

# Lecture

## 「安全率を考える」第8回

## Returning to the fundamentals of safety factor No.8

### 8. 自然斜面と安全率

Natural slopes and their safety factors

キーワード：斜面对策工，計画安全率，設計基準，安全率の定義，公共事業費の縮減

Key words : protection measure for slope, planned safety factor, design standard, definition of slope safety factor, decrease of public works budget

鶴飼恵三 Keizo UGAI / 群馬大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Gunma University

#### 8.1 まえがき

地すべり学会に所属する会員が研究または業務で対象とする斜面は、通常自然斜面であろう。そして自然斜面の安定性を評価するのに、安全率が通常用いられている。“自然斜面の安全率”と言うと一見難しそうに聞こえるが、実は地すべり学や地すべり工学において普通に用いられていることをまず指摘しておきたい。

“自然斜面の安全率”という言葉が難しそうに聞こえる理由の1つは、自然斜面である地すべり土塊のせん断強度が全くわからないためであろう。にもかかわらず地すべりの安全率を実際に計算できるのは、地すべり安全率の計算では、地すべり土塊のせん断強度ではなく、すべり面を想定してその面上でのせん断強度だけを検討対象とするからである。すべり面上の土のせん断強度については、多くの経験や研究の蓄積がある<sup>1)</sup>。

安全率の式で最も簡単なものは、式(1)に示されるFellenius法（簡便分割法）の式である。記号は、図-1を参照されたい。

$$F = \frac{\sum \{c' \Delta l + (\Delta W \cos \alpha - u \Delta l) \tan \phi'\}}{\sum \Delta W \sin \alpha} \dots\dots\dots(1)$$

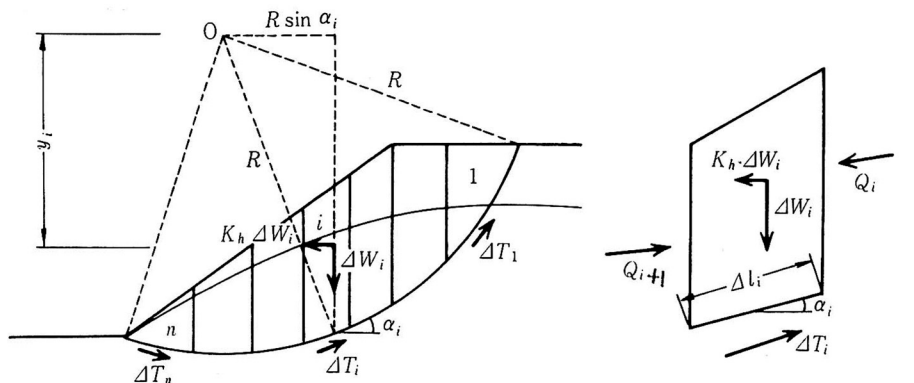
上式では簡単のために地震力は考慮していない。通常、計算の対象にするのは、不安定な斜面かすでに崩壊した斜面である。そのような斜面では、現状安全率としてFの値を1.0前後に想定することが多いので、すべり面上のせん断抵抗力（式(1)の右辺の分子）の大きさが次のように定められる。

$$\sum \{c' \Delta l + (\Delta W \cos \alpha - u \Delta l) \tan \phi'\} = F \sum \Delta W \sin \alpha \quad (F \cong 1.0) \dots\dots\dots(2)$$

従って、地すべりを安定化させるのに必要な計画安全率をFpと定めれば、地すべり対策工が担うべきせん断抵抗力を、すべり土塊重量の正弦（sin）成分に基づいて式(3)のように簡単に見積もることができる。これにより地すべり対策工の必要量の算定が可能になる。

$$(F_p - F) \sum \Delta W \sin \alpha \dots\dots\dots(3)$$

対策工として杭，アンカー，地下水排除工の量を具体的



$\Delta W_i$  : i番目のスライスの土塊重量  
 $K_h$  : 地震水平震度  
 $n$  : スライスの総数

i番目のスライスに作用する力

図-1 円弧すべりとスライスに作用する力

に見積もる段階になると、すべり面上の土のせん断強度定数 $c'$ と $\tan \phi'$ を定める必要がある。それらの決定方法は多くの基準書や解説書に書かれているので、ここでは省略する。

