

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

IDENTIFICATION OF SLIDING ROCK BLOCK AND STABILITY OF DISCONTINUOUS ROCK MASS

太田秀樹*・大森晃治**・寺田武彦***
By Hideki OHTA, Kouji OHMORI and Takehiko TERADA

The three dimensional geometry of the planes of separation sitting inside a discontinuous rock mass is of primary importance in analysing the stability of the rock slope consisting of ground surface and discontinuity in the rock mass. This paper proposes a method to handle such geometrical problem by dividing the rock slope into a number of small cubes. The location of the planes of discontinuity is also put into a computer by using a certain set of indices allocated to each of the cubes. The equilibrium of the forces acting on a block of rock which may possibly slide during/after construction work is then calculated in the computer following a proposed procedure. The proposed method of rock block identification and stability analysis is then applied to a case history of an actual slide of a rock mass caused by cutting of a slope. The result indicates that the influence of the ground water level on the stability of a rock mass is in accordance with the stability of the rock mass monitored during the construction work.

Keywords : rock slope, stability analysis, ground surface, discontinuous plane, cubic element

1. はじめに

不連続面が分布する岩盤斜面では、切土によってしばしば不連続面をすべり面とした斜面崩壊が発生する。その場合、形成されるすべり岩体の大きさやすべりの方向は、不連続面の分布形態と地表面の形（切土する方向と形）によって、決定づけられたものとなる。したがって、不連続面が分布する岩盤斜面の安定性を議論する場合、地表面と不連続面で囲まれるすべり岩体が形成されるのかどうか、また、形成された場合、そのすべり岩体はどういう形状でどの程度の大きさであるのかが、重要なポイントとなる。そのため、地表面および不連続面の実際の分布をできるだけ忠実に解析に取り込む必要がある。一般に地表面は等高線図として、一方、不連続面は走向・傾斜角によって表わされることが多い。しかし、現在用いられている斜面安定解析方法には、切土断面において単位奥行き当たりで力のつり合い式を解く方法と、地表面および不連続面を平面で近似して三次元的に

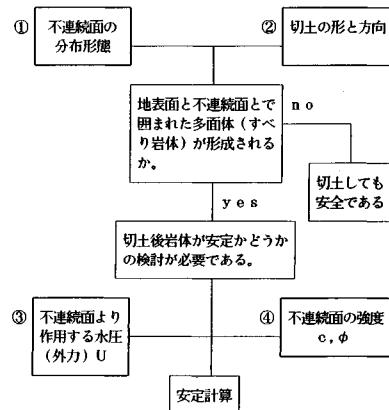


図-1 不連続性岩盤斜面における安定性の要因

解析する方法 (Hoek and Bray¹⁾, 1977) などがあるが^{2)~7)}、いずれの方法も地表面の凹凸等の形状もしくは、不連続面の走向・傾斜を忠実に考慮することができず、実際のすべり岩体を単純な形状に近似して取り扱わざるを得ないものとなっている。

本研究は、実際の斜面形状および不連続面の走向・傾斜をできるだけ忠実に考慮でき、これに基づいて、岩盤斜面の安定性を評価できる新しい解析手法の開発を試み

* 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科
(〒920 金沢市小立野2-40-20)

** 正会員 工修 (株)ホクコク地水
(〒921 金沢市御影町25-1)

*** 正会員 工修 佐藤工業㈱
(〒541 大阪市中央区北浜1-25)

ている。図-1に示す各要因を数量化し、実際の地表面と不連続面で囲まれる岩体が、切土時にどの位置にどの程度の大きさで生じるかを地形図上で明確に示す。これにより、

- 1) 切土前の踏査等で得られる湧水や不連続面の位置から、切土時に危険な箇所を選定し得ること
 - 2) 切土中にのり面に現われた湧水や不連続面の形態が、当初予測したものと異なった場合、得られたデータから次の切土に対する安定性を再評価できること

を目標としている。

本論文では、①地表面および不連続面を数量化し、②実際にどのような形ですべり岩体が形成されるのか、を特定する。さらに、③不連続面が分布する岩盤斜面における三次元斜面安定解析手法の提案を行い、④実際の斜面へ適用した結果を報告する。

2. 現行解析法のもつ問題点

岩盤斜面の現行解析法としては、Hoek・Bray¹⁾による方法が有名である。この解析法は、地表面および不連続面を平面とみなし、各平面に立てた法線ベクトルを用いて、岩体のつり合い式を導いている。すべり岩体の大きさ、すべりの方向および安定計算はすべて岩体のつり合い式を解くことにより算出されているが、その解析にあたっては、以下のことが前提とされている。

