角度ではなく、物体力の合力に垂直な面と交差線の成す角度となる。したがって、地震力を考慮した場合のくさび型不連続面の見掛けすべり摩擦角 ϕ_{ij}^* は、式(23a)の δ_{ij} と式(26)の ϕ を用いて、次式で表される。

$$\phi_{ij}^* = \delta_{ij} - \phi \quad (28)$$

地震力を考慮しない場合、すなわち $\phi=0$ の場合、式(28)は式(25a)と等しくなる。

ここで、 $0 < \delta_{ij} < \pi/2$ であるので $-\phi < \phi_{ij}^* < \pi/2 - \phi$ となり、大きな地震力を考える場合には、 $\phi_{ij}^* < 0$ となることがある。この場合には、交差線が斜面に対して反対側へ傾斜($\gamma_{kij} \geq \pi/2$)していても岩盤すべりが発生することを表している。これを踏まえた上で、地震力を考慮するときの岩盤すべり条件4を、 $\gamma_{kij} < \pi/2$ と $\gamma_{kij} \geq \pi/2$ の場合に分けて考える。

まず、 $\gamma_{kij} < \pi/2$ の場合には、 $\delta_{ij} \leq \pi/2 - \phi$ のとき $\phi_{ij}^* < \delta_{ij}$ であれば条件4を満足する。これに対して、 $\pi/2 - \phi < \delta_{ij} \leq \pi/2$ であれば地震時に交差線は岩盤斜面と反対側へ傾斜し、不連続面から剥落するモードの岩盤崩壊が発生する。

一方、 $\gamma_{kij} \geq \pi/2$ の場合には、交差線は岩盤斜面に対して逆傾斜する。しかし、 $\phi_{ij}^* < 0$ かつ $\phi_{ij}^* + \phi < -\delta_{ij} + \phi$ の場合、地震時に交差線は見掛けの上で流れ盤を形成し、岩盤すべり条件4を満足することになる。

以上より、岩盤すべり条件4は、

$$\begin{cases} \gamma_{kij} < \pi/2 \\ \delta_{ij} \leq \pi/2 - \phi \\ \phi_{ij}^* < \delta_{ij} \end{cases} \quad (29a)$$

または

$$\begin{cases} \gamma_{kij} \geq \pi/2 \\ \phi_{ij}^* < -\delta_{ij} \end{cases} \quad (29b)$$

で表される。 $0 \leq \delta_{ij} \leq \pi/2$ であるので、 $\phi=0$ のとき式

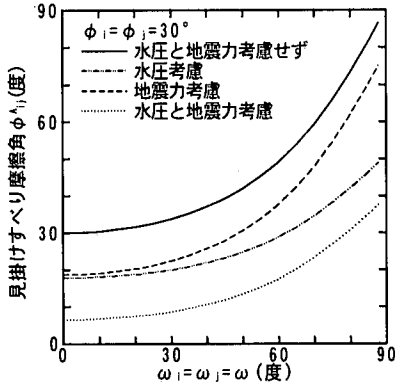


図-12 条件の違いによる見掛けすべり摩擦角 ϕ_{ij} の変化

(29a)は式(8)と等価となる。また、 $0 < \delta_{ij} < \pi/2$ であるので、 $\phi = 0$ のとき式(29b)は成立し得ない。したがって、 $\phi = 0$ とおくことによって式(29a)と式(29b)は地震力を考慮しない場合の岩盤すべり条件4を表すことができる。さらに、 ϕ_{ij} の定義から、 $\rho_w/\rho = 0$ とおけば式(29a)と式(29b)は水圧を考慮しない場合の岩盤すべり条件4を表すこともできる。

水圧や地震力がくさび型不連続面の見掛けすべり摩擦角 ϕ_{ij} に及ぼす影響を図-12に例示する。ここでは $\phi_i = \phi_j = 30$ 度、 $\rho_w/\rho = 1/2.5$ 、 $k_h = 0.2$ 、 $\omega_i = \omega_j = \omega$ とした。図-12に示したように、水圧や地震力を考えた場合の見掛けすべり摩擦角は、これらを考慮しない場合に比べて小さくなる。

