

# 三次元斜面安定問題に対する簡易離散化極限解析法の開発

## Development of simplified discrete limit analysis for three-dimensional slope stability problem

濱崎英作<sup>a)\*</sup>・竹内則雄<sup>b)</sup>・大西有三<sup>c)</sup>

Eisaku HAMASAKI, Norio TAKEUCHI and Yuzo OHNISHI

### Abstract

In this study, the new simplified discrete limit analysis technique for a three-dimensional slope stability problem is proposed, using the divided column as a three-dimensional element of RBSM (Rigid Body Spring Model). This approach is as easy as to use the slice method currently used in the conventional slope stability analysis and it helps to develop a planning of very effective slope protection work taking into account displacement of each column. In this model, a sliding surface constitutes a square, since a column is square. Then, the concept of the isoparametric element is introduced to define this surface. As a result of analyzing a three-dimensional slope stability problem using this model, we proved that the safety factor of a landslide can be calculated, such as a traditional approach, and it became possible to predict a motion of the whole body of the slope from displacement direction of each column.

**Key words :** slope stability, 3-dimension, RBSM (Rigid Body Spring Model), isoparametric element

### 和文要旨

本研究では、分割したカラムをRBSMの三次元要素として用い、三次元斜面安定問題に対する新しい簡易離散化極限解析手法を開発した。この方法を用いることで、従来の斜面安定解析の極限平衡法と同等の容易さでありながら、個々のカラムの変位に応じて、より効果的な対策工の立案が可能となる。このモデルでは、カラムが四角柱であるためすべり面は四角形となるが、この面の定義には有限要素法のアイソパラメトリック要素の概念を導入する。実際、本モデルを用いて三次元斜面の安定解析を行った結果、これまでの手法と同様に地すべり安全率を得ることが実証され、かつ個々のカラム変位方向から斜面全体の動きを把握することが可能となった。

キーワード：斜面安定、三次元、剛体ばねモデル、アイソパラメトリック要素

## 1. まえがき

地すべりに対するこれまで斜面安定解析手法の主流は二次元極限平衡法であったが、近年のコンピュータの発達により三次元極限平衡法解析やより高度な有限要素解析などもしばしば用いられるようになってきている。ただし、三次元にまで拡張した有限要素法などの数値解析は、境界条件の設定や物性値などの与え方に対し高度な専門的知識と経験を要し、かつ結果の解釈が困難なことも多く、解析経費・時間などの兼ね合いから、このような解析の出番はまだ特殊な現場に限られているといえる。

しかしながら、近年のコンピュータの解析能力の向上に鑑みれば、極限平衡法レベルでの三次元地すべり安定解析はもはや特殊な解析というわけではなく、かなり一般に普及されてきているのも確かである<sup>1)</sup>。また、多くの地すべり現場では、地質や地形などの規制が大きく関与し、例えば断層や風化変質部や泥質部などの特定の場所に生成されたスメクタイトなどにおいて、スリッケンサイドなどを有するすべり面形成プロセスを目の当たりにする。すなわち、現場技術者にとってみれば、地形、地質特性、地すべりの運動履歴などを調査することに

よって、すべり面の位置を特定していくことが重要であり、すべり面を既知とする三次元極限平衡法すべり解析の活用頻度は、有限要素法などの三次元数値解析に比べるとまだまだ高いものがある。

ところで、これまで三次元安定問題で採用される解析手法の多くが二次元Fellenius法の延長上にあるHovland法である<sup>2)</sup>。二次元Fellenius法がスライス側面に作用する内力の合力を平行と仮定している（厳密には無視している）のと同様に、Hovland法ではカラム間の側面力をゼロと仮定している。このため、例えば鶴飼<sup>3)</sup>や榎田他<sup>4)</sup>が指摘しているように、Hovland法は側方の拘束などの三次元形状効果を考慮し難い手法である。

このような問題を克服し三次元の形状効果を反映するため、二次元のJanbu法やBishop法、あるいはSpencer法を三次元にまで拡張しカラム側面に作用する内力の合力の作用点方向を仮定した解析法なども鶴飼らによって提案されている<sup>5)</sup>。

しかしながら、このような手法も、基本的にカラム側面間の合力の作用点や方向の仮定が必要で、三次元の場合はXY平面（水平面）上の1方向のみに運動方向を設定して安全率を導く手法となっている。もし変動方向が確定されていなければ、想定される範囲内で変動方向毎に安全率を求め、最小安全率の方向を探ることによって斜面の安全率を導く必要がある<sup>4)</sup>。ただ、実際のところ、例えば、鷲尾岳地すべり<sup>6)</sup>などのように、地すべり現場の多くで計測されている移動杭・GPSなどの変

\* 連絡著者／corresponding author

a) ㈱アドバンテックテクノロジー

Advantech Technology Co., Ltd.

〒980-0013 宮城県仙台市青葉区花京院1-4-8 チサンマンション花京院1202号

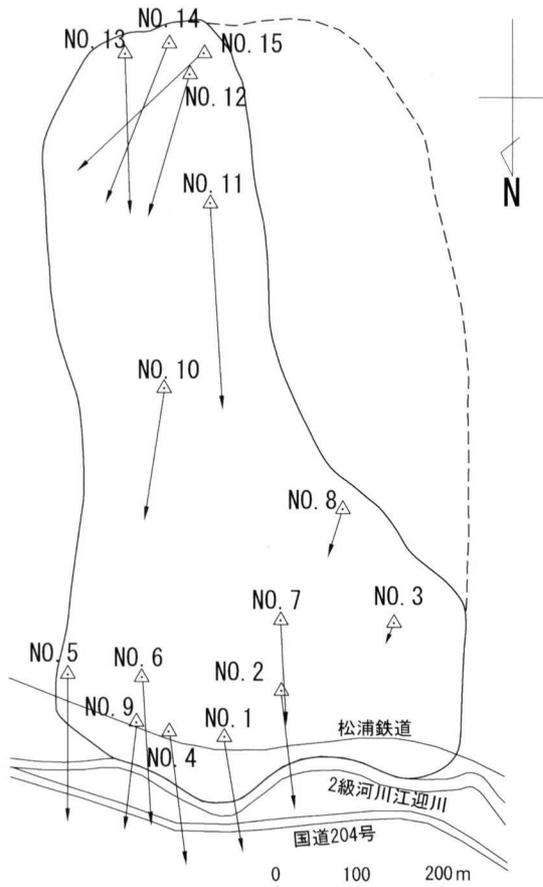
1-4-8-1202, Kakyoin, Aobaku, Sendai, Miyagi, 980-0013, Japan

b) 法政大学工学部システムデザイン学科

Department of Art and Technology, Hosei Univ.

c) 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻

Department of Urban and Environmental Engineering, Kyoto Univ.