- 1) 解析の対象となる斜面は、簡単なモデル斜面に置き換えることができねばならない。
 - 2) 不連続面は最高3面までしか考慮できない。
したがって、現行解析法においては以下の問題点が挙げられる。
 - 1) モデル斜面に置き換える際に、地表面の形状を平面でしか近似できない。
 - 2) 4面以上の不連続面により形成されるすべり岩体は、取り扱うことができない。

3. 直方体要素を用いた解析手法

本研究では、解析範囲を微小な直方体要素に分割し、地表面および不連続面の位置情報（インデックス）を対応する直方体要素に割り付けることにより、すべり岩体を識別する方法をとった。この方法によって、地表面および不連続面で囲まれたすべり岩体の面積、重量を機械的に求めることができる。このすべり岩体に作用する外力のつり合いを計算することによって、すべりに対する安全率を算定できる。

すべり岩体の識別方法を要約すると以下のようになる

- 1) Y 軸を北, X 軸を東, Z 軸を高さとする三次元座標において、対象斜面を含む解析範囲を設定する

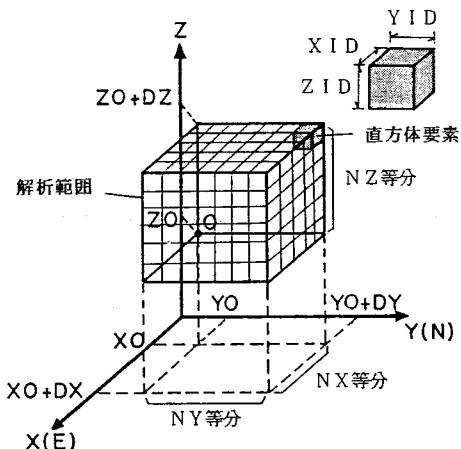


図-2 解析範囲と直方体要素

2) 解析範囲の原点座標 O (XO, YO, ZO) (m), 各辺の長さ DX , DY , DZ (m), 各辺の分割数 NX , NY , NZ (m) とするとき, 解析範囲を一辺の長さがそれぞれ
 $XID = DX/NX$ (m)
 $YID = DY/NY$ (m)
 $ZID = DZ/NZ$ (m)

から構成される直方体要素に分割する(図-2)。

次に、この直方体要素を用いた(1)地表面の処理、(2)不連続面の処理、(3)すべり岩体の処理、について説明する。

(1) 地表面の処理

地形図の等高線を標高 (Z) 一定の X , Y 座標の点列と考え(図-3(a)左上), その点列を解析範囲内の直方体要素に対応させることにより(図-3(a)右上), 地表面は三次元的な曲面として表現することができる(図-3(a)下).

また、直方体要素に対応する等高線点列がない箇所については、一次の線形補間により高さ(Z)を算出する。

ここで、解析範囲内の直方体要素を、地表面より上{要素のインデックス：-1}、地表面と一致{要素のインデックス：0}、地表面より下{要素のインデックス：1}の3種類に区分する。この方法によって、任意標高の地表面を定義することができるようになる。

(2) 不連續面の処理

解析範囲中の不連続面は、平面で近似されるものとする。不連続面を表わす傾斜方位(最急傾斜線の示す方位、北から時計回りに角度で示す。: α)、傾斜角(水平面からの俯角: ϕ)および測定位置(X_0, Y_0, Z_0)を用いることにより、不連続面を示す平面の方程式が次のように記述できる。

