

Sarma法に基づく臨界すべり面探索について

徳島大学工学部 正 山上 拓男
阪神コンサルタンツ 正 植田 康宏
サン土木コンサルタンツ 正 ○前田 史男

1. まえがき 近年、数値計画法を応用して斜面安定解析に非円形すべり面理論を持ち込めんとする試みが各方面で活発に行われている。筆者らもこれまで、Janbu法と動的計画法¹⁾およびシンプレックス法²⁾、そして、Morgenstern-Price法とシンプレックス法、Powell法、BFGS法、およびDFP法^{3) 4)}を組合わせた臨界すべり面探索法を提案してきた。本報告は新たに、安全率算定式としてSarma法を採用し、シンプレックス法との組合せによる斜面安定解析法を構築せんとするものである。

2. Sarma法による安全率算定式⁵⁾ 図1を参照してSarma法の

要点を摘記しておこう：

Sarma法は分割法の範ちゅうに属する一手法で、非円形すべり面を対象としたものである。その基本概念は、図に示すように n 個に分割された各スライスに対して (Sarma法ではスライス分割線が鉛直である必要はない)、その自重 W_i に臨界加速度係数 K_c (Critical Acceleration Factor) を乗じた量 $K_c W_i$ がすべりと同じ向きの水平方向に働くとは定したとき、すべり土塊内の全ての点が極限つりあい状態にあるとして斜面の安定性を評価せんとするものである。

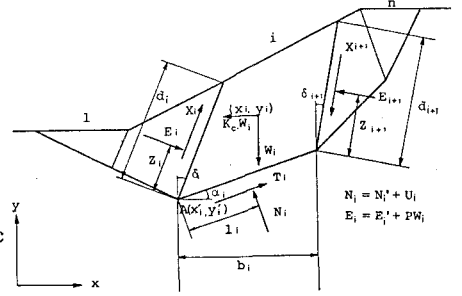


図1 Sarma法による安全率算定式

いま、スライス i に注目して、鉛直方向および水平方向の力のつりあいよりそれぞれ次式が得られる。

$$N_i \cos \alpha_i + T_i \sin \alpha_i = W_i + X_{i+1} \cos \delta_{i+1} - X_i \cos \delta_i - E_{i+1} \sin \delta_{i+1} + E_i \sin \delta_i \quad (1)$$

$$T_i \cos \alpha_i - N_i \sin \alpha_i = K_c W_i + X_{i+1} \sin \delta_{i+1} - X_i \sin \delta_i + E_{i+1} \cos \delta_{i+1} - E_i \cos \delta_i \quad (2)$$

ここに、 N_i, T_i : スライス底面に働く垂直力とせん断力、 E_i, X_i : 全応力の立場でのスライス側面に働く垂直力とせん断力、 α_i : スライス底面と x 軸のなす角、 δ_i : スライス側面と y 軸のなす角。

次に、基本概念より、水平力 $K_c W_i$ の作用のもとではすべり面上でMohr-Coulombの破壊条件式が成り立たなければならない：

$$T_i = c_i' b_i \sec \alpha_i + (N_i - U_i) \tan \phi_i' \quad (3)$$

ここに、 c_i', ϕ_i' : 有効応力に基づくスライス底面の粘着力と内部摩擦角、 U_i : スライス底面での間隙水圧、 b_i : スライス底面の水平幅。

同様に、スライス側面においても次式が成立する：

$$X_i = \bar{c}_i' d_i + (E_i - P W_i) \tan \bar{\phi}_i' \quad (4a)$$

$$X_{i+1} = \bar{c}_{i+1}' d_{i+1} + (E_{i+1} - P W_{i+1}) \tan \bar{\phi}_{i+1}' \quad (4b)$$

ここに、 $\bar{c}_i', \bar{\phi}_i'$: 有効応力に基づくスライス側面の平均的粘着力と内部摩擦角、 d_i, d_{i+1} : スライス側面の長さ、 $P W_i, P W_{i+1}$: スライス側面での間隙水圧。

式(1)～(4)より、臨界加速度係数 K_c は次のように求まる：

$$K_c = \frac{a_n + a_{n-1} e_n + a_{n-2} e_n e_{n-1} + \dots + a_1 e_n e_{n-1} \dots e_3 e_2}{p_n + p_{n-1} e_n + p_{n-2} e_n e_{n-1} + \dots + p_1 e_n e_{n-1} \dots e_3 e_2} \quad (5)$$

