

任意形状の地形とすべり面を有する斜面の安定解析

STABILITY ANALYSIS FOR SLOPES WITH ARBITRARILY-SHAPED
GEOMETRY AND SLIDING SURFACE

鵜飼 恵三*・細堀 建司**

By Keizo UGAI and Kenji HOSOBORI

In order to analyze 3-D (three-dimensional) slope stability, a new 3-D slice method is proposed by extending 2-D Spencer's method. This method is applicable to the case of non-circular slip surface and satisfies moment equilibrium and vertical and horizontal force equilibrium for sliding mass. Two examples of calculation are presented to show the accuracy of the method and comparatively large 3-D effect in a practical case.

Keywords: three-dimensional analysis, slope stability, limit equilibrium

1. ま え が き

著者らは、これまで分割法に基づく三次元斜面安定計算法を提案してきた¹⁾。これらは、三次元簡便法・簡易 Bishop 法・Spencer 法および簡易 Janbu 法であり、いずれも二次元状態の斜面に対しては従来の二次元分割法に帰着する。これらのうち前3者は回転体すべり面にのみ適用される方法である。任意形状のすべり面に対応できる方法として Hovland 法と上述の三次元簡易 Janbu 法がある。Hovland 法は簡便であるが土塊全体のつり合いが全く満たされない²⁾。三次元簡易 Janbu 法は実用的であるが、土塊全体のモーメントのつり合いが満たされないため精度上不安が残る。本研究では、任意形状のすべり面に適用でき、すべり土塊の力とモーメントのつり合いがすべて満たされる三次元安定計算法を提案し計算例を示した。本計算法の特別な場合である二次元非円形斜面安定計算法はすでに Wright³⁾により提案されている。ただし、Wright が各分割細片のモーメントのつり合いを考えたのに対し、本研究では土塊全体のモーメントのつり合いのみを考えており、両者の方法は一部異

なっている。本文ではまず二次元計算法について説明し、その精度を確認したのち、三次元問題へ拡張する方法を示した。

2. 非円形二次元斜面安定計算法

Fig. 1 に任意の二次元斜面、すべり面形状および分割細片 (スライス) の一部を示す。すべり土塊を n 個に分割する。R はすべり面下端と斜面から離れたある点 O とを結ぶ距離、 θ は水平面から時計回りにとった動径 R の回転角、 R_j 、 θ_j は j 番目のスライスの底面の中心に対応する R、 θ を表わす。 b_j と α_{xz} はスライスの幅と底面の傾角である。幾何学的関係より R_j と θ_j は次のように表示される。

$$R_j = \sqrt{(R \cos \theta + \sum_1^{j-1} b_j + b_j/2)^2 + (R \sin \theta - \sum_1^{j-1} b_j \tan \alpha_{xz} - (b_j/2) \tan \alpha_{xz})^2} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\cos \theta_j = (1/R_j)(R \cos \theta + \sum_1^{j-1} b_j + b_j/2) \dots \dots \dots (2)$$

j 番目のスライスを取り出し、作用する力を示したのが Fig. 2 である。 ΔW_j は自重、 ΔT_j と ΔN_j は底面のせん断力と垂直力である。 ΔQ_j はスライス側面に作用する力の合力で、水平に対して δ (未知定数) だけ傾くと仮

* 正会員 工博 群馬大学助教授 工学部建設工学科
(〒376 群馬県桐生市天神町1丁目)

** 正会員 工修 (株)森技術研究所 (元・群大院生)

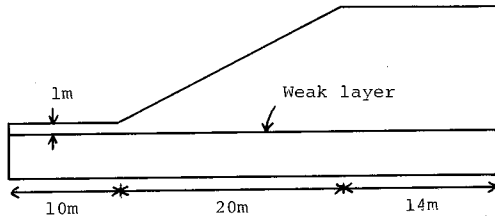


Fig. 3 Geometry of a slope.

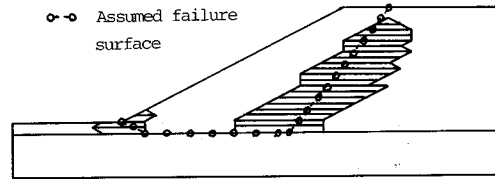


Fig. 4 Areas of large relative strain rate and assumed failure surface.