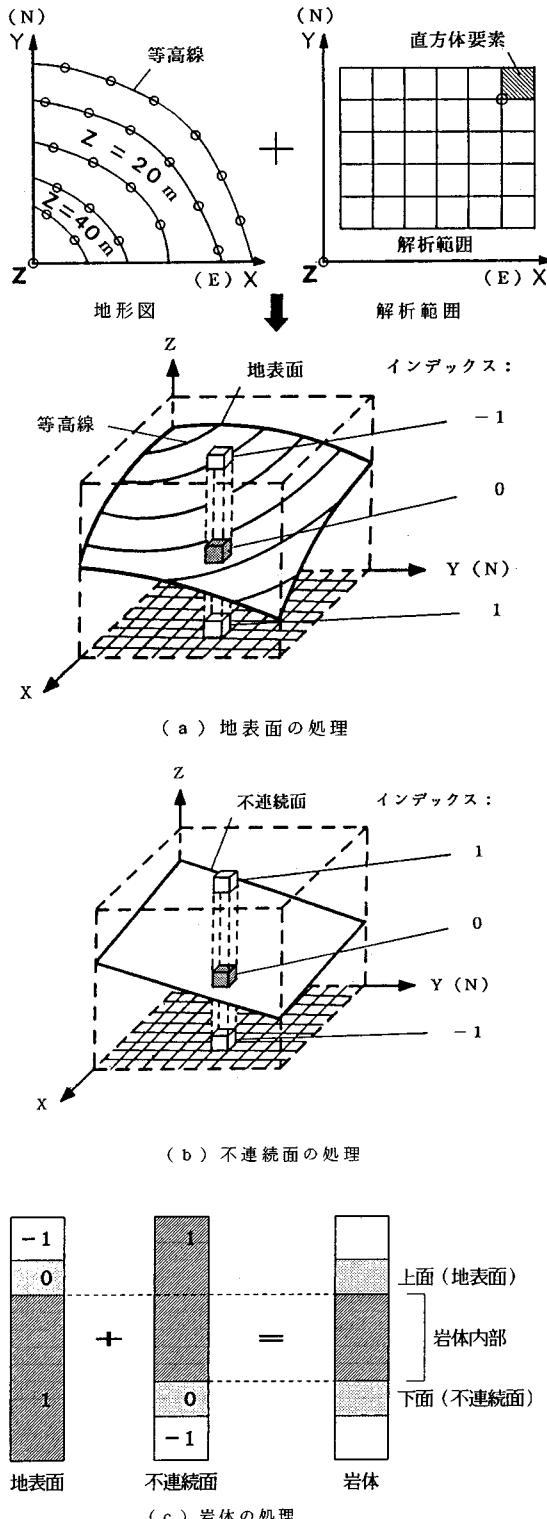


図-3 直方体要素を用いた岩体の識別方法

ただし、
 $a = \tan\phi \sin\alpha$
 $b = \tan\phi \cos\alpha$
 $c = 1$
 $d = (\tan\phi \sin\alpha)X_0 + (\tan\phi \cos\alpha)Y_0 + Z_0$

とおいた。

いま、解析範囲はすべて直方体要素に分割されているから、不連続面の位置を表わす式(1)を定義することによって、どの直方体要素に不連続面が含まれるかを指標として割り付けることができる。このような指標の割り付けは、地表面の場合と同様に以下のように行う。

解析範囲内の直方体要素を、地表面と不連続面との間にある範囲(要素のインデックス：1)，不連続面を含むもの(要素のインデックス：0)，解析範囲の底面と不連続面とで囲まれる範囲(基盤領域){要素のインデックス：-1}の3種類に区分する(図-3(b))。ただし、不連続面が複数面存在する場合には、すべり岩体は必ずしも、不連続面の上部ばかりに位置するものではない。そのため、個々の不連続面に対して、その不連続面を境とした上/下部で、すべり岩体である可能性を試行錯誤しながら決定しなければならない。本解析では、この試行錯誤による作業をコンピュータ・プログラム化して行った(フローチャートは図-4に示す)。

(3) すべり岩体の特性

(1), (2)の処理によって、解析範囲内の地表面位置・

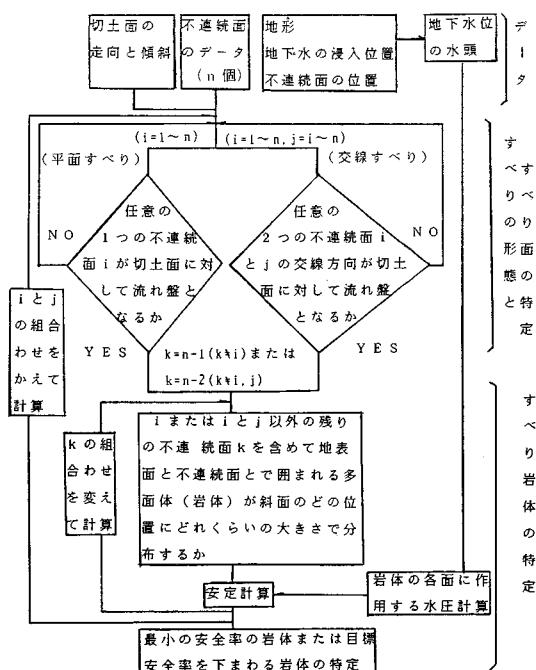


図-4 すべり岩体の決定方法

形状、不連続面位置が特定できる。すべり岩体は、これら地表面および不連続面によって囲まれる領域として決定できる。このすべり岩体に作用する外力(重力、水圧)のつり合い状態を検討することによって安定計算が行われるが、このとき、すべり岩体の重量、すべり面面積の把握が重要となる。以下にその算定方法について述べる。

a) すべり岩体の形状

すべり岩体の重量、すべり面面積を算定するには、すべり岩体の形状を求めておかねばならない。すべり岩体は、解析範囲内で直方体要素の集合として、次のように求められる。

各直方体要素は、地表面およびそれぞれの不連続面に對して、位置関係が指標（インデックス）として割り付けられている。それゆえ、すべり岩体となる可能性のあるものは、この各指標の交わりの部分（インデックスが1）となる。図-3は、すべり岩体を搜し出す手順を説明したものである。