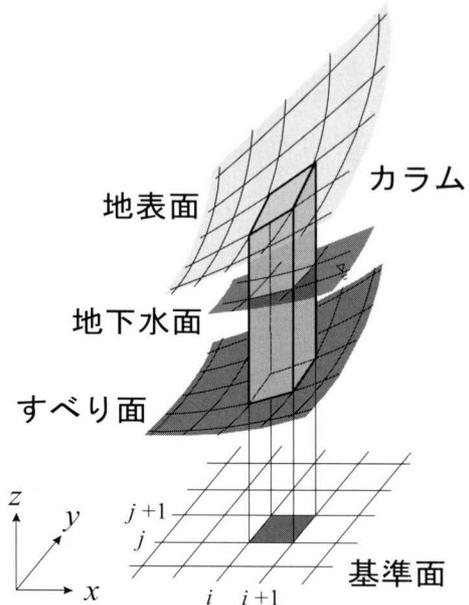
図一 鷲尾岳地すべりでの移動杭移動方向(木下ら, 2001)<sup>6)</sup>  
 Fig.1 Movement direction of observation posts in Washiodake landslide area (Kinoshita, 2001)<sup>6)</sup>

位方向を見れば, 地すべり移動体のすべての箇所, 必ずしも1方向のみに地すべりが変位していないことはしばしば認められることである。他方, 極限平衡モデルは, 斜面全体の仮想すべり方向を1方向に規定して安全率を導く手法であり, 現実とのギャップが少なからずある。

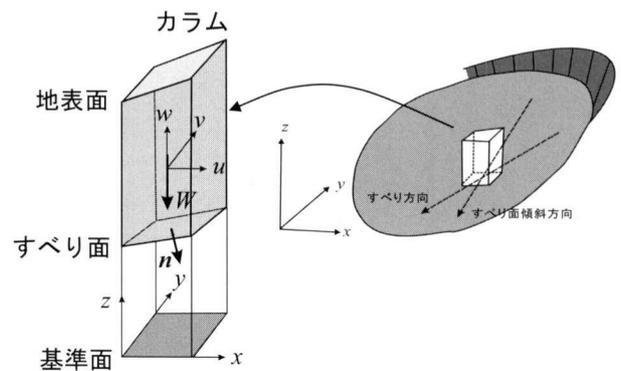
このような問題を解決するため, 著者らは要素間に蓄えられるエネルギーを用いて離散化方程式を導くRBSM(剛体-ばねモデル)に着目した<sup>7)</sup>。この方法によれば, 水平面上でメッシュ分割されたカラムどうしの側面間にペナルティ関数を適用した側面ばねを設定することで, カラムの変位に伴って力が伝達するしくみを作ることが可能となり, すべり面上の表面力から斜面の安全率を算定することができる<sup>8)</sup>。

この手法による入力データは, 従来の極限平衡法と全く同じであり, 移動体の単位体積重量( $\gamma_t$ )と粘着力( $C$ ), 内部摩擦角( $\phi$ ), および間隙水圧( $U$ )のみである。すなわち, 条件設定が平易でありながら, 個々のカラム変位を求めることが可能となるとともに, 三次元形状効果, とくに側方拘束条件を明確に反映することが可能である。

本論文では, この手法の考え方ならびに定式化を述べるとともに, 簡単なモデル解析から, 本手法が三次元効果の影響を考慮できることを示す。さらに, カラムの移



図二 分割法におけるカラム  
 Fig.2 3-dimensional discretization of sliding body by using columns



図三 カラムとその自由度  
 Fig.3 Degree of freedom of a column

動方向が斜面の安定性に与える局所的な影響について実際の地すべり解析により示す。なお, 本手法では, すべり面は四角形になるが, これをアイソパラメトリック要素でモデル化する手法も併せて提案する。

## 2. 離散化極限解析手法の導入

### 2.1 RBSMによるモデル化

Hovland法などの分割法による方法では, 図-2に示すように, 三次元斜面をxy平面のメッシュ状のカラム(四角柱)の集まりで表し, 極限平衡法を適用して各カラムのすべり面上の安全率を求める。

いま, このカラムをRBSMの三次元要素と考えて離散化極限解析を行えば, すべり面上の表面力が求められるため, これを用いて安全率を求めることも可能となる。本研究では分割法と同程度の簡便さで解析を行うことを目的とし, カラムをRBSMにおける1つの要素と考え, 図-3に示すようにx,y,z方向の3自由度のみを考える。

なお、本論においては地すべり範囲と不動地の境界に形成される四角柱以外のカラムは、取り扱わないものとする。さらに、RBSMでは回転自由度を考慮するのが一般的であるが、ここではカラムの変形を無視し、カラムの並進運動のみとりあげるという考え方から、回転変位は考慮しない。

2.2 簡易解析のための定式化

(1) カラム側面

RBSMでは、2要素間の相対変位を用いて、要素間に蓄えられるエネルギーを評価し、剛性行列を誘導する。本手法では、分割法と同じ考え方に基づき要素分割を行うため隣接要素関係は単純になる。

図-4はx方向の隣接要素関係を示した図である。この場合、接触面Aにおける相対変位は次のように求めることができる。

$$\delta = B_x u$$

$$\delta = \{\delta_n \delta_{sx} \delta_{sy}\}^T, u = \{u_I \ v_I \ \omega_I \ | \ u_{II} \ v_{II} \ \omega_{II}\}^T$$

$$B_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & | & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & | & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & | & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $u$ は変位ベクトルであり $u, v, \omega$ は $x, y, z$ 方向の変位成分である。また、下付き添字のI, IIは、図-4に示すカラムに対応している。

なお、 $\delta_n, \delta_{sx}, \delta_{sy}$ は、(1)式から明らかなように、接触面での法線方向相対変位とそれに直交する $y$ 方向、 $z$ 方向の相対変位である。