5. 不安定なくさび型不連続面の検索手法の提案

(1) 不安定なくさび型不連続面の検索手法

前章に示した不連続面位置とくさび効果、水圧、地震力を考慮した岩盤すべり条件式は、

$$\begin{cases} \gamma_{kij} < \pi/2 \\ \alpha_{kij} > \delta_{ij} \leq \pi/2 - \phi \\ \mathbf{d}_{kij} = \mathbf{a}_k + m(\mathbf{b}_k - \mathbf{a}_k) + n(\mathbf{c}_k - \mathbf{b}_k) \quad (0 \leq m \leq n \leq 1) \\ \phi_{ij}^* < \delta_{ij} \end{cases} \quad (30a)$$

または

$$\begin{cases} \gamma_{kij} \geq \pi/2 \\ \delta_{ij} \leq \phi \\ \mathbf{d}_{kij} = \mathbf{a}_k + m(\mathbf{b}_k - \mathbf{a}_k) + n(\mathbf{c}_k - \mathbf{b}_k) \quad (0 \leq m \leq n \leq 1) \\ \phi_{ij}^* < -\delta_{ij} \end{cases} \quad (30b)$$

とまとめられる。

一方、 $\gamma_{kij} < \pi/2$ かつ $\alpha_{kij} > \delta_{ij} > \pi/2 - \phi$ であ

れば、図-11(b)の I_{56} に示したように岩盤崩壊はすべりモードとはならない。しかし、交差線が岩盤斜面と交わる(岩盤すべり条件3を満足する)場合には、ブロックがくさび型不連続面から剥落するため、崩壊の可能性のあるくさび型不連続面として抽出する必要がある。このとき、ブロックの剥落は、交差線の傾斜角 δ_{ij} とくさび型不連続面の見掛けすべり摩擦角 ϕ_{ij}^* との関係に関わりなく発生する。しかし、 $\phi_{ij}^* < \pi/2 - \phi$ であるので、必然的に $\phi_{ij}^* < \delta_{ij}$ の関係が成り立つ。したがって、式(30a)の第2式を $\alpha_{kij} > \delta_{ij}$ と書き換え、

$$\begin{cases} \gamma_{kij} < \pi/2 \\ \alpha_{kij} > \delta_{ij} \\ \mathbf{d}_{kij} = \mathbf{a}_k + m(\mathbf{b}_k - \mathbf{a}_k) + n(\mathbf{c}_k - \mathbf{b}_k) \quad (0 \leq m \leq n \leq 1) \\ \phi_{ij}^* < \delta_{ij} \end{cases} \quad (30c)$$

とすれば、式(30c)はブロックが剥落する条件も表すことができる。

以上より、不連続面位置とくさび効果、水圧、地震力を考慮した場合の岩盤すべり条件式として、式(30b)と式(30c)を提案する。これらの条件式は、 $k_h = 0$ つまり $\phi = 0$ とおけば地震力を考慮しない場合の条件式となり、 $\rho_w/\rho = 0$ とおけば水圧を考慮しない場合の条件式となる。

提案条件式を用いたくさび型不連続面の安定性評価は図-13と以下に示す手順で行う。

- ①: 水圧条件(ρ_w/ρ)と震度(k_h)を設定する。
- 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(30b)または式(30c)が成立するか否かを調べる。
- ⑦: 式(30b)または式(30c)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(30b)と式(30c)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(30b)と式(30c)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の手順を繰り返す、不安定なくさび型不連続面群を抽出する。