解析範囲内の同一地点において、地表面および不連続面を含む直方体要素列に着目する（図-3（a）、（b））。両者の直方体要素をZ軸正方向について比較していく。すると、岩体内部は直方体要素のインデックスがすべて1の共通部分となり、岩体表面は1つのインデックスのみが0で、残りすべてが1の部分として表現される（図-3（c））。

上記の処理を解析範囲内のすべての地点で行うことにより、岩体の形状が決定される。

b) 重量と面積

次に、重量と面積の求め方を述べる。いま、2つの不連続面と地表面により形成される岩体を考える（図-5）。

岩体の形状は a) で述べたように、直方体要素の組合せにより表現したので、岩体を構成する直方体要素の全個数を N 、直方体要素 1 個の体積を $V_{\text{BOX}} (= \text{XID} \times \text{YID} \times \text{ZID})$ 、岩体の単位体積重量を γ_t とすると、岩体の重量 W は式(2)で表わされる。

また、不連続面1の面積 A_1 については岩体を $X-Y$ 平面に投影した面積より求めることができる。すなわち、 $X-Y$ 平面上で不連続面1が分布する部分の直方体要素の個数を N_1 、直方体要素の底面積を $A_{\text{box}}=(XID \times YID)$ 、不連続面1の傾斜角を ψ_1 とすると、不連続面1の面積 A_1 は

となる。

c) 各面にかかる水圧

すべり岩体の安定性を検討する場合、水圧の考慮が重要である。地盤内の水位は降雨等により変化し、水位の変化はすべり岩体の安定性に影響を及ぼすと考えられる。ここでは、水圧をすべり岩体に作用する外力として安定計算に組み入れ、その水圧は各地点での水位を連ねた水頭線を用いて定量化した。すなわち、水頭線を等高線と同様に扱い、水頭面を三次元的曲面として表わす(図

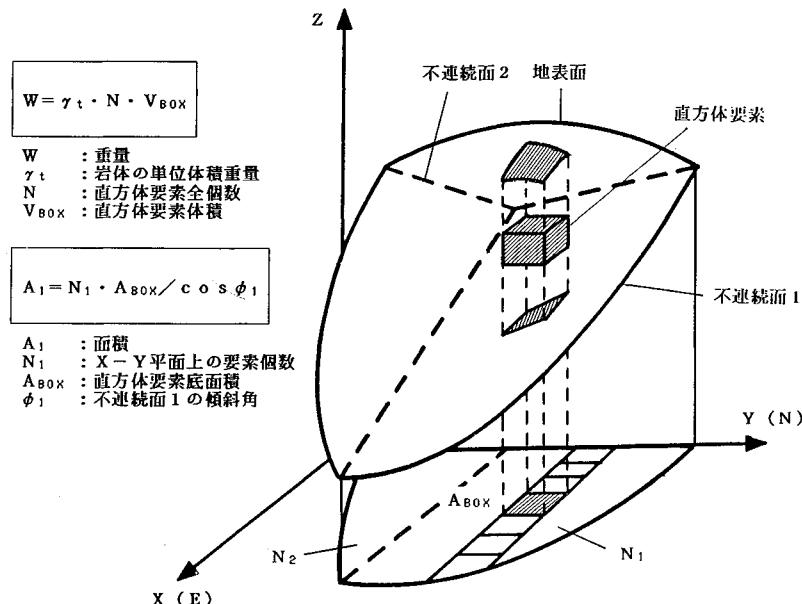


図-5 重量と面積

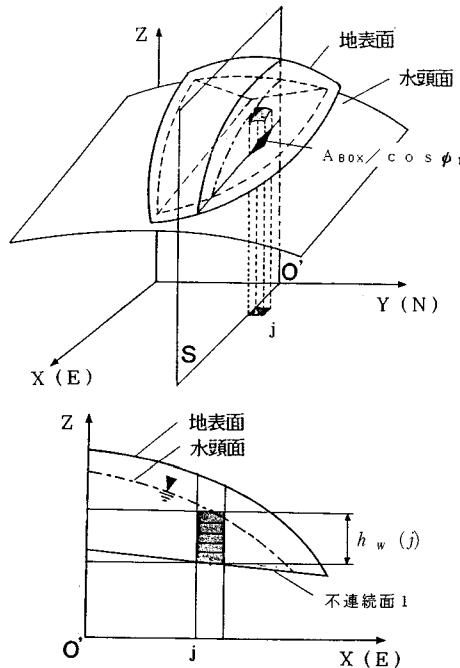


図-6 不連続面にかかる水圧

-6(a)).