同様に、図-5に示すような $y$ 方向の隣接要素における相対変位 $\delta$ を求めると次のようになる。

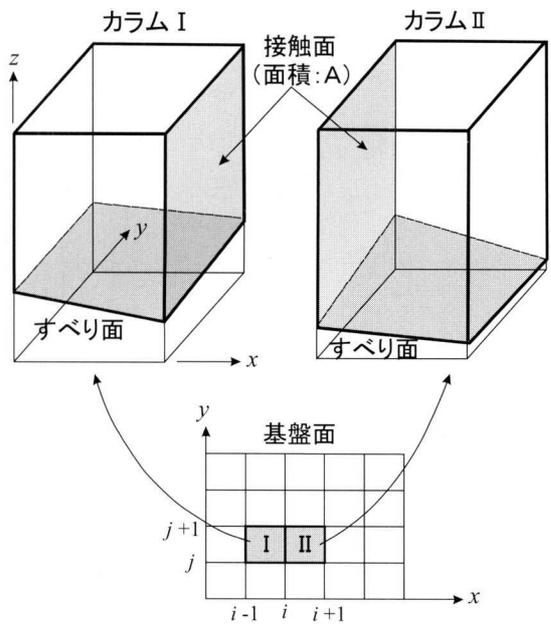


図-4 カラム間の接触面 (x方向)  
Fig. 4 Contact condition of columns in X-direction

$$\delta = B_y u$$

$$B_y = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & | & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & | & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & | & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

一方、カラム側面間の表面力 $\sigma$ は、以下のようにベナルティ関数を用いて求める。

$$\sigma = D_{side} \delta$$

$$\delta = \{\sigma_n \ \tau_{sy} \ \tau_{sz}\}^T, D_{side} = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3)$$

ここで $\sigma_n$ はカラム側面の単位面積あたり垂直方向表面力であり、 $\tau_{sx}, \tau_{sy}$ はせん断方向の表面力を示す。

したがって、カラム側面に蓄えられるエネルギーは接触面Aにおいて積分し、次のように求められる。

$$V_{side} = 0.5 \cdot u^T \int_A B_x^T D_{side} B_x dA u + 0.5 \cdot u^T \int_A B_y^T D_{side} B_y dA u \dots\dots\dots(4)$$

(2) すべり面

図-6に示すように、あるカラムにおけるすべり面が、

$$z = z(x, y) \dots\dots\dots(5)$$

で与えられるものとする。このとき、法線ベクトル $n$ は次のように表すことができる。

$$n = \left\{ -(\partial z / \partial x) i - (\partial z / \partial y) j + k \right\} / \sqrt{1 + (\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2} \dots\dots\dots(6)$$

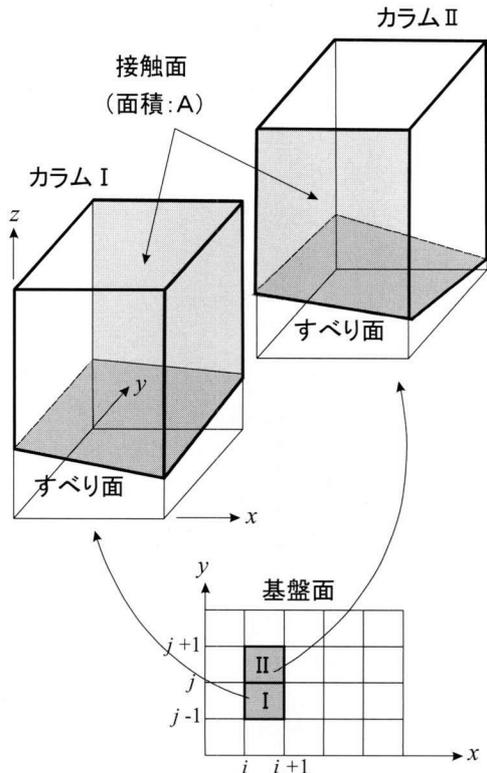


図-5 カラム間の接触面 (y方向)  
Fig. 5 Contact condition of columns in Y-direction

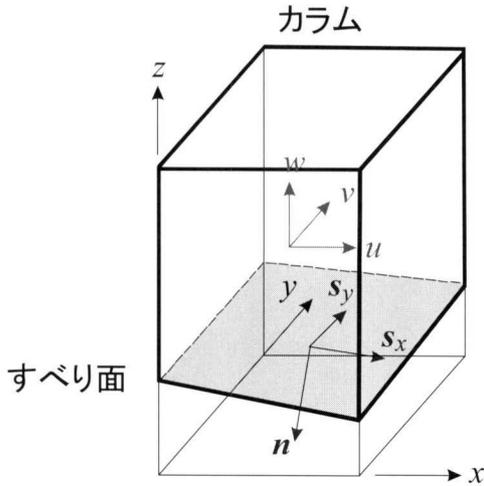


図-6 すべり面の法線ベクトル

Fig. 6 Normal vector and its direction at a sliding surface

同様にして, xおよびy方向の接線ベクトル $S_x, S_y$ を求めると次のようになる。

$$S_x = \left\{ i + \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right) k \right\} / \sqrt{1 + \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)^2}$$

$$S_y = \left\{ j + \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right) k \right\} / \sqrt{1 + \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right)^2} \dots\dots\dots(7)$$

ここで, カラムの変位ベクトル $u$ は, x, y, z方向の単位ベクトル $i, j, k$ から,

$$u = ui + vj + wk \dots\dots\dots(8)$$

で与えられる。このとき, 基盤部の動きはないものと仮定してすべり面上の相対変位 $\delta_n, \delta_{sx}, \delta_{sy}$ を求めると

$$\delta_n = u \cdot n, \quad \delta_{sx} = u \cdot S_x, \quad \delta_{sy} = u \cdot S_y \dots\dots\dots(9)$$

となる。したがって, 以下の関係が得られる。

$$\delta = Bu$$

$$B = \begin{bmatrix} -(\partial z / \partial x) / L & -(\partial z / \partial y) / L & 1 / L \\ 1 / L_x & 0 & (\partial z / \partial x) / L_x \\ 0 & 1 / L_y & (\partial z / \partial y) / L_y \end{bmatrix}$$

$$L = \sqrt{1 + (\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2}, \quad L_x = \sqrt{1 + (\partial z / \partial x)^2},$$

$$L_y = \sqrt{1 + (\partial z / \partial y)^2} \dots\dots\dots(10)$$

いま, すべり面上の相対変位と表面力の関係を

$$\sigma = D\delta, \quad D = \begin{bmatrix} \lambda n & 0 & 0 \\ 0 & \lambda s_x & 0 \\ 0 & 0 & \lambda s_y \end{bmatrix} \dots\dots\dots(11)$$