3. 非円形 Spencer 法の三次元への拡張

Fig. 5 のような三次元すべり土塊を想定し、多数のコラムに分割する。ij 番目のコラムを取り出し作用する力を Fig. 6 に示す。\$K_h\$ は水平震度係数である。コラム側面に作用する内力の合力 \$\Delta Q_{ij}\$ の \$xz\$ 面、\$yz\$ 面内の分力をそれぞれ \$\Delta Q_1\$、\$\Delta Q_2\$ とする。\$\Delta Q_1\$、\$\Delta Q_2\$ は、Fig. 7 に示すように、\$x\$ 軸、\$y\$ 軸に対しておのおの \$\delta\$、\$\tan^{-1}(\eta \tan \alpha_{yz})\$ だけ傾くとする。ここで \$\delta\$ と \$\eta\$ は未知定数である。\$\Delta Q_1\$、\$\Delta Q_2\$、\$\Delta Q_{ij}\$ がつくる面に垂直な方向の力のつり合い式を立て、さらに \$\Delta N_{ij}\$ と \$\Delta T_{ij}\$ の間の強度条件式を用いると、\$\Delta N_{ij}\$ と \$\Delta T_{ij}\$ が文献 1) の式 (15)、(16) のように得られる。これらの式を用いてすべり土塊全体の鉛直力、水平力およびモーメントのつり合い式を立てると、次の 3 式が得られる。ただし、\$u\$ はすべり面上に作用する間隙水圧である。

$$F_v = (1/\sum \Delta W) \cdot \sum [(c-u \tan \phi)(\eta \tan^2 \alpha_{yz} \sin \alpha_{xz} + \tan \delta \sec \alpha_{xz}) \Delta x \Delta y + \Delta W(1-K_h \tan \delta)(F_v/J + \tan \phi \sin \alpha_{xz})] / m_\alpha \quad (14)$$

$$F_h = [1/\sum \Delta W(1-K_h \tan \delta) \tan \alpha_{xz}] \cdot \sum [(c-u \tan \phi)(\sec \alpha_{xz} + \eta \tan^2 \alpha_{yz} \cos \alpha_{xz}) \Delta x \Delta y + \Delta W(1-K_h \tan \delta) \{ \tan \phi(\sec \alpha_{xz} - \tan \delta \sin \alpha_{xz}) + F_h(\tan \alpha_{xz}/J)(\eta \tan^2 \alpha_{yz} + \tan \delta \tan \alpha_{xz}) \}] / m_\alpha - F_h K_h \Delta W \quad (15)$$

$$F_m = [1/\sum \Delta W R_{ij}(\cos \theta_{ij} + K_h \sin \theta_{ij})] \sum (R_{ij}/m_\alpha) \cdot [(c-u \tan \phi) \Delta x \Delta y \{ \eta \sin(\theta_{ij} + \alpha_{xz}) \tan^2 \alpha_{yz} + \sin(\theta_{ij} + \delta) / \cos \delta / \cos \alpha_{xz} \} + \Delta W(1-K_h \tan \delta) \{ \tan \phi \sin(\theta_{ij} + \alpha_{xz}) + (F_m/J) \cos(\theta_{ij} + \alpha_{xz}) / \cos \alpha_{xz} \}] \quad (16)$$

ここで、\$J = \sqrt{1 + \tan^2 \alpha_{xz} + \tan^2 \alpha_{yz}}\$

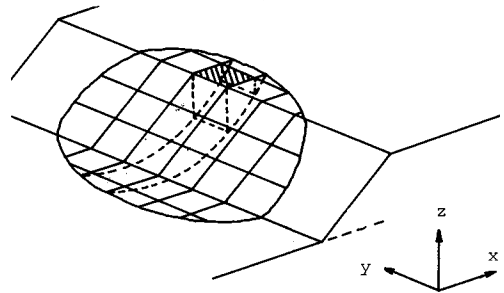


Fig. 5 Three-dimensional sliding body.

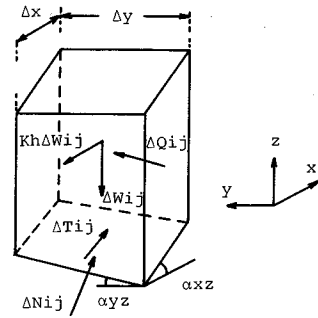


Fig. 6 Forces acting on a column.