ここで、不連続面 1 にかかる水圧 U_1 を考える。図-6(b)に示すように、不連続面 1 の j 点における水位差 $h_w(j)$ は、直方体要素の個数として表わされる。また、水位差 $h_w(j)$ がかかる部分の面積は $A_{\text{BOX}}/\cos \phi_1$ として表わされる。したがって、 j 点における水圧 $U_1(j)$ は式(4)により表わされる。

以上により、不連続面 1 にかかる水圧 U_1 は、不連続面 1 が分布する領域において、 $U_1(j)$ の総和を求めることにより算出される。

4 安定解析法

岩体がすべり出すときの形態は、図-7に示すように、1つの面に沿ってすべり落ちる「平面すべり」か、もしくは、2つの面で形成される交線方向にすべり落ちる「交線すべり」に大別される。つまり、3つ以上の面に沿った形で岩体がすべる場合を考えると、上記以外の面は必ず間隙が生じるような形態となるからである（以下この面を分離面という）。したがって、岩体を構成する不連続面は以下のように分類される。

- すべり面：自重、抵抗力、水圧が作用する面
 - 分離面：水圧のみが作用する面

また、本研究の解析方法は、極限つり合い法を前提と

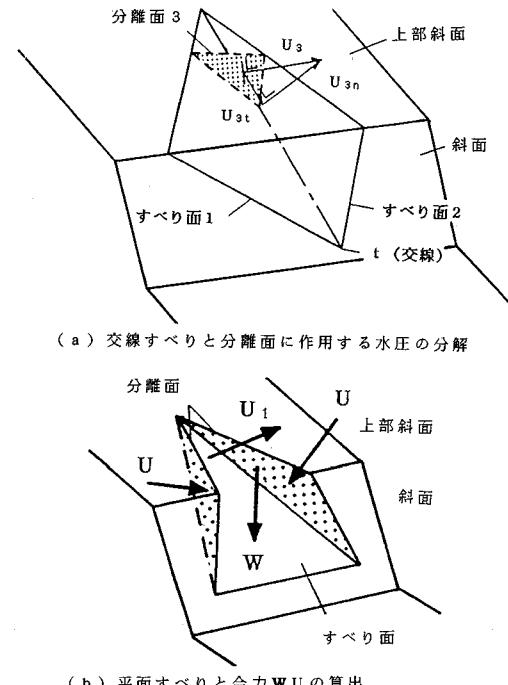


図-7 すべりの形態

しており、以下の事項を仮定した。

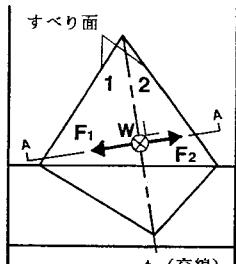
- モーメントの影響は無視できる。すなわち、トップリングや回転を伴うすべりは考慮しない。
 - すべり面のせん断強度は、 $\tau = c' + \sigma \tan \phi'$ (c' : 粘着力, ϕ' : 摩擦角) で定義される排水強度を用いる。
 - 安全率 F_S は次式で与えられるものとする。

$$F_s = \frac{\text{すべり面で発揮される抵抗力}}{\text{岩体が不連続面に沿ってすべる力}}$$

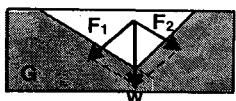
以下において、(1)交線すべり、(2)平面すべりの解析方法について述べる。

(1) 交線すべり解析 (フローチャート: 図-10)

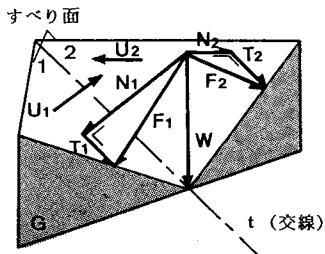
- 1) 各面に作用する力をすべり面と分離面に作用する力に分類する。
 - 2) 岩体の自重 W を交線 t と走向が直角な鉛直断面 G において、すべり面1, 2への成分 F_1, F_2 に分解する(図-8)。
 - 3) F_1 をすべり面1上で、面に垂直な成分 N_1 と交線 t 方向成分 T_1 に分解する。 F_2 についても、すべり面2上で同様の処理をする(図-9)。
 - 4) すべり面に作用する水压 U_1, U_2 は、面に垂直に作用すると考える。
 - 5) 分離面に作用する水压 U_3 については、交線 t 方向成分 U_{3t} と交線 t と直角な成分 U_{3n} に分解する(図-7(a))。