とすれば, すべり面上(接触面A)のエネルギーは

$$V_{slip} = 0.5 \cdot u^T \int_A B^T D B dA u \dots\dots\dots(12)$$

と評価される。なお,  $D$ はペナルティ( $\lambda$ )のばね行列である。

以上より, 系全体のエネルギーは次のようになる。

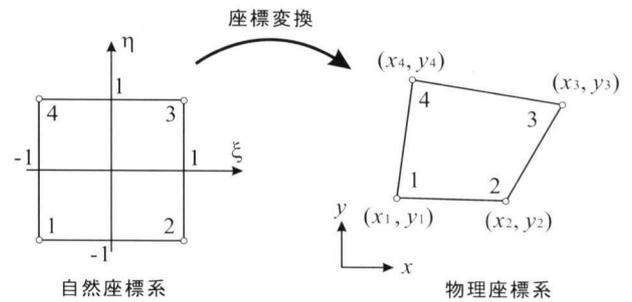


図-7 双一次アイソパラメトリック四辺形要素  
Fig. 7 Isoparametric element for a quadrilateral area

$$V = V_{side} + V_{slip} \dots\dots\dots(13)$$

この関係から離散化方程式を誘導することで, RBSMによる三次元離散化解析が可能となる。

### 2.3 すべり面勾配

前節で述べたように, すべり面の式 $z = z(x, y)$ を双一次アイソパラメトリック四辺形要素を用いて定義し, すべり面勾配を求める<sup>9)</sup>。図-7はこの要素の形状関数の一例を示したもので, 自然座標系( $x, y$ )と物理座標系( $\xi, \eta$ )の間に次の関係が成立している。

$$x(\xi, \eta) = \sum_{\alpha=1}^4 N_{\alpha}(\xi, \eta) x_{\alpha}, \quad y(\xi, \eta) = \sum_{\alpha=1}^4 N_{\alpha}(\xi, \eta) y_{\alpha} \dots\dots\dots(14)$$

ここで,  $N_{\alpha}$ は形状関数である。 $\alpha$ は四角形要素であることから,  $\alpha = 1 \sim 4$ となる。アイソパラメトリック要素では座標変換と同じ形状関数を用いて物理量を補間する。ここでは, 物理量として $z$ 座標を考え, (15)式のように考えて面を定義する。

$$z(x, y) = z(x(\xi, \eta), y(\xi, \eta)) = \sum_{\alpha=1}^4 N_{\alpha}(\xi, \eta) z_{\alpha} \dots\dots\dots(15)$$

このときすべり面の傾きは, (16)式で与えられる。

$$\begin{Bmatrix} \partial z / \partial x \\ \partial z / \partial y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial \xi / \partial x & \partial \eta / \partial x \\ \partial \xi / \partial y & \partial \eta / \partial y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial z / \partial \xi \\ \partial z / \partial \eta \end{Bmatrix} = J^{-1} \begin{Bmatrix} \partial z / \partial \xi \\ \partial z / \partial \eta \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(16)$$

ここで,  $J$ はヤコビアン行列である。この式(14)~(16)を式(7)に代入すれば矩形領域の面の法線ベクトル, 面の傾きを求めることができる(図-8)。したがって, 数値積分を用いて積分点毎にすべり面勾配を求めることができる。

本研究では積分点を中央1点として, この中心点での勾配をすべり面勾配と定義する。なお, 自然座標系では中心点の一点は( $\xi, \eta$ ) = (0, 0)となり, 矩形におけるx方向, y方向のそれぞれの中点ベクトルから導かれる法線ベクトルと一致する。

### 2.4 カラムの重量及び水頭高さ

カラムの重量及び水頭高さ, カラム底面のxy平面上

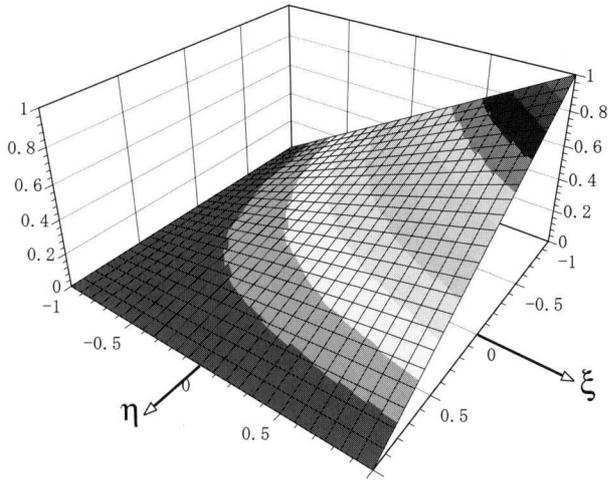


図-8 形状関数の例  
Fig. 8 An example of shape function

での中心点, すなわち対角辺の中点を結んでできる2線の交点を代表点としてその高さ成分を平均し計算する。

したがって, 四角柱においては図-9から下記のようになる。

- ・カラム地表面標高 ( $H_t$ )

$$H_t = (Z_{t1} + Z_{t2} + Z_{t3} + Z_{t4}) / 4 \quad \dots\dots\dots(17)$$

- ・カラム地下水面標高 ( $H_w$ )

$$H_w = (Z_{w1} + Z_{w2} + Z_{w3} + Z_{w4}) / 4 \quad \dots\dots\dots(18)$$

- ・カラムすべり面標高 ( $H_b$ )

$$H_b = (Z_{b1} + Z_{b2} + Z_{b3} + Z_{b4}) / 4 \quad \dots\dots\dots(19)$$

- ・カラム重量 ( $W$ )

単位体積重量を $\gamma_t$ とすると

$$W = \Delta X \cdot \Delta Y \cdot \gamma_t \cdot (H_t - H_b) \quad \dots\dots\dots(20)$$

- ・カラム中心水頭高さ ( $U$ )

$$U = H_w - H_b \quad \dots\dots\dots(21)$$

本手法では, 間隙水圧を含む水圧について荷重項をセットする際, この水頭高さをもってすべり面及び, カラム側方に対し, 各面の垂直方向に物体力として作用させる。したがって, すべり面上の表面力は, これらの間隙水圧などの作用力をすべて取り込まれた上での結果である。

**2.5 全体安全率**

RBSMによる離散化解析を行うと, 各カラムのすべり面での法線力 ( $N$ ) と接線力 ( $T_x, T_y$ ) の表面力が求められる。本解析手法では, この表面力を用いて, 式(22)の方法で安全率を求める。

$$F_s = \frac{\sum \{ \tan \phi \cdot N + C \cdot A \}}{\sqrt{(\sum T_x)^2 + (\sum T_y)^2}} = R/D \quad \dots\dots\dots(22)$$

