

ヤンプ法を使った繰返し反復による非円弧すべりの抑止力計算

国土交通省近畿地方整備局 木下篤彦

国土交通省近畿地方整備局六甲砂防事務所 今田正秀・八木啓太

国土防災技術株式会社 ○大野亮一・榎田充哉・平武・山崎勉

1. 目的

六甲山系グリーンベルト整備事業では、六甲山麓地域の健全な生活環境を確保するため、市街地等に接する山腹斜面において土砂災害防止を目的とした斜面整備・対策を実施している。一般に、山腹斜面の対策工法を設計する場合、最危険すべり面を探索する必要があり、安定解析はフェレニウス法が使われることが多い。フェレニウス法は簡易で使いよく、実務設計で圧倒的な実績を誇る。しかし、理論的には円弧すべりを対象とした手法であり、斜面で実際に発生する崩壊は円弧ばかりではなく、非円弧形状のすべりも生ずる。したがって、斜面对策の設計においては、円弧だけではなく、非円弧すべりについてもその安定性を力学的に評価するのが本来だといえる。

本研究では、安定解析にヤンプ法を使い、最危険すべり面や抑止力最大すべり面を探索し対策工の設計を行った。その上でフェレニウス法による設計と比較し、ヤンプ法の課題や問題点を整理し、その合理性について検討した。

2. 検討内容

2.1 円弧すべりと非円弧すべり

図1は表六甲山系全体の崩壊深(地震以前も含む)を整理した図である。崩壊の95%以上が平均崩壊深2.0m以下であり、浅い崩壊が非常に多い。厚い風化層が堆積する斜面や盛土斜面では、円弧すべりが多く発生する。比較的浅い堆積土や風化層が連続する斜面では、層界底面がすべり面となりやすく円弧すべりの発生は稀で、非円弧すべりが多い(図2)。

2.2 ヤンプ法による安定解析検討作業の詳細

非円弧すべりを対象として、ヤンプ法安定解析を次の①～⑩の流れで実施した。

- ① 安定解析式に簡易ヤンプ法を使う。
 - ② 表層土と判定した $N_a < 50$ の層底面をすべり面の下界とする。
 - ③ すべりの上部と末端は円弧で地表に出す(図3)。
 - ④ 上部と末端の円弧が一つに重なる通常の円弧すべりも対象に含める。
 - ⑤ 地表に一定間隔で基点を設置(今回は2m間隔)し、上記条件を満たす探索対象すべり群を自動生成させる。
- ①～⑤で生成される探索対象すべり群の例を図4に示す。断面Fでは1300パターンのすべりが自動生成された。
- ⑥ 探索対象すべり群の各々に対し、自動でスライスを生成。
 - ⑦ ϕ 指定値(今回は 25°)、 c ゼロとして、各々すべりに対し簡易ヤンプ分割法による斜面安全率を算定する。そのうち、安全率最小となるすべりを最危険すべりとする。