(a) 平面図



(b) A - A 断面

図-8 自重 W の分解図-9 F_1, F_2 の分解

6) 交線 t と直角な成分 U_{3n} については、各すべり面に垂直な成分 U_{3n1}, U_{3n2} に分解する。

7) 以上より、安全率 F_s は次式となる：

$$F_s = \frac{c'_1 A_1 + c'_2 A_2 + (N_1 - U_1 + U_{3n1}) \tan \phi'_1}{T_1 + T_2} + \frac{(N_2 - U_2 + U_{3n2}) \tan \phi'_2}{U_{3t}} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ただし、 c'_1, c'_2 は粘着力、 A_1, A_2 はすべり面面積、 ϕ'_1, ϕ'_2 は内部摩擦角を表わす。なお、下添字 1, 2 はそれぞれのすべり面における諸量である。

(2) 平面すべり解析 (フローチャート：図-11)

- 1) 岩体の自重 W と分離面に作用する水圧 U の合力 WU を求める (図-7(b))。
- 2) 合力 WU をすべり面と考える面上で、面に垂直な成分 N_1 とすべり方向成分 T_1 に分解する (図-12)。
- 3) すべり面に作用する水圧 U_1 はそのまま用いる。
- 4) 以上より、安全率 F_s は次式となる：

$$F_s = \frac{c'_1 A_1 + (N_1 - U_1) \tan \phi'_1}{T_1} \quad \dots \dots \dots (6)$$

ただし、 c'_1 は粘着力、 A_1 はすべり面面積、 ϕ'_1 は内部摩擦角を表わす。

以上の手順をコンピュータ・プログラム化することに

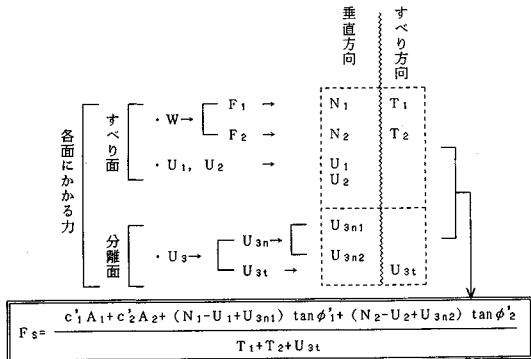


図-10 交線すべり解析

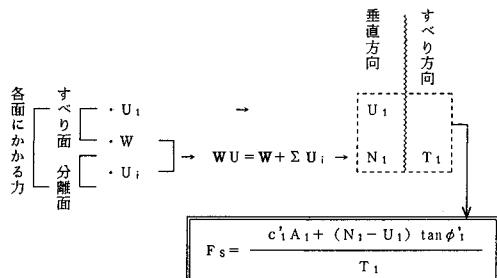
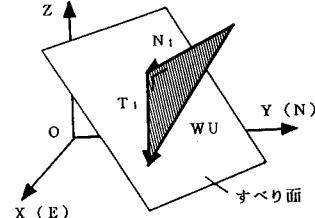


図-11 平面すべり解析

図-12 合力 WU の分解

よって、任意形状のすべり岩体の安定計算を行える。

5. 解析の精度

本研究の解析手法は、すべり岩体を直方体で近似しているため、すべり岩体の重量と面積の計算結果は誤差を含んでいる。そこで、解析の精度を確かめるために、図-13に示す一辺が 100 m、高さ 40 m のピラミッド型の斜面を想定して、2つの不連続面により形成されるすべり岩体の重量および底面積を求めてみた。不連続面 1 は鉛直面、不連続面 2 は水平面に仮定した。解析結果は図-14に示すとおりである。この図の横軸は解析範囲 ($100 \times 100 \times 100$ m) の分割数(各辺の等分割数: MESH)を示しており、縦軸は面積および重量を示している。また、図中の点線および実線は、面積および重量の理論値を示している。

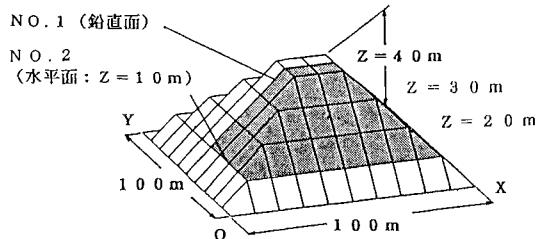


図-13 解析モデル

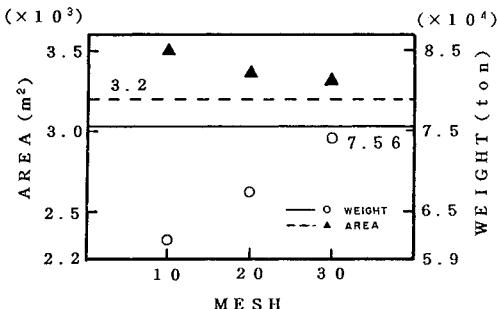


図-14 解析結果

図-14より、解析範囲の分割数を大きくするにつれ(直方体要素を小さくするにつれ)、面積および重量ともに理論値に近づくことがわかる。分割数30のとき、誤差3~8%以内で、面積および重量が求まる。また別に図-13に示すNo.2の水平面をZ=30mのところにして小さいピラミッドで同様の計算をしたところ、同じ分割数では6~16%とほぼ倍程度の誤差であった。したがって、本解析手法を用いる場合、想定されるすべり岩体に対して、適切な解析範囲を設定する必要があり、かつ、解析範囲の分割には十分に注意しなければならないことがわかる。