ここに、

$$a_i = \frac{W_i \sin(\phi_i' - \alpha_i) + R_i \cos \phi_i' + S_{i+1} \sin(\phi_i' - \alpha_i - \delta_{i+1}) - S_i \sin(\phi_i' - \alpha_i - \delta_i)}{\cos(\phi_i' - \alpha_i + \bar{\phi}_{i+1}' - \delta_{i+1}) \sec \bar{\phi}_{i+1}'} \quad (6)$$

$$P_i = \frac{W_i \cos(\phi_i' - \alpha_i)}{\cos(\phi_i' - \alpha_i + \bar{\phi}_{i+1}' - \delta_{i+1}) \sec \bar{\phi}_{i+1}'} \quad (7)$$

$$e_i = \frac{\cos(\phi_i' - \alpha_i + \bar{\phi}_i' - \delta_i) \sec \bar{\phi}_i'}{\cos(\phi_i' - \alpha_i + \bar{\phi}_{i+1}' - \delta_{i+1}) \sec \bar{\phi}_{i+1}'} \quad (8)$$

$$R_i = c_i' b_i \sec \alpha_i - U_i \tan \phi_i' \quad (9)$$

$$S_i = \bar{c}_i' d_i - P W_i \tan \bar{\phi}_i' \quad (10)$$

Sarma法では、式(5)で計算されるKcが安定性の指標として用いられる。すなわち、すべり土塊はKc=0のとき極限平衡状態、Kc>0で安定、Kc<0で破壊となる。通常、斜面の安定解析においては安全率Fsによって安定性が評価されるが、Sarma法ではKcがその役割を果たすのである。もちろん、必要とあらばFsを決定することも可能である。すなわち、式(5)において強度定数を c'/Fs , $\tan \phi'/Fs$, $\bar{c}'/Fs$, $\tan \bar{\phi}'/Fs$ と置き換えて、Fsの値を適当に変化させながら対応するKcの値を求め、丁度Kc=0となるFsを探し出せば、それが目下のすべり面に沿う安全率となっている。このようにFsの計算には、他の安全率算定式同様、反復計算を要するが、Sarma法本来の安定性の指標であるKc値の評価に際しては、式(5)から明らかなように反復計算を必要としない。一方、Sarma法ではスライス分割線が任意の傾きをとり得ることから、原理的にはKcの値が最も小さくなる δ_i を定めることが好ましい。しかし、このためには煩雑な繰り返し計算を行わねばならない。幸いなことに、Kcが最も小さくなるスライス分割はすべり面に垂直な方向である、ということがSarmaによって経験的に見出された。そこで、本研究で用いたプログラムでは、すべり面に対して垂直なスライス分割と、いま一つは、通常の分割法で採用される鉛直なスライス分割が考慮できるようにしている。

3. 解析例と結言 ここではシンプレックス法との組合せによる臨界すべり面探索プログラムを作成した。問題は図2に示す均質斜面である。まず、図2にスライス分割線の違いによる探索結果の相違を示す。Case 1がすべり面に対して垂直なスライス分割（分割線は点線）、Case 2が鉛直なスライス分割による探索結果である。図よりCase 1の方が小さめのKcを与えることがわかる。これはSarmaによる示唆⁵⁾を裏付けるものである。図3に他の安定解析結果との比較を示す。Sarma法による探索結果は、他の精度が高いとされている手法とほぼ同様な解を与えている。これより、本手法は非円形すべり面を対象とした安定解析法として有効な手段であるといえる。

〔参考文献〕 1) 山上・植田：地すべり，Vol. 22，No. 4，pp. 8-16，1986. 2) 山上・植田：昭和61年中四国土木学会，pp. 241-242. 3) 山上・植田：第23回土質工学会，昭和63年（投稿中）。4) 山上・植田：6th ICONMIG，1988（投稿中）。5) Sarma, S. K. : ASCE, GT12, pp. 1511-1524, 1979.

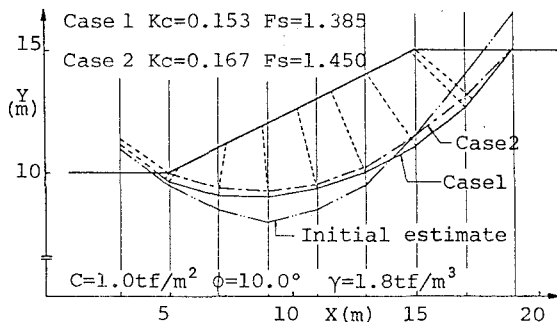


図2 スライス分割線の違いが及ぼす探索結果への影響

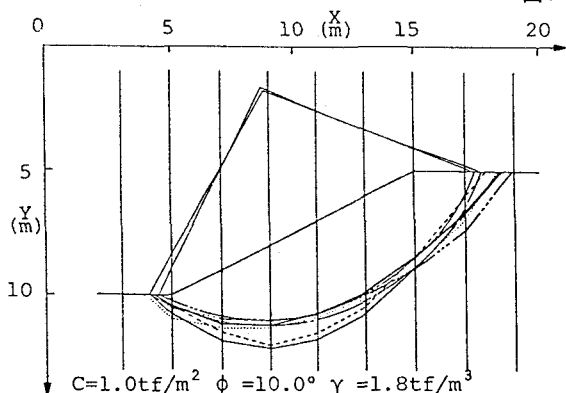


図3 安全率算定式の比較

	Method	Fs	CPU time (sec)
————	Morgenstern-Price + Simplex method	1.339	7.78
.....	Rigorous Janbu + Simplex method	1.346	8.22
-----	Sarma + Simplex method	1.385	1.68*
————	Simplified Janbu + Simplex method	1.185	6.44
-----	Simplified Janbu + D. P.	1.191	9.49
— · — ·	Fellenius	1.282	4.15
-----	Simplified Bishop	1.348	10.09

用いたComputer: * FACOM M-760/10, 他は FACOM M-360