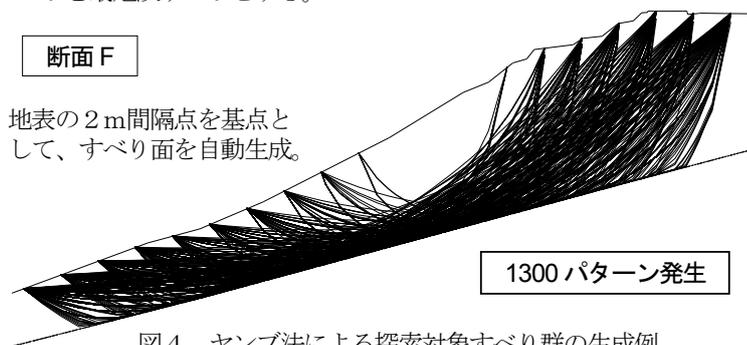


図4 ヤンプ法による探索対象すべり群の生成例

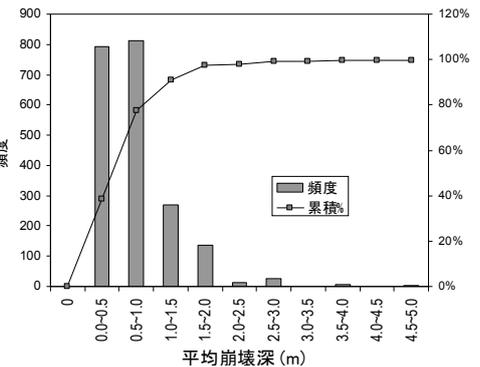


図1 表六甲山系の平均崩壊深分布

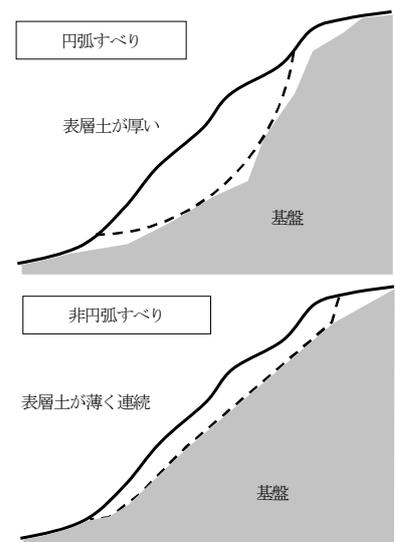


図2 円弧すべりと非円弧すべり

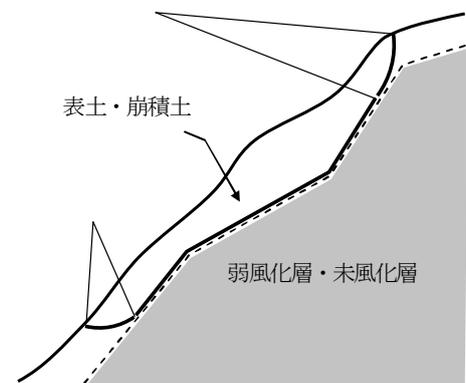


図3 非円弧すべり面の作成例

- ⑧ 最危険すべりの安全率が1を下回る場合、安全率が1となる粘着力cを逆算する（ ϕ は 25° ）。
- ⑨ 逆算c（ ϕ は 25° ）を用いて、探索対象すべり群各々に対し、再度安全率を算定し、計画安全率対応の必要抑止力を調べる。そのうち、抑止力最大すべりを一つ選定する。
- ⑩ 抑止力最大すべりの安全率、抑止力、滑動力、抵抗力を基に対策工の設計を行う。

2.2 検討結果の比較（フェレニウス法とヤンプ法）

8箇所の斜面について、修正フェレニウス法と簡易ヤンプ法による計算結果を比較した。なお、今回の検討は地下水なしで行った。

図5は、典型例として断面Aのフェレニウス法とヤンプ法各々の抑止力最大すべりを示したものである。表層土が薄い場合、ヤンプ法による抑止力最大すべりは薄く長大なすべりが抽出されることが多く、フェレニウス法によるすべり長さとは比べ1～3倍長となった。

図6は、最大抑止力を比べたもので、ヤンプ法はフェレニウス法の0.9～5倍の抑止力となった。すべり長さが大きくなったため、抑止力も増加する結果となった。

表1は図6の抑止力に応じた対策工規模を示したものである。工種は鉄筋補強土工で、ヤンプ法は抑止力が大きいため、それに応じて対策工規模も増強する結果となった。

図7は、各々の対策工に応じた概算工費である。ヤンプ法はフェレニウス法の1～1.8倍の工費、断面平均で1.35倍となった。

3. 考察

ヤンプ法の抑止力が大きくなる理由は主に、すべり長さが大きいためだが、同程度のすべり長さであっても抑止力が大きくなる傾向がみられた。これはヤンプ法の数式に由来したもので、フェレニウス法との比較で記述すると以下の3つが挙げられる。

- a. ヤンプ法は抵抗力、滑動力を6～15%程度大きく評価する。
（ただし、すべり面傾斜角に依存）
- b. 移動層が深いすべりでは2～5%程度大きな安全率となる。
- c. 移動層が浅いすべりでは2～5%程度小さな安全率となる。