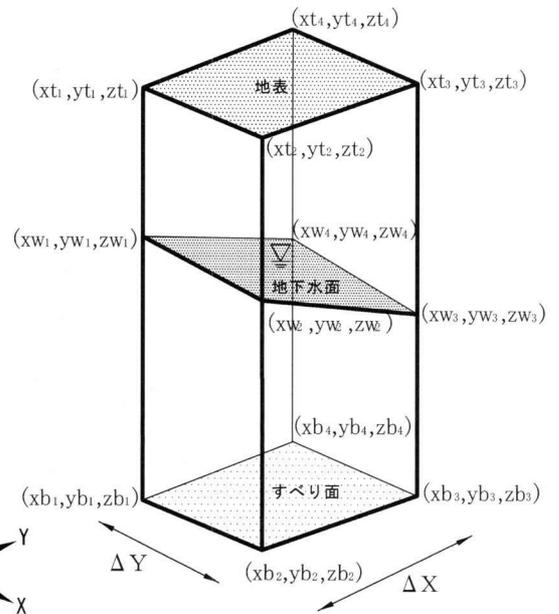


図-9 カラムの重量 ( $W$ ) と水頭 ( $U$ ) の計算座標  
Fig. 9 Coordinate to calculate weight of a column and water head

ここで, 式(22)の $\phi$ はすべり面の内部摩擦角,  $C$ は粘着力,  $A$ はすべり面の面積を表している。また, 分子 $R$ は, 滑りに抵抗するせん断強さを, 分母 $D$ はすべり面に発生しているせん断力の合力を表している。

**3. 側方拘束圧と地すべり形状比の感度解析**

ここでは本手法を用いることによる拘束圧の効果について明確にする。地すべり形状と安全率について幅 ( $w$ ) と層厚 ( $d$ ) の関係 (ここでは $w/d$ 比とする) を用いてモデルを作成し解析を試みる。なお, 比較のため三次元簡易Janbu法とHovland法でも解析する。

**3.1 解析条件**

解析条件として, 図-10, 図-11に示す立体モデルa, bの2つを設定した。また, その縦横断関係を図-12に示す。モデルaは, 側方のみでなく通常の地すべりのように頭部が急で, 末端が緩やかな形状をもつが, モデルbでは頭部と末端でのすべり面の変化はなく, 一様の単一斜面である。これは, 側方拘束分を明確にすることを目的とするためである。ここでは, 一様部の斜面勾配を $\tan \theta = 0.3 (\theta \approx 16.7^\circ)$ と想定し, 表-1のケース1~5について実施した。

また, 内部摩擦角 $\phi$ による違いについても検証するため解析モデルを同じとしたケース1, ケース2にそれぞれ $\phi = 20^\circ, \phi = 10^\circ$ を設定してその違いをみた。さらに, 地すべり層厚 ( $d$ ) による感度解析として, ケース1, 3, 4でそれぞれ層厚12m, 27m, 54mの3モデルを設定した。

解析に当たりケース1, 2, 5は格子幅 $dx, dy$ は2.5mとし, ケース3は5.0m, ケース4は10.0mとした。なお, 図-12に示すすべり面底面の $W_2$ は $W_2 = W - 2 \cdot dx$

で計算した。さらに、当手法による拘束条件を直接把握する手法としてモデルb, ケース5における地すべり中心の右側  $(i, j) = (29, 22)$  に位置したカラムのX方向単位 $m^2$ 当たり仕事量を, X方向カラム変位量とX方向表面力の積によって求めた (図-13)。ここで,  $i, j$ は

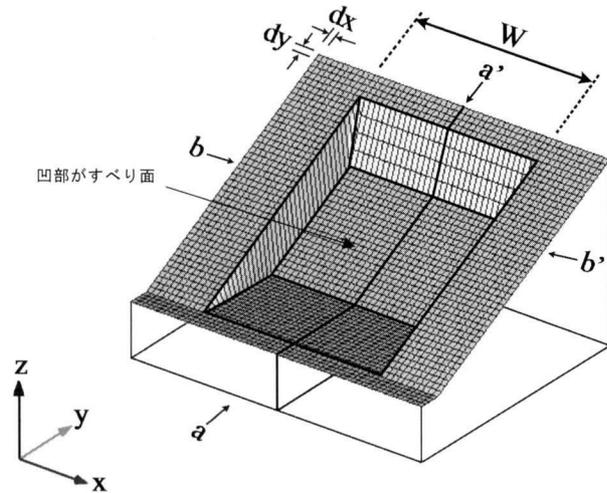


図-10 計算モデル 概念図 (モデルa)  
Fig. 10 Schematic view of landslide model (model a)

それぞれ方向, Y方向のカラム順位である。

### 3.2 解析結果

図-14に簡易三次元安定解析モデルの安全率をRBSMとし, 三次元簡易Janbu法による安全率をJanbu, Hovland法による安全率をHovlandとして各ケースについて縦軸に安全率 (Fs), 横軸にw/d比で整理した。ま

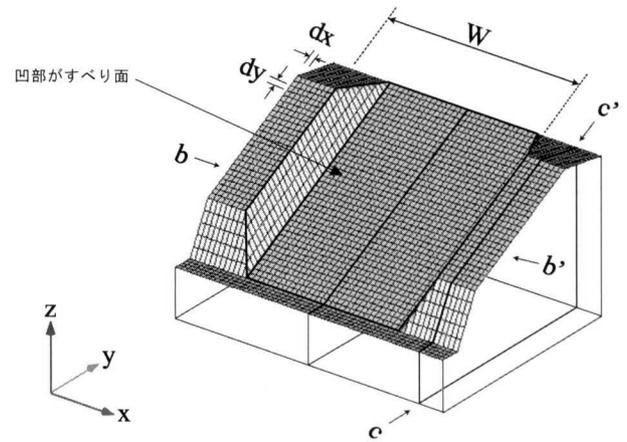


図-11 計算モデル 概念図 (モデルb)  
Fig. 11 Schematic view of landslide model (model b)