(2) 提案検索手法の有効性の検討

n 個の不連続面は最大 $n \times (n-1)$ 組のくさび型不連続面を形成し、 n が大きい場合にはこれら全ての組み合わせ

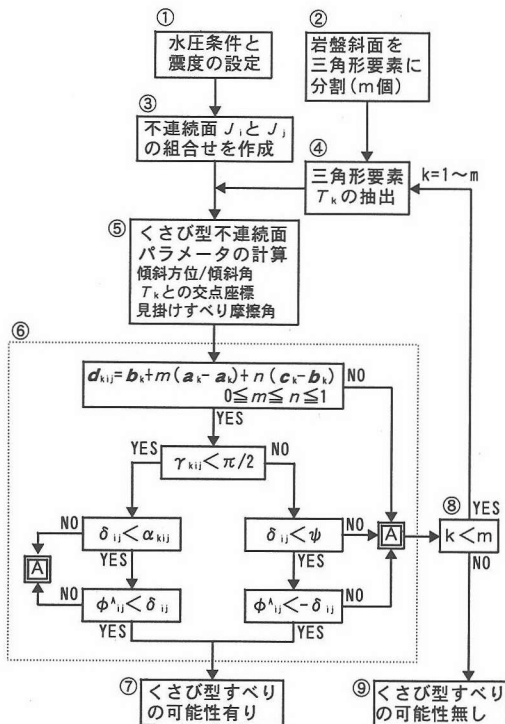


図-13 くさび型不連続面の安定性評価フロー

a_k, b_k, c_k : 三角形要素 T_k の頂点の位置ベクトル。
 d_{kij} : 三角形要素 T_k と交差線 I_{ij} の交点の位置ベクトル。
 γ_{kij} : 交差線 I_{ij} と三角形要素 T_k の傾斜方位のなす角。
 α_{kij} : 交差線 I_{ij} を含む鉛直断面内での三角形要素 T_k の見掛けの傾斜角。式(3)から求める。
 δ_{ij} : 交差線 I_{ij} の傾斜角。式(4)から求める。
 ψ : 水平震度 k_h から式(26)により求める。地震力を考慮しない場合は0とおく。
 ϕ^A_{kij} : くさび型不連続面の見掛けすべり摩擦角。式(4), 式(6), 式(7), 式(9), 式(23a), 式(23b), 式(28)から求まる。水圧を考慮しない場合は式(23a)中の ρ_w を0とおく。

せについて詳細な安定解析を行うことは困難である。このような場合、提案検索手法を用いることにより、不安定なくさび型不連続面を容易に絞り込むことができ、安定解析の省力化が図れる。ここでは、提案手法により不安定なくさび型不連続面をどの程度絞り込むことができるかを定量的に検討する。検討には48個の不連続面をランダムに発生させた高さ5m, 幅5m, 傾斜45度のモデル斜面を用いた。なお、不連続面のすべり摩擦角は30度とし、 $\rho_w/\rho=1/2.5$ とした。

図-14は、モデル斜面における不安定なくさび型不連続面の絞り込みの効果を示した図である。絞り込みの効果は、提案検索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 を全くさび型不連続面数 $n \times (n-1)$ で除した値で評価する。モデル斜面では、 $N_p/(n \times (n-1))$ の値は水圧と地震力を考慮しない場合で0.03~0.07,

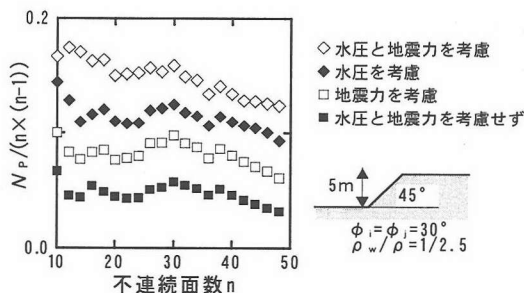


図-14 不安定なくさび型不連続面の絞り込み効果

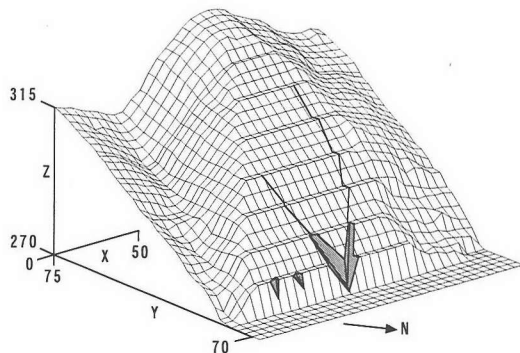


図-15 岩盤すべりが発生した岩盤掘削斜面の鳥瞰図
ハッチ部分:くさび型崩壊箇所

水圧と地震力の両方を考慮した場合でも0.12~0.17の範囲にある。これは、提案検索手法により、不安定なくさび型不連続面数が全くさび型不連続面数の1/6~1/33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、同程度の絞り込みが期待できよう。

6. 岩盤斜面への適用事例

(1) 掘削に伴い崩壊が発生した岩盤斜面への適用例

鷲見と八嶋¹¹⁾は、本論文で提案した検索手法のうち水圧と地震力を考えない場合について、実岩盤への適用性を検討している。検討には、実際にくさび型崩壊が発生した岩盤掘削斜面が用いられた。その結果、提案手法は、当該斜面で発生した主要なくさび型すべり面を不安定なくさび型不連続面として抽出し、実岩盤に対して有効であることが確認された。