6. 解析事例

能登半島の軟岩から構成される地山において(図-15)、道路建設のために、斜面東側を切土したところ、斜面が崩壊した。そこで、実際にすべった不連続面A、B、Cにより形成される岩体について本解析法を適用してみた。

図-15に対象斜面の解析範囲(メッシュ化された部分)を示し、図-16に鳥かん図を示す。ここで、図-16より、斜面背後には小川が存在し、不連続面A、Bは小川を横切っているため、水みちとなっていることが推察される。

図-16において点線と斜線で囲んだ斜面に囲まれる範囲が不連続面A、B、Cにより形成されるブロック状岩体である。本解析手法により、この岩体の重量を計算し

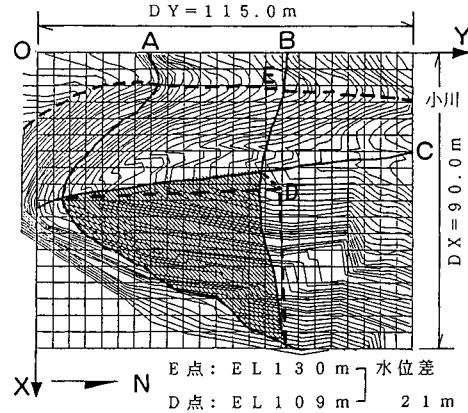


図-15 解析対象斜面

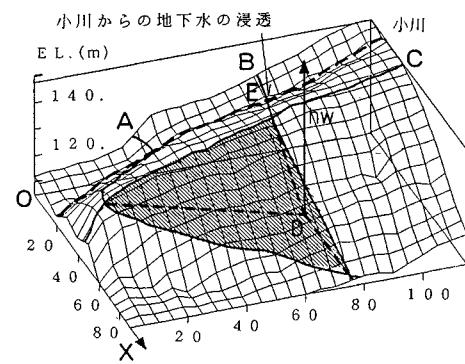


図-16 鳥かん図

た結果は図-17に示すとおりである。岩体の重量は、解析範囲の分割数を大きくするにつれ、ある一定値に収束しており、すべり岩体重量Wが24300tと求まる。また、各面の面積 A_A 、 A_B 、 A_C はそれぞれ1712.4m²、821.1m²、1295.4m²と求まった。

水圧については、斜面背後の小川から水の浸透が考えられるため、不連続面A、B、Cの交点をD点とし、D点からの水位 h_w を最大21m(斜面背後の小川のE点からの水位)まで変化させ、各面に作用する水圧 U_A 、 U_B 、 U_C を求めた。その結果を図-19(a)に示す。

強度定数としては、不連続面Aに介在する不搅乱粘土を圧密等体積一面せん断試験して得られた結果(粘着力 $c' = 0$ tf/m²、内部摩擦角 $\phi' = 22.5^\circ$)を用いている。実験結果を図-18に示す。粘土は薄いものであるから、排水強度を発揮するものと判断される。

この岩体の安定解析を行った結果を図-19(b)に示す。この図の横軸はD点からの水位 h_w および標高を表わし、縦軸は安全率を表わしている。水位 h_w が0mのとき、安全率 F_s は1.98で安全と判断されるが、水位 h_w が21m(小川から流入していると考えた場合)のとき、

