

ヤンプ法とフェレニウス法による斜面の安全率及び
必要抑止力の計算方法の相違点と改善方法について

国土交通省六甲砂防事務所 木下篤彦・神野忠広

日本工営株式会社 倉岡千郎・○藤澤久子・徳永博・中西敏夫・山口巖・後藤寛和・古山貴久

1. はじめに：表層崩壊の対策にあたっては、修正Fellenius法を用いた繰り返し円弧計算により安全率が最小になる円弧を求めて抑止工を設計するのが一般的である。一方、特定の非円弧型すべり面を有する地すべりの抑止工の設計にあたっては、修正Fellenius法に比べて力学的に厳密とされるJanbu法を適用することで信頼性を向上できる可能性がある。ただし、仮定した安全率からすべり面強度を逆算して必要抑止力を計算する手順に従って、これら手法から求まる抑止力を比較検討した例がない。そこで、ある地すべりについて、これらの方法で求めた必要抑止力を比較し、抑止力が異なる原因について考察し、手法の違いに係る留意点について整理した。

2. 非円弧型すべり面を有する地すべりの抑止力の計算例：2種類の計算ソフトウェアを用いて図1に示す形状を有する地すべりの必要抑止力を3種類の方法で算出した(修正Fellenius法、簡易Janbu法、Janbuの厳密法)。すべり面の強度(粘着力c及び内部摩擦角φ)は安全率(Fs=1.0)を仮定して逆算した。計算の結果、2つのJanbu法で求めた必要抑止力の方が、修正Fellenius法の必要抑止力より20%程度大きくなった。一例を表1に示す。簡易斜面について実施した計算結果からも同様の傾向が認められ、深さ長さ比(d/L)が大きくなるほど違いが大きくなる。

表1 既往のソフトウェアによる抑止力の計算結果

解析手法	強度定数		スライス鉛直面のせん断応力	必要抑止力(kN)	安全率	分子(kN)合計	分母(kN)合計
修正Fellenius法(道路土工)	c(kN/m ²)	6	①考慮しない	518	1.00	2599	2598
	φ(°)	29.05					
Janbu法	c(kN/m ²)	6	厳密Janbu				
			①考慮する(繰返し計算を行う)	618	1.00	3046	3053
			簡易Janbu				
	φ(°)	29.55	②考慮する(修正係数を用いる)	629	1.00	3147	3147

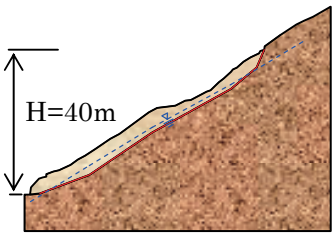


図1 地すべりの例

3. 相違点に関する考察：上記のように修正Fellenius法とJanbu法で差異が出た原因は、安全率の計算方法ではなく抑止力の計算方法に原因があり、単純な誤りとも言えるが、今後のソフトウェアの作成や改良にあたっての参考とするために留意すべきことを以下のように考察した。まず、杭工に対する抑止力を例として、道路土工等の指針¹⁾に記載されている抑止力の算定式を示す。ただし、簡略化のため水圧の項は無視した。

$$F_p = \frac{c \sum l_i + \tan \phi \sum N_i + \Delta R}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad \text{-----(1)}$$

ここに、F_p: 計画安全率、l_i: スライス長、N_i: スライス底面の法線方向力、ΔR: 必要抑止力、W: スライス重量、α: スライス底面の水平方向に対する傾斜である。式(1)は、Fellenius法に基づくものであるが、見方を変えると各スライスの抵抗力の合計をすべり力の合計で割った値