### 8.2 斜面の安全率の定義に関する再確認

これまで斜面安定解析において用いられてきた安全率の定義は、以下の2点に要約される。

- ① 安全率とは、ある任意のすべり面に沿って斜面が極限平衡状態になるように、せん断強度定数を減少させる因数である<sup>2)</sup>。
- ② 土のせん断強度は、モール・クーロンの式で表示する。

モール・クーロンの式は次のように表示される。

$$\tau_f = c' + \tan \phi' \dots\dots\dots(4)$$

$\tau_f$ は土のせん断強度である。これを $F$ で割ってせん断強度を低減させると

$$\tau_{fF} = c'/F + \tan \phi'/F \dots\dots\dots(5)$$

となる。式(5)で $F$ を大きくすると、せん断強度 $\tau_{fF}$ が小さくなり、斜面は破壊に近づく。さらに $F$ の値を大きくして、斜面がちょうど破壊に至ったときの $F$ の値を斜面の安全率と定義するわけである。この定義はせん断強度低減法と呼ばれ、斜面安定問題に特有なもので、地盤工学における支持力安全率などの定義とは異なることに注意する必要がある。このような考えのもとに導出された安全率式の例をすでに式(1)に示した。

ところで対策工で補強されていない斜面の安定解析法に関する研究は、これまで非常に多くなされており、多種多様な安定解析法と安全率計算式が提案されている。一方、杭やアンカーなど対策工により補強された斜面の安定解析法について考えてみると、無補強斜面の安定解析法との統一性を考慮して合理的に考察した研究は、山

上らの一連の研究<sup>3), 4)</sup>を除けば、非常に少ない。また、現在使用されている設計基準においては、杭やアンカーで補強された斜面の安全率式に関して、同一の基準内においてさえ統一が取れていないケースも見られる。このような現状は好ましくないと考えている。

以下において、補強された斜面の安全率式に関して現状の問題点を指摘するとともに、無補強斜面と補強された斜面の安全率に関して首尾一貫した議論を行い、論理的で整合性のある補強斜面の安全率式を提案する。なお、対策工として集水ボーリング工などの排水工がよく用いられるが、これらの効果は無補強斜面の安全率式に含まれる間隙水圧の値の低下量で表現されるため前述の首尾一貫性については問題ないので、本講座の検討対象から除外した。また考察を簡単にするため以下においては水圧の影響を無視する。

### 8.3 杭もしくはアンカーで補強された斜面の安全率式の誘導

斜面に杭やアンカーのような対策工が設置された場合の安全率も2章の①, ②と同じように定義する。対策工が設置された斜面の模式図を図-2に示す。すでに述べたように、斜面が破壊した後の対策工の設計では、斜面が破壊状態にあるときの安全率 $F$ を1.0前後に設定した上で、すべり面上の土の強度定数を逆算する。その後、計画安全率 $Fp$ を設定し、逆算された強度定数を用いて、必要な対策工の量を算出する。たとえば、すべり面上の粘着力 $c'$ の値を仮定して摩擦角 $\phi'$ を逆算する式は、簡便分割法の場合、式(1)より、水圧の影響を無視すると次のようになる。

$$\tan \phi' = (-\sum c' \Delta l + F \sum \Delta W \sin \alpha) / \sum W \cos \alpha \dots\dots(6)$$