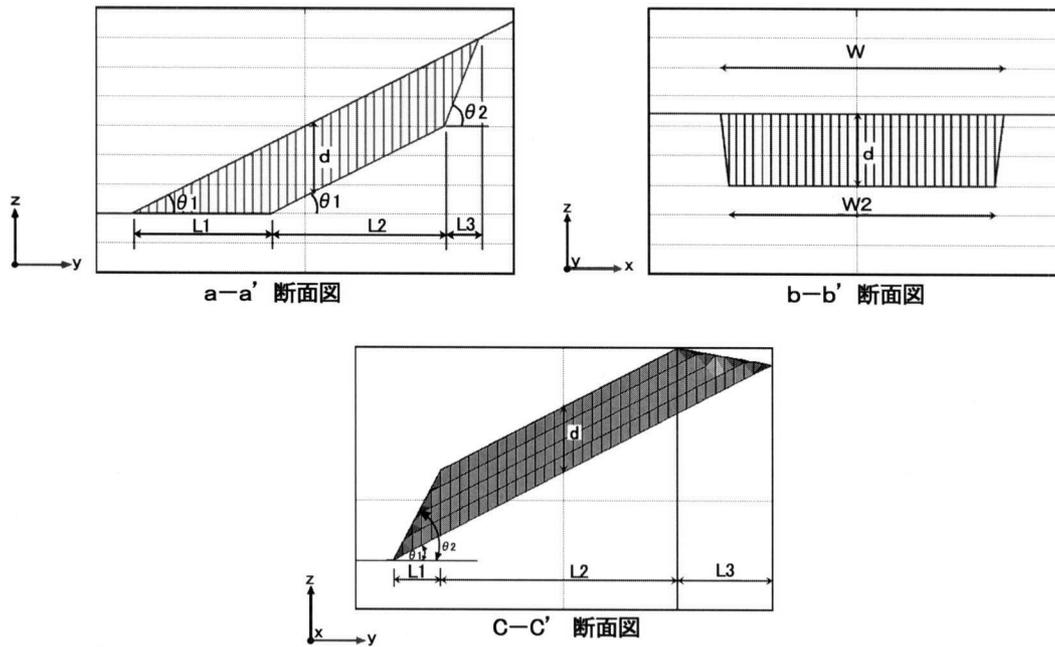


図-12 計算モデル縦横断面図  
Fig. 12 Cross sections of the landslide model

表-1 モデル計算ケース  
Table 1 Parameters used in calculation models

ケース	モデル	C	$\phi$	$\gamma t$	W	Tan $\theta 1$	Tan $\theta 2$	L1	L2	L3	d
		kN/m <sup>2</sup>	°	kN/m <sup>3</sup>	m	-	-	m	m	m	m
1	a	10	20	18	20 ~ 130	0.3	1.5	40	50	10	12
2	a	10	10	18	20 ~ 130	0.3	1.5	40	50	10	12
3	a	10	20	18	20 ~ 190	0.3	1.5	90	100	11.25	27
4	a	10	20	18	40 ~ 520	0.3	1.5	180	210	45	54
5	b	10	20	18	30 ~ 120	0.3	1.9	12.5	75	25	20

た, 図-15には, 前述したように, モデルbを用いケース5のRBSMによる安全率と地すべり領域の中心付近カラム*i* = 29, *j* = 22でのX方向仕事との関係を示す。以上の解析の結果から, 以下の特性が明らかとなった。

(1) RBSMとJanbuともにw/d比が増加するに従い指数関数的に急激に安全率が低下する。但し, w/d比が小

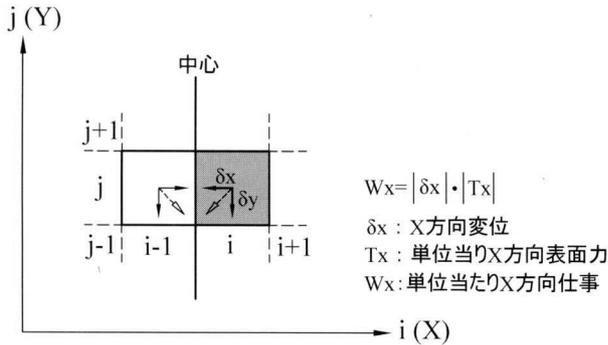
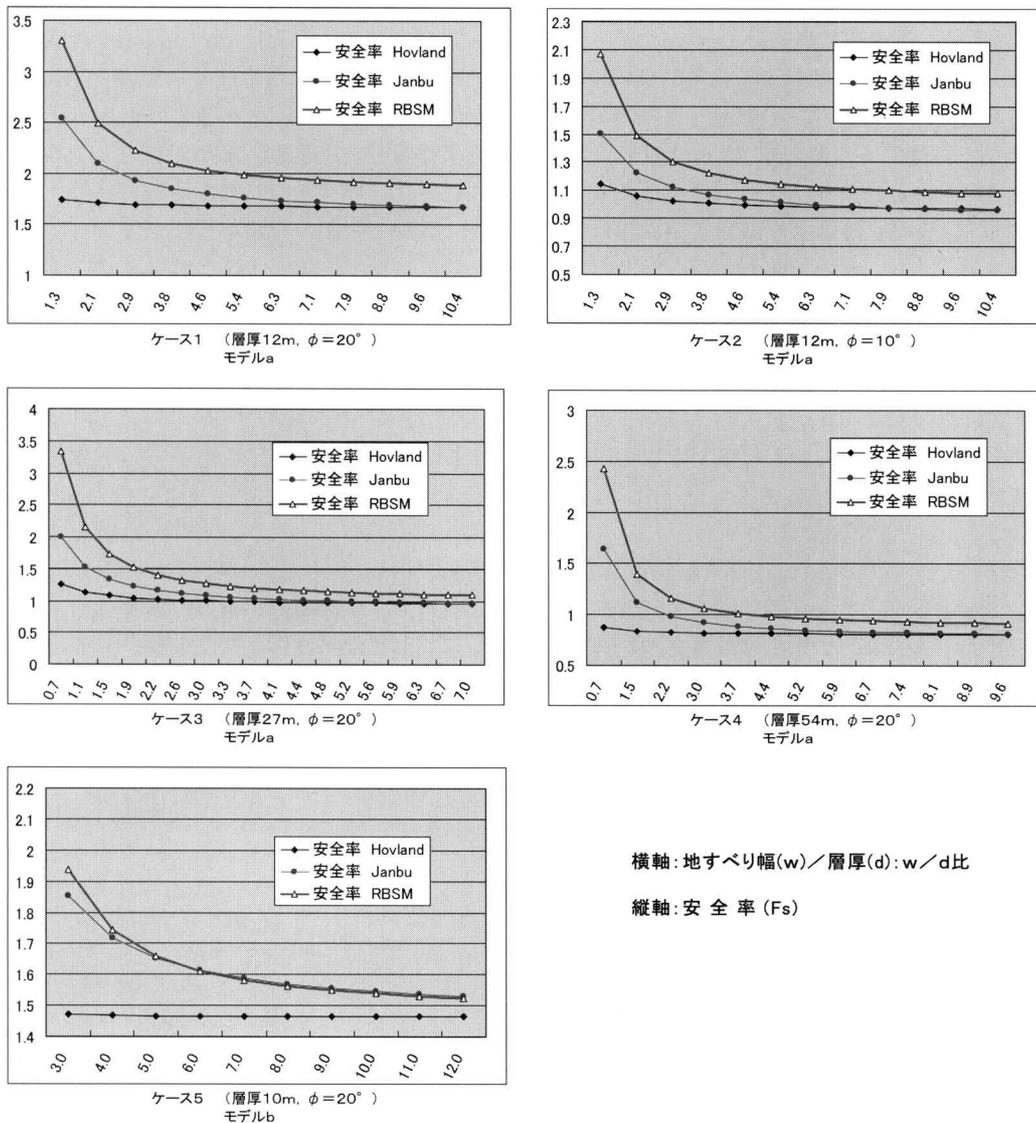