ここでは、水圧と地震力を考慮した場合の提案手法を、この岩盤掘削斜面に適用した例を紹介する。

a) 斜面状況

評価対象斜面は、図-15に示す延長約50m, 高さ約

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)	通過位置		
			X座標	Y座標	Z座標
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

55m, 勾配1:1.0~1:0.3の岩盤掘削斜面である。斜面内には複数の不連続面が存在し、掘削完了間際に様々な規模のくさび型すべりが発生した。斜面の地質状況や崩壊の経緯については、鷲見と八嶋¹³⁾に詳しく述べられている。

表-1に現地計測で得られた不連続面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。図-15に示した掘削斜面中軸部の高さ約45m, 幅約15mに及ぶ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)に沿って発生したものである。

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ている。構成岩片の人工不連続面のすべり摩擦角は、傾斜台上に設置した岩片が不連続面に沿ってすべり始める角度を計測するティルト試験により、23±2度の値が得られている。なお、人工不連続面は、ダイヤモンドカッターによる切断面を150番カーボラダムにて研磨し作成されたものである。試験片は自然乾燥状態にあり、接触面積は10~32cm²であった。また、岩片の実測密度は2.696g/cm³であった。

b) 不安定なくさび型不連続面の検索結果

表-2のくさび型不連続面について、実際に崩壊が発生した時の条件(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、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。また、地震時の震度は $k_h=0.20$ とし、水と岩盤の単位体積重量比は岩片の実測密度をもとに $\rho_w/\rho=1/2.696$ と仮定した。

表-3 くさび型不連続面の見掛けのすべり摩擦角

不連続面の組合せ	交差線傾斜角	挟み角	見掛けのすべり摩擦角			
			水圧と地震力を考慮せず	地震力を考慮	水圧を考慮	地震力と水圧を考慮
K1-K2	63.5	96.7	29.0	17.7	14.8	3.5
K1-K4	35.1	78.8	33.3	22.0	16.6	5.3
K1-K12	30.8	90.2	29.7	18.4	11.8	0.5
K3-K4	39.7	56.1	38.9	27.6	0.0	0.0
K5-K6	40.4	71.1	34.7	23.4	8.5	0.0
K6-K11	36.8	59.0	38.9	27.6	0.0	0.0
K7-K8	46.7	37.2	52.6	41.3	3.6	0.0
K9-K10	26.7	57.2	40.2	28.9	2.1	0.0
K13-K14	30.4	38.4	52.2	40.9	30.4	19.1

単位: 度

表-4 提案手法による検索結果の比較

不連続面の組合せ	共通			水圧と地震力を考慮せず	地震力を考慮	水圧を考慮	地震力と水圧を考慮		
	条件1	条件2	条件3	条件4	判定	条件4	判定	条件4	判定
K1-K2	●	●	—	●	—	●	—	●	—
K1-K4	●	●	●	●	▼	●	▼	●	▼
K1-K12	●	●	●	●	▼	●	▼	●	▼
K3-K4	●	●	●	●	▼	●	▼	●	▼
K5-K6	●	●	●	—	▼	●	▼	●	▼
K6-K11	●	●	●	—	—	●	—	●	—
K7-K8	●	●	●	—	—	●	—	●	—
K9-K10	●	●	●	—	—	—	—	—	—
K13-K14	●	●	●	—	—	—	—	—	—

●: 条件を満足 ▼: 不安定なくさび型不連続面

提案手法により求めたくさび型不連続面のすべり摩擦角を表-3に示し、不安定な不連続面の検索結果を表-4に示す。水圧と地震力が作用しない条件では、4組のくさび型不連続面が不安定な不連続面として抽出された。そのうちの主要な3組のくさび型不連続面に沿って、実際に岩盤すべりが発生した。逆に、一部のくさび型不連続面で検索結果と実際の挙動が一致しなかった。その原因について鷲見と八嶋¹³⁾は、別のくさび型すべりに派生した二次すべりの可能性や、不連続面のすべり摩擦角を決定論的に取り扱ったことによる評価誤差を指摘している。

一方、地震力を考慮した場合には、水圧と地震力が作用しない場合に2組を加えた合計6組のくさび型不連続面が不安定な不連続面として抽出された。また、水圧を考慮した場合には、さらに2組を加えた8組が岩盤すべりに対して危険なくさび型不連続面として抽出された。したがって、地震時や豪雨時における斜面の安定性を評価する場合には、これらの抽出されたくさび型不連続面について詳細な安定解析を行う必要がある。