すべり長さ以外にも、特徴aとcによりヤンプ法は抑止力が増加しやすい特性をもつ。対象とする斜面の多くはこれに適合すると思われ、今回の検討8断面のうち7断面が該当した。特徴bは逆に抑止力を減少させるもので、今回は1断面がこれに該当した。

ここで採用したすべり面探索アルゴリズムの特徴として、薄く長大なすべりを抽出しやすかった可能性がある。アルゴリズム依存の懸念を払うためには、動的計画法²⁾など異なる探索アルゴリズムで同様な結果となるか、検証の余地が残される。

ヤンプ法で設計した対策工費は、フェレニウス法に比べ平均で1.35倍となった。フェレニウス法による設計と比べ技術的には妥当な手法と考えるが、相対的に過大設計となりやすく、直ちに事業で採用するのは難しい結果となった。今後は事例検証を増やし、手法の妥当性を詳細に検証していく作業が必要である。

- 1) 国土交通相近畿地方整備局六甲砂防事務所（2004）：山腹斜面適用工法選定マニュアル（案）（運用編）【本編】
- 2) 久保田哲也・中村浩之（1991）：臨界すべり面解析と信頼性解析を応用した地すべり・崩壊危険度の判定法、地すべり学会誌、Vol.27、No.4、p.18-25.

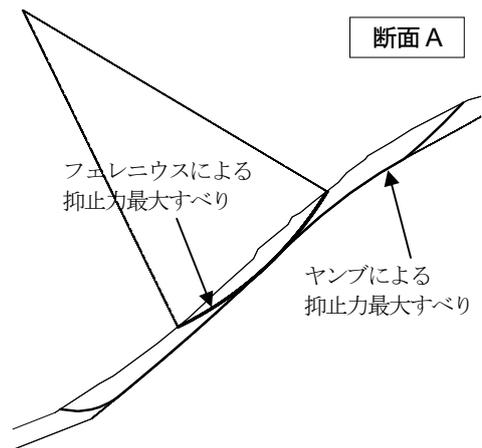


図5 抑止力最大すべりの比較

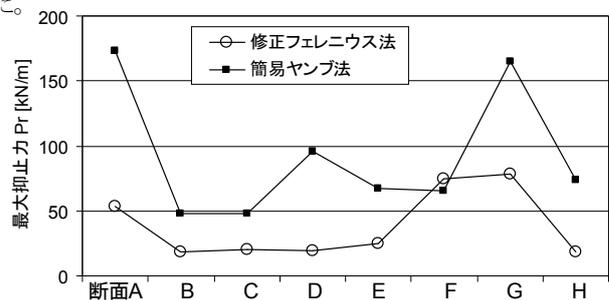


図6 最大抑止力の比較

表1 対策工規模の比較

断面	修正フェレニウス	簡易ヤンプ法
A	41段3.5m長 千鳥2.0m	41段4.0m長 千鳥2.0m
B	26段2.0m長 千鳥2.0m	26段3.0m長 千鳥2.0m
C	27段2.0m長 千鳥2.0m	27段3.0m長 千鳥2.0m
D	19段3.0m長 千鳥2.0m	同左
E	16段3.0m長 千鳥2.0m	同左
G	38段5.5m長 千鳥2.0m	50段5.5m長 千鳥1.5m
H	28段2.0m長 千鳥2.0m	38段2.0m長 千鳥1.5m

工種はすべてワイヤー連結鉄筋補強土工 下線部分：増強

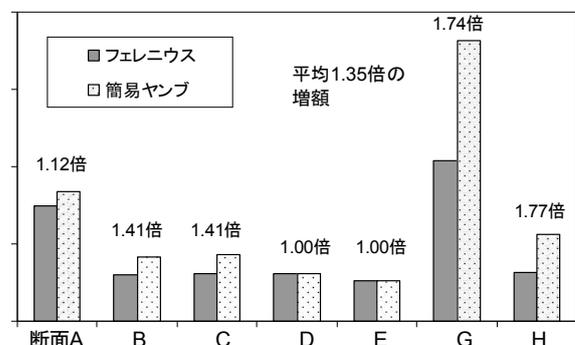


図7 概算工費の比較