と見なせる。しかし、極限平衡法に共通するF_sの定義は、土が有している強度と限界状態の強度との比である²⁾。土が有している強度を次のように表し、

$$\tau = c + (\sigma - u) \cdot \tan \phi \quad \text{-----(2)}$$

極限平衡状態の強度をτ_fとすると、F_sは次のように定義される

$$F_s = \tau / \tau_f \quad \text{-----(3)}$$

この定義は1927にFelleniusによって提案されたものである²⁾。この定義と式(1)の関係について、Fellenius法の式の誘導過

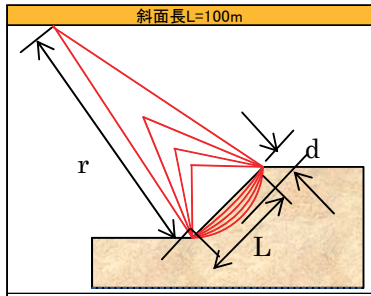


図2 簡易斜面の例

程を追って確認した。Fellenius法は円弧すべりを対象としてモーメントのつり合いからFsの式を誘導している。滑動モーメントは：

$$M_D = r \sum W_i \cdot \sin \alpha \quad \text{-----}(4)$$

ここで、r：モーメントのアーム長である。極限状態における抵抗モーメントは極限状態の強度(τ_f)を用いて以下のように表せる：

$$M_f = r \sum \tau_f \cdot l \quad \text{-----}(5)$$

次に式(3)のFsの定義を用いると式(5)は以下ようになる。

$$M_f = r \sum \tau \cdot l / F_s \quad \text{-----}(6)$$

ここで、活動モーメント(4)と極限状態の抵抗モーメント(6)を等しいとおいて、Fsを誘導すると以下の式が得られる。

$$F_s = \frac{c \sum l_i + \tan \phi \sum N_i}{\sum W_i \cdot \sin \alpha} \quad \text{-----}(7)$$

このように、Fellenius法は円弧におけるモーメントのつり合いに基づくものであり、Fsは限界状態の強度と土が有している強度の比であることが確認される。ただし、非円弧のすべり面になるとモーメントの釣り合いが成立しない。非円弧の場合の式(7)の適用性については次のような解釈を試みた。すなわち、式(7)から求まるFsは、抵抗力Rとすべり力Dの合計の比と見なす。すると、式(1)は式(8)のように表すことができ、分子に ΔR の項を加える根拠も同様に解釈できる。

$$F_p = (R + \Delta R) / D \quad \text{-----}(8)$$

ただし、このようなFsの考え方は、式(3)で表される定義と異なる。

今回、Janbu法の ΔR が修正Fellenius法の ΔR より大きくなった原因は、Janbu法の安全率の式の分子が抵抗力で分母がすべり力と見なしたことによる。以下に示すJanbu法の式の右辺の分子の n_a は安全率を含む関数である。さらに分子の強度定数に係る項をこの変数で割っている。よって分子の値は抵抗力とは明らかに異なる。よって、式(9)の分子を式(8)のRのように解釈してしまうと、分子の n_a のFsが計画安全率にならず、対策無しFsの値になってしまうことに注意する必要がある。

$$F_s = \frac{\sum \{ [c + (t - U) \cdot \tan \phi'] \cdot b / n_a \}}{-\sum \Delta E + \sum \{ t \cdot b \cdot \tan \alpha \}} \quad \text{-----}(9)$$

$$\text{ここに、} t: \text{スライス鉛直面のせん断応力、} n_a = \frac{1}{1 + \tan^2 \alpha} \cdot \left(1 + \frac{1}{F_s} \cdot \tan \alpha \cdot \tan \phi \right) \quad \text{-----}(10)$$

したがって、杭工を例にすると ΔR は、式(9)の n_a に F_p を入力して分母(T)・分子(S)を計算し、次に式(11)より、 ΔR を求めればよい。ただし、求めた分子を各スライスの有する抵抗力の合計と解釈することはできない。

$$F_p = (\Delta R + S) / T \quad \text{-----}(11)$$

このようにして、 ΔR を試算した結果、簡易ヤンプ法で求めた ΔR は504kNであり、修正Fellenius法(518kN)をやや下回るが、その差は数%と小さい。なお、式(11)は、治山技術基準解説(平成15年,p.271)³⁾に掲載されている式のなかで修正係数(f_o)を1.0としたケースに相当すると考えられる。簡易Janbu法の ΔR が修正Fellenius法とやや異なる理由の一つとしては、修正Fellenius法において、方向の異なるすべり力と抵抗力を合計していることが一つの原因と考えられる(図4)。

4. まとめ及び今後の方針：修正 Fellenius 法を非円弧に適用した場合、その Fs の意味合いは、Janbu 法で定義している Fs と異なって解釈される可能性がある。必要抑止力の算定方法からも推察されるように修正 Fellenius 法の Fs は、抵抗力の合計とすべり力の合計の比とも考えることができる。一方、Janbu 法で定義している Fs は、土が有している強度を限界状態の強度で割った値である。 ΔR を計算する場合は、このように Fs の解釈に留意する必要があり、式の分子と分母をそれぞれ抵抗力とすべり力と考えると過大あるいは過小な ΔR が算定される可能性がある。

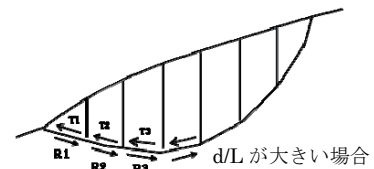


図4 スライスのすべり力の例

今後、Janbu法を対策工の設計に用いるにあたっては、様々な対策工に適用できるようにソフトウェアを改良し検証することが必要と考えられる。

参考文献：1) (社)日本道路協会：道路土工 切り土・斜面安定工指針、平成21年6月、2) 申潤植：地すべり工学、p. 532, 1994、山海堂、3) 日本治山治水協会：治山技術基準解説、平成15年5月、p.271.