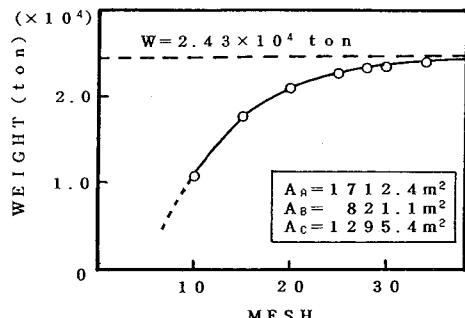


図-17 ブロック状岩体の重量

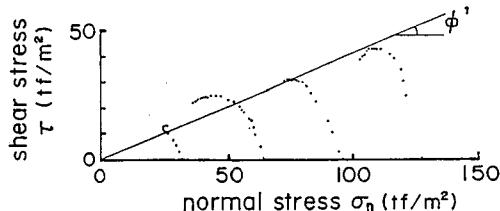


図-18 圧密等体積せん断試験結果

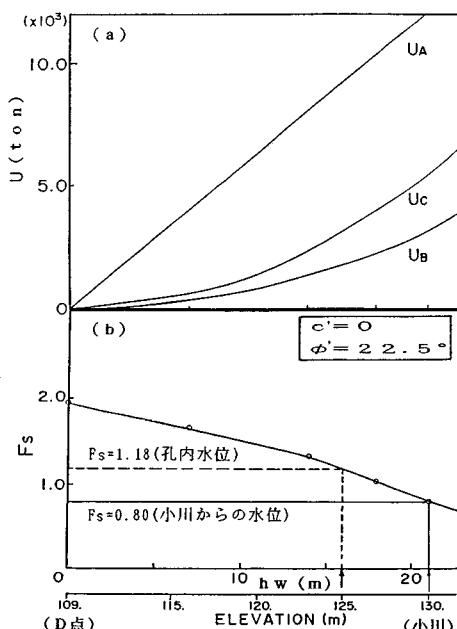


図-19 水位と安全率の関係

安全率 F_s は 0.80 で危険となる。水位変化が 16~21 m の範囲で、すべり岩体の安全率 F_s は約 1.2~0.8 の間を変化する。すべり岩体に作用する水圧の影響によって、すべり岩体の安定が著しく損なわれることがわかる。

斜面崩壊後 D 点付近に設置された孔内水位計の実測値によると、最大水位は 16 m 前後である。斜面崩壊後、

D 点付近の水位はいくらか低下していることを考慮すると、本解析法による計算が妥当であることがわかる。

7. おわりに

本論文では、不連続面が分布する岩盤斜面の安定性を検討するために、すべり岩体が地表面と不連続面で囲まれる多面体であることに注目し、微小な直方体要素を用いて、これを量量化する方法を考案した。また、岩体の諸量（重量、表面積および、各面に作用する水圧）を同方法を用いることにより算出し、安定解析を行う方法についても検討した。提案した解析手法によれば、解析範囲を約 3×10^4 個の直方体要素に分割すると、3~8%の誤差で量量化できることが明らかとなった。さらに、不連続面が数多く分布する地山においても、形成される岩体の形状の把握が可能となった。

しかし、不連続面の分布形状をいつ、どのような形で解析に取り込むかなどの問題点も残されている。つまり、切土時に問題となる不連続面の分布を、調査ボーリング孔を利用した不連続面の調査等によって、いかにして事前にみつけだすのか。また、実際の不連続面の分布を正確に把握できたとしても、不連続面上で作用する水圧、せん断強度をどれだけ正確に評価できるのか。などの調査・計測上の問題とも深くかかわるこれらの問題点の検討も今後図ってゆかねばならない。

平面すべりの場合、力のつり合い式を解くことによって安定解析を行ったが、この場合、すべり方向は作用する力の合力の方向となる。したがって、外力として分離面からすべり岩体に作用する水圧の大きさが異なると、すべり出す方向も同一岩体で異なったものとなる。言い換えると、岩体に作用する水圧の大きさによって、すべり出す方向が変化していくことになり、実際に岩体がすべきった方向と解析で求まるすべり方向とは、不連続面の分布状況によっては一致しない場合が生じ得る。このような場合は実際には少ないと考えられるが、今後はすべり方向を考慮した解析法を検討してゆかねばならない。

謝 辞：最後に、有益なご助言とプログラム作成にご助力を頂いた金沢大学工学部 飯塚 敦先生に感謝の意を表します。また、事例研究にあたって便宜をはかつて頂いた石川県庁 山本光利氏にも謝意を表します。

参考文献

- Hoek, E. and Bray, J.: Rock Slope Engineering, Revised second edition, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1977.
- 鵜飼恵三・細堀建司：簡易 Bishop 法、簡易 Janbu 法および Spencer 法の三次元への拡張、土木学会論文集, No. 394, pp.21~26, 1988.

- 3) 大西有三・鍵本広之：岩盤割れ目性状の評価方法に関する一考察，土木学会論文集，No. 400, pp.29~38, 1988.
- 4) 大西有三・長野恵一・藤川富夫：ブロック理論による不連続性岩盤掘削時の安定性評価について，土木学会論文集，No. 364, pp.209~218, 1985.
- 5) 鵜飼恵三・細堀建司：任意形状の地形とすべり面を有する斜面の安定解析，土木学会論文集(ノート)，No. 412, pp.183~186, 1989.
- 6) 吉中龍之進・山辺 正・藤田朝雄：ブロック理論による不連続性岩盤斜面の安定性評価に関する基礎研究，土木学会論文集，No. 418, pp.143~152, 1990.
- 7) 鵜飼恵三：分割法による斜面の三次元安定性の検討，土と基礎，Vol. 36, No. 5, pp.19~24, 1988.

(1990.3.30・受付)