図-13 カラムにおけるX方向の単位当たり仕事  
Fig. 13 Unit work of a column in X-direction

さいところでは, RBSMの方がJanbuより安全率は大きい。しかしながらw/dが2以上になるところでの両者の安全率低下傾向は概ね一致する。他方, Hovlandはケース2, ケース3を除けばw/dに関係なくほぼ安全率は一定である。但し, ケース2, ケース3でもJanbuやRBSMの安全率変化に比べれば小さい。

(2) 末端, 頭部などの縦断形状効果のないモデルbでは本手法と簡易三次元Janbuの安全率の差はほとんどない。他方, モデルaでみられるように本手法のほうが簡易三次元Janbuより安全率が高め (拘束効果が強い) の傾向を示す。

(3) ケース1とケース2を比較した結果RBSM, Janbuともにφが大きいと, 当然安全率は高いもののw/d比の増加における低下傾向にあまり差は認められない。なお, φが同じでdが異なるケース1, 3, 4を比べる限りdが厚いほどw/dが小さいところで安全率の変化が小さくなる傾向にあるが, ここでもケース毎の差はなく概



横軸: 地すべり幅(w) / 層厚(d): w/d比  
縦軸: 安全率 (Fs)

図-14 地すべり幅 (w) 地すべり層厚 (d) の比と各手法安全率の関係

Fig. 14 Relations between safety factors by various methods with ratio of width (w) and thickness (d) of landslide

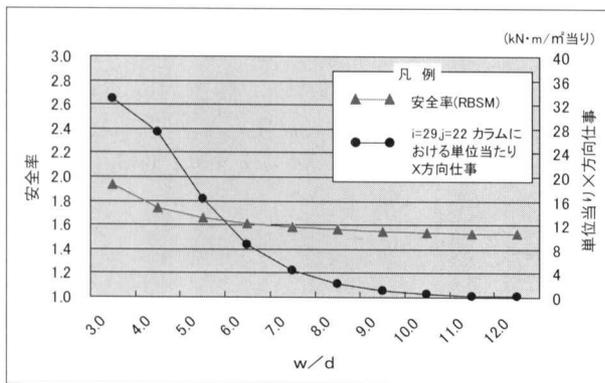


図-15 w/d比とRBSM安全率及び中心カラムX方向仕事との関係

Fig. 15 Relations between w/d ratio versus safety factor by RBSM and unit work in X direction

ねw/d = 7~10程度で安全率が一定となる。

(4) モデルaにおいてはw/d比が7~10を超えるとHovlandとJanbuの安全率はほぼ同じとなる。また、モデルbにおいては、JanbuとRBSMはほとんど一致する。

### 3.3 拘束条件解析に対する考察

地すべり形状、規模、安定性に対する検討については、古くは渡他の報告があり<sup>10)</sup>、また、上野も、自らの調査現場での地すべりから地すべり最大幅(W)とすべり面深度(D)の関係に着目し、簡便式を用いて横断形状比W/Dについて求め、W/D=10以上では安全率がほぼ一定なることを示すとともに、自らの経験現場で得られたW/D=3.0~10.7について合理的な説明を与えた<sup>11)</sup>。

今回の解析においてもRBSM及びJanbuのw/d比が7~10を超えると急激に安全率が一定となり、また、図-15に示されるX方向仕事はw/d比が11を超えると、ほぼ0となることなどから、上野らのW/D比と同様の形状効果が作用していることを裏付ける結果となった。なお、モデルbにおいてJanbuとRBSMの安全率が等しくなるにもかかわらず、モデルaにおいてRBSMがJanbuに比べてわずかに大きい安全率となるのは、縦方向のすべり面勾配の変化点の形状がRBSMの解析では大きな拘束効果をもたらすためと判断される。また、ケース1とケース2の比較から側方拘束効果におけるφの影響はw/d比からみるとそれほど大きくないといえる。

ところで、Hovlandでは図-14のケース2とケース3のw/dが3以下のところで若干の安全率の変化が認められるにもかかわらず、ケース5においては安全率の変化がない。これは、本モデルの特性上、地すべり両サイドのカラム1列分については、すべり面勾配が一様ではなく、ねじれていて、末端ほど緩くなっているため、このためHovlandにおいて、あたかも拘束効果があるかのような解析結果を得ていると思われる。

いずれにしても、RBSMの極限離散化手法を用いた本解析は地すべり形状効果を十分考慮した解析手法であること、及びJanbuに比べると縦方向の拘束をより大きく

表し、安全率が高めに求まることが解った。

## 4. 解析事例

前節でも述べたように地すべりの移動杭観測などで、地すべり移動方向が移動体表面上の箇所毎に異なることが多いことも事実である。

前節、図-1に示した鷲尾岳地すべりは、木下<sup>6)</sup>や郎<sup>12)</sup>の研究報告などで、その地形、及びすべり面の三次元地すべり構造を示してあることから、これらに基づき本手法の安定解析を試みた。なお、地下水は示された断面図の最高水位<sup>12)</sup>と、流速分布図<sup>6)</sup>から、三次元的に推定した。また、標高210mより上位には玄武岩が存在しており、これを考慮し地すべり移動体を玄武岩とそれ以外の2層にした。そして、前者の土塊の単位体積重量(γ<sub>t</sub>)を27kN/m<sup>3</sup>、後者を26kN/m<sup>3</sup>とした。粘着力(C)と内部摩擦角(φ)は、リングせん断試験結果であるC=16.4kN/m<sup>2</sup>、φ=21.7°を用いた場合(ケース1)と、本手法(RBSM)によって逆算安全率がF<sub>s</sub>=1.0となるC=16.4kN/m<sup>2</sup>、φ=11.35°(ケース2)の2ケースで実施した。