(2) 豪雨に伴い崩壊が発生した岩盤斜面への適用例
硬質岩盤に限らず、軟質岩盤や土砂斜面のすべり破

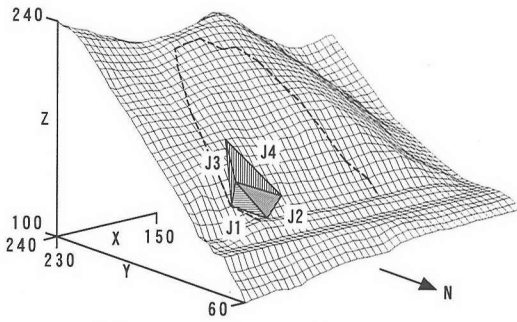


図-16 崩壊が発生した斜面の鳥瞰図
ハッチ部分:一次崩壊箇所
点線部分:崩壊最終形
J1~J4:不連続面名

壊においても、すべり面形状がくさび型を呈する場合には、少なくともすべり出しの時点ではくさび効果が発揮されるものと考えられる。ここでは、豪雨により崩壊が発生した強風化岩盤斜面に提案手法を適用した例を紹介する。

a) 斜面状況

1999年9月の集中豪雨により、岐阜県美濃市内の山地斜面において大規模崩壊が発生した。当該斜面は、基部を自動車道が通り、路側に最大高さ約45mの切土法面が構築されていた。崩壊は、この切土法面部分に発生した幅約40m、長さ約50mの一次崩壊に始まり、断続的に拡大して、最終形は幅120m、長さ152mに達した。図-16に崩壊最終形の範囲を点線で示す。

斜面の地質は美濃帯堆積岩類に属する中〜古生代のチャート、砂岩、頁岩からなり、崩壊は主にチャートの強風化岩盤中に発生した。ボーリング調査や数値解析¹⁷⁾などにより、最終形の崩壊モードは円弧すべりであったと考えられている。これに対して一次崩壊は、崩壊崖が角形を呈することから、平面すべりに近いものであったと考えられる。ここでは、一次崩壊を平面すべりとみなし、水圧が斜面安定に与えた影響を提案手法により検討する。一次崩壊の崩壊面は、崩壊崖の形態から、図-16のハッチ部分で示す4つの不連続面で近似した。

表-5に作図により求めた不連続面の幾何データをまとめる。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。また、岩盤の密度は、強風化岩盤の代表値¹⁸⁾である 2.1g/cm^3 を採用した。

b) 不安定なくさび型不連続面の検索結果

表-5の不連続面について、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、地震時の震度は $k_n=0.20$ と仮定した。

提案手法により求めたくさび型不連続面のすべり摩擦角を表-6に示し、不安定なくさび型不連続面の検索結果を表

表-5 不連続面の幾何データ

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	334.0	28.3	175.0	105.0	133.5
J2	22.0	26.6	175.0	105.0	133.5
J3	342.0	55.7	175.0	145.0	175.3
J4	17.0	55.5	175.0	145.0	175.3

表-6 くさび型不連続面の見掛けのすべり摩擦角

不連続面	交差線	挟み角	見掛けのすべり摩擦角		
			水圧と地震力を考慮せず	水圧を考慮	地震力を考慮
J1-J2	25.3	158.3	28.4	14.5	17.1
J1-J3	6.7	97.0	34.6	12.3	23.2
J1-J4	25.4	116.0	30.6	9.8	19.3
J2-J3	22.7	113.4	31.0	9.7	19.7
J2-J4	3.8	98.2	34.2	11.9	22.9
J3-J4	54.3	151.3	28.8	14.9	17.5

単位: 度

表-7 提案手法による検索結果

不連続面の組合せ	共通条件3	水圧と地震力を考慮せず		水圧を考慮		地震力を考慮	
		条件1	条件2	条件1	条件2	条件1	条件2
J1-J2	●	●	●	●	●	▼	●
J1-J3	●	●	●	●	●	●	●
J1-J4	●	●	●	●	●	●	●
J2-J3	●	●	●	●	●	●	●
J2-J4	●	●	●	●	●	●	●
J3-J4	●	●	●	●	●	●	●