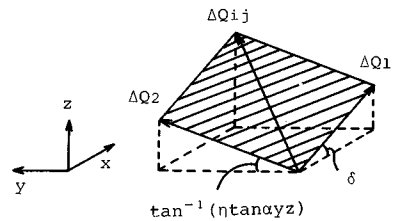


Fig. 7 Active directions of \$\Delta Q_{ij}\$, \$\Delta Q_1\$ and \$\Delta Q_2\$.

$$m_\alpha = (1/J)(1 + \eta \tan^2 \alpha_{yz} + \tan \delta \tan \alpha_{xz}) + (\tan \phi/F)(\sin \alpha_{xz} - \tan \delta \cos \alpha_{xz})$$

上式で \$\sum\$ は \$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n\$ の略号である。\$m\$ は \$y\$ 方向の分割数。\$R_{ij}\$、\$\theta_{ij}\$ は式 (1)、(2) の \$R_j\$、\$\theta_j\$ に対応する。式 (14)、(15)、(16) を連立させて試行的に 3 つの未知数 \$F\$ (\$= F_v = F_h = F_m\$)、\$\delta\$、\$\eta\$ を決定すれば、求める安全率 \$F\$ が得られる。

4. 計算例

計算例として、1984 年 9 月 14 日の長野県西部地震による御岳崩壊をとりあげた。三次元簡易 Janbu 法による結果はすでに地すべり学会誌において公表済みである。詳細は同誌を参照されたい⁶⁾。

計算の結果、\$\eta = 0\$ であることがわかった。表-1 に計算結果を示す。\$F_2\$ は二次元安全率で、最も危険な断

表一 御岳崩壊の二次元および三次元安全率

方法	0			0.1			0.2			0.3		
	F_3	F_2	F_3 / F_2	F_3	F_2	F_3 / F_2	F_3	F_2	F_3 / F_2	F_3	F_2	F_3 / F_2
非円形Spencer	1.38	1.14	1.21	1.10	0.91	1.21	0.91	0.75	1.21	0.77	0.63	1.22
簡易Janbu	1.34	1.08	1.24	1.08	0.87	1.24	0.90	0.71	1.27	0.76	0.60	1.27
Hovland	1.29	1.09	1.18	1.03	0.86	1.20	0.85	0.71	1.20	0.72	0.59	1.22
簡便法	1.24	1.08	1.15	0.99	0.86	1.15	0.82	0.71	1.16	0.70	0.60	1.17

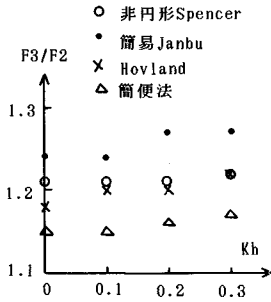


Fig. 8 Three-dimensional effect.

面に対するものである。 F_3 は三次元安全率。表一には、同じすべり面に対して三次元簡易Janbu法とHovland法による結果が示されている。Hovland法の値は両者の値より常に小さい。簡易Janbu法の値は非円形Spencer法の値よりやや小さいが、三次元効果を十分表わしており、実用上問題のない精度である。すべり面を回転体面で近似して三次元簡便法を適用した結果も示した。Hovland法よりさらに小さい安全率を与えている。三次元効果(= F_3/F_2)と震度 K_h との関係をFig. 8に示す。実際に近いすべり面(非円形もしくは非回転体面)

を用いた方法の方が三次元効果は大きく算出されることがわかる。

5. 結 論

- (1) 任意形状のすべり面に適用でき、すべり土塊の力とモーメントのつり合いがすべて満たされる三次元安定計算法(非円形Spencer法)を提案し、計算例を示した。御岳崩壊に関して大きな三次元効果が示された。
- (2) 三次元簡易Janbu法は非円形Spencer法に比べて小さめの安全率を与えるが、実用上十分な精度を有する。

参 考 文 献

- 1) 鶴飼恵三・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，第 394 号/Ⅲ-9，pp. 21~26，1988.
- 2) Hovland, H. J. : Three-dimensional slope stability analysis method, ASCE, GT 9, Vol. 103, pp. 971~986, 1977.
- 3) 田中忠次：「土質力学における数値解析」，わかりやすい土質力学原論，土質工学会，pp. 203~243，1987.
- 4) Zienkiewicz, O. C. *et al.* : Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics, Geotechnique, 25-4, pp. 671~689, 1975.
- 5) 鶴飼恵三：弾塑性 FEM による斜面の全体安全率の計算，第 2 回計算力学シンポジウム，pp. 225~230，1988.
- 6) 鶴飼恵三：簡易 Janbu 法による斜面の 3 次元安定解析，地すべり，Vol. 24, No. 3, pp. 8~14, 1987.
- 7) 申 潤植・板垣 治：地すべり(その 4)，土と基礎，Vol. 31, No. 7, pp. 89~97, 1983.

(1989. 1. 6・受付)