安全率については、Hovland法と三次元簡易Janbu法で比較した。また両手法の最小安全率方向をy軸下向きを0°とし、時計廻りとする方向として求めた。それらの結果は表-2に示す。また、本手法に基づくケース2については、カラムの移動方向(実線)とカラムの最大勾配(破線)を図-16に示した。

表-2から、前節の感度解析と同様に安全率では本手法(RBSM)が最も高い値を示した。しかし、前節では三次元簡易Janbuはw/d比が大きくなるとHovland法にほぼ一致したが、研究事例においては三次元簡易Janbu法の方が安全率は高くなる。これと同様のことは鶴飼の御岳崩壊の研究事例<sup>3)</sup>において、三次元簡易Janbu法の安全率がHovlandに比べ、高い結果を示していることから妥当である。但し、本解析(RBSM)では三次元簡易Janbu法に比べさらに安全率が高くなる傾向にある。これは、本解析の方が側方のみでなく、縦方向を含めた三次元形状効果に伴う変位挙動を考慮している解析であるためと考えられる。また、図-16に示すカラム移動方向と前節図-1の移動杭を比べると、地すべり頭部の東端と中心部に移動方向の相違が認められるものの、地すべり西縁から地すべり末端、及びNO.11杭などは良く一致している。

## 5. まとめ

提案した手法は、RBSMと同様の離散化極限解析手法に基づいたもので、従来のHovland法や三次元簡易Janbu法と異なり、個々のカラム変位(移動)を考慮した安全率が得られる手法である。また、三次元形状効果は、従来いわれていたようにHovland法ではほとんど示すことができなかったが、本手法は側方拘束において三次元簡易Janbu法と遜色なく、またすべり方向で見ると三次元

表一 鷲尾岳地すべりにおける本手法 (RBSM) と三次元簡易Janbu法及びHovland法との安定解析結果比較

Table 2 Comparison for safety factors and movement directions between RBSM, Janbu method and Hovland method at Washiodake area

C, φ条件		本手法(RBSM)	三次元簡易Janbu法		Hovland法	
		安全率	安全率	方向※	安全率	方向※
ケース①	C=16.40kN/m <sup>2</sup>	1.88	1.66	3°	1.53	10°
	φ=21.70°					
ケース②	C=16.4kN/m <sup>2</sup>	1.00	0.89	3°	0.83	10°
	φ=11.35°					

※最小安全率方向(y軸下向き(北向き)を0°とし、時計廻りの角度方向)



図一六 本手法によるカラム移動方向と最大傾斜方向

Fig. 16 Comparison of calculated movement direction of column and maximum inclination direction using RBSM

簡易Janbu法より大きな拘束をもたらし、全体に安全率も高めに推移することが分かった。いずれにしても、本解析手法は、鷲尾岳地すべりの事例解析でも、移動方向との比較が可能であることを明らかにしており、このようなデータから、すべり面構造の是非を判断する手段となり得る手法の一つであることが分かる。

なお、斜面の変形解析を行うのであれば、地層や地下水面等を考慮してこのカラムをさらに分割し、適切な変形係数等の地盤定数を入力する必要がある。しかし、本手法では、必要とする地盤定数や地すべり面構造の設定

及び解析時間が従来手法の極限平衡法とほぼ同じであり、処理のための簡便性が失われない方法である。

今後は、実務面への展開に向け①ダム湛水池の地すべり斜面への適用、②地震時の安定解析手法への拡張、③アンカーなどの抑止工導入とその評価等、さらに研究を進めていくことが重要であると考えている。

### 謝辞

最後に、三次元安定解析のモデル化に際し(助砂防地すべりセンターの吉松弘行氏には様々な観点から御助言を賜った。ここに深く、感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 木村隆俊, 川場浩二 (2000): 三次元安定解析に基づく抑止工法計画について, 第39回地すべり学会研究発表会講演集, pp. 253-256.
- 2) Hovland, H.J., Asce, M. (1977): Three-Dimensional Slope Stability Analysis Method, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 103, No. GT9, pp. 971-986.
- 3) 鶴飼恵三 (1988): 分割法による斜面の三次元安定性検討, 土と基礎, Vol. 36, No. 5, pp. 19-24.
- 4) 榎田充哉 (2003): 三次元簡易Janbu法を用いた側壁効果と移動方向の検討, 第42回地すべり学会研究発表会講演集, pp. 177-180.
- 5) 鶴飼恵三, 細堀建司 (1988): 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, 第394号/III-9, pp. 21-26.
- 6) 木下慎逸, 田中比月, 酒井哲也, 吉松弘行 (2001): 地すべりにおける深礎杭の3次元FEM解析事例, 地すべり, Vol. 38, No. 3, pp. 268-275.
- 7) 竹内則雄 (1991): 地盤力学における離散化極限解析, 培風館, pp. 1-204.
- 8) 竹内則雄, 濱崎英作, 草深守人 (2003): 有限要素を用いた簡易斜面安定解析, 日本計算工学会計算工学講演会論文集, Vol. 8, No. 2, pp. 567-570.
- 9) 濱崎英作, 竹内則雄, 草深守人 (2003): すべり面を有限要素で近似した3次元斜面安定解析, 第38回地盤工学会研究発表会講演集, pp. 3-4.
- 10) 渡正亮, 中村浩之, 板垣治 (1975): 地すべり実態統計 (その1), 土木研究所資料, pp. 6-34.
- 11) 上野将司 (2001): 地すべりの形状と規模を規制する地形・地質要因の検討, 地すべり, Vol. 38, No. 2, pp. 1-10.
- 12) 郎 寛華, 中村浩之 (2003): 鷲尾岳地すべり三次元安定解析及び深礎杭の応力分布, 第42回地すべり学会研究発表会講演集, pp. 317-320.

(原稿受付2005年4月20日, 原稿受理2005年9月21日)