●: 条件を満足 ▼: 不安定なくさび型不連続面

-7に示す。検索の結果、水圧と地震力が作用しない条件では、不安定なくさび型不連続面は抽出されなかった。一方、水圧を考慮した場合には、くさび型不連続面J1-J2が不安定なくさび型不連続面として抽出された。この結果は、当該斜面が常時において安定した状態にあるものの、地下水水位が地表付近まで上昇した場合にはJ1-J2に沿ってすべりが発生することを表している。これは、当該斜面の一次崩壊の原因が、地下水状態の変化にあったことを裏付けるものである。また、地震力を考慮した場合にも、J1-J2が不安定なくさび型不連続面として抽出され、地震動が崩壊の要因になり得ることを示している。

7. 結論

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。本論文では、この問題に対し、多数の不連続面群の中から不安定なくさび型不連続面を検索するための手法を提案した。提案手法は、不連続面位置とくさび効果、水圧、地震力を考慮できることを特徴とする。この手法をモデル斜面や実岩盤

斜面に適用した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 多数の不連続面群をランダムに発生させたモデル斜面では、提案手法により、不安定なくさび型不連続面数が全くさび型不連続面数の1/6~1/33に絞り込まれた。
- 2) 掘削や豪雨に伴い岩盤崩壊が発生した斜面では、実際の崩壊に関わった不連続面が不安定なくさび型不連続面として抽出され、提案手法の実岩盤への適応性が確認された。

本論文では、岩盤崩壊として岩盤すべりのみを取り扱ったが、今後はトップリング崩壊なども含めた検索手法を開発していく必要がある。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Shi, G.H. and Goodman, R.E.: Discontinuous deformation analysis, *Proc. 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, pp.269-277, 1984.
- 3) Aydan, ., Ichikawa, Y. and Kawamoto, T.: Numerical modelling of discontinuities and interface in rock mass, 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.
- 4) 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.
- 5) Hoek, E and Bray, J.W.: *Rock Slope Engineering*, Revised 3rd edition, The Institution of Mining and Metallurgy, pp.341-351, 1981.
- 6) R.E.グッドマン: 不連続性岩盤の地質工学, 森北出版, 371p., 1976.
- 7) 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.
- 8) 土木学会: 岩盤斜面の調査と対策, 丸善, 376p., 1999.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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, 印刷中
- 12) 例えば 高谷精二: 鹿児島市滝ヶ水, 平松地区の山地崩壊と地質—平成5年8月の豪雨被害—, 応用地質, Vol.37, No.1, pp.57-63, 1996.
- 13) 菊池宏吉, 水戸義忠: 国道229号線豊浜トンネル上部斜面の岩盤崩落メカニズムに関する地質学的考察, 応用地質, Vol.39, No.5, pp.456-470, 1998.
- 14) 大西有三, 大津宏康: 有限要素法による不連続体の応力・変形・浸透流解析, 土木学会論文集, No.322, pp.111-120, 1982.
- 15) 地盤工学会阪神大震災調査委員会: 阪神・淡路大震災調査報告書, 594p., 1996.
- 16) 岩の力学委員会: 不連続性岩盤と構造物に関する研究報告書, 地盤工学会, pp.79-82, 1995.
- 17) 鷺見武富, 張鋒, 八嶋厚, 大野和英, 池村猛: ひずみ軟化型弾塑性構成式に基づいた土-水連成解析による岩盤斜面の進行性破壊に関する研究, 第36回地盤工学研究発表会予稿集, pp.2311-2312, 2001.
- 18) 応用地質学会: 岩盤分類, 応用地質特別号, 189p., 1984.

(2000.8.25 受付)

A METHOD FOR EXTRACTION OF THE UNSTABLE WEDGE IN ROCK SLOPE CONSIDERING WATER PRESSURE AND SEISMIC FORCE

Taketomi SUMI and Atsushi YASHIMA

In a three-dimensional analysis of slope stability in discontinuous rock, it is very important to identify discontinuities which should be evaluated. Also the seismic force and water pressure which act to the rock-blocks affect to their stability. In this paper, a simplified method for extraction of the unstable wedge is proposed by formulating the wedge type failure condition of the rock slope, considering the water pressure and seismic force. The failure condition is formulated without the shape and scale of rock-blocks. Therefore, the proposed method is useful to evaluate the stability of surface wedges in rock slope with complex form.