以上のような前提のもとで、対策工がある場合の安全率の定義について考えよう。

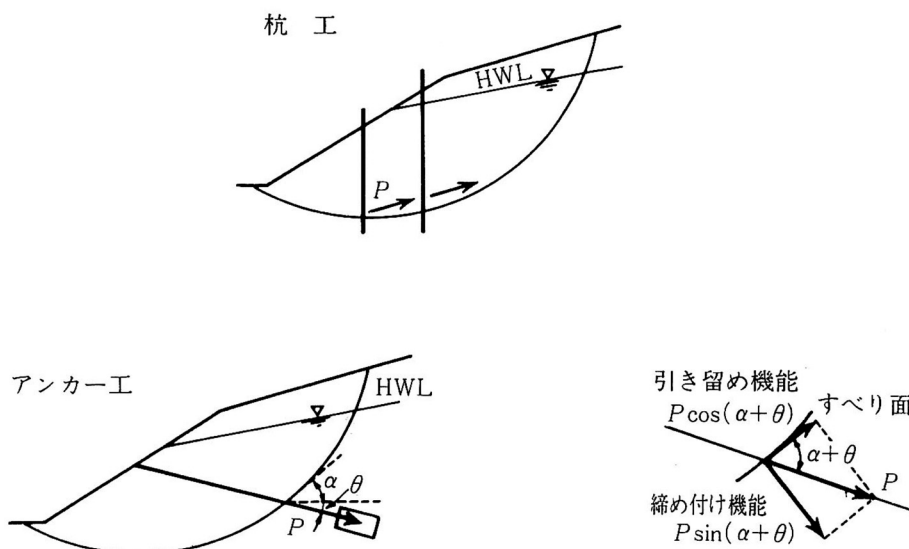


図-2 杭工とアンカー工の模式図

8.3.1 杭工の場合

まず対策工として杭工を取り上げ、抑止力を $P$ とする。せん断強度を計画安全率 $Fp$ で割って低減したとき、杭で補強された斜面がちょうど破壊時のつり合い状態になると考えると、次式が得られる。

$$P + \sum(c'l + \Delta W \cos \alpha \tan \phi') / Fp = \sum \Delta W \sin \alpha \dots(7)$$

式(7)より次式が得られる。

$$P = \sum \Delta W \sin \alpha - \sum(c'l + \Delta W \cos \alpha \tan \phi') / Fp \dots(8)$$

もしくは、

$$Fp = \frac{\sum(c'l + \Delta W \cos \alpha \tan \phi')}{\sum \Delta W \sin \alpha - P} \dots(9)$$

となる。式(8)に式(6)を代入すると、次式が得られる。

$$P = (1 - F/Fp) \sum \Delta W \sin \alpha \dots(10)$$

式(10)は、“地すべり鋼管杭設計要領<sup>5)</sup>”で採用されている。

道路土工-のり面工・斜面安定工指針<sup>6)</sup>では、これとは異なり次式が採用されている。

$$Fp = \frac{P + \sum(c'l + \Delta W \cos \alpha \tan \phi')}{\sum \Delta W \sin \alpha} \dots(11)$$

もしくは、

$$P = (Fp - F) \sum \Delta W \sin \alpha \dots(12)$$

式(11)では抑止力 $P$ が右辺の分子にきており、式(9)と異なる。式(11)は、極限状態での杭と土の抵抗力を滑動力で割ったものであり、安全率の一つの考え方である。しかし、式(9)を導く際に想定した斜面安全率の定義とは考え方が異なっており、無補強斜面の安全率の考え方と整合しない。また、式(11)の右辺の分子では、杭の抑止力 $P$ と土の最大せん断抵抗力 $\sum(c'l + \Delta W \cos \alpha \tan \phi')$ が同時に発揮されると仮定していることになるが、このような場合は少ないと考えられるので、合理性にも欠けると言えよう。

通常 $Fp$ は1より大きな値に設定されるので、式(12)から計算される $P$ のほうが式(10)から計算される $P$ より大きくなる。なお、式(7)~(11)に含まれる強度定数 $c'$ と $\phi'$ は、無補強斜面の破壊時のものであり、式(6)を満たすことに注意されたい。

8.3.2 アンカー工の場合

アンカー工の場合にも、同様な議論ができる。土の強度定数 $c'$ と $\tan \phi'$ を $Fp$ で割って低減した状態で斜面が破壊し、同時にアンカーも破壊(たとえばアンカー体の引き抜け、アンカー棒の破断もしくはアンカープレートの支持力破壊、など)すると考える。このときのアンカー抑止力を $P$ とすれば、すべり土塊のモーメントのつり合い式より

$$\sum \Delta l (c'/Fp) + \sum \{ \Delta W \cos \alpha + P \sin(\alpha + \theta) \} \cdot (\tan \phi' / Fp) = \sum \{ \Delta \sin \alpha - P \cos(\alpha + \theta) \} \dots(13)$$

ただし、 $P \sin(\alpha + \theta)$ と $P \cos(\alpha + \theta)$ には、アンカーの本数分を加える。なお、式(13)では締め付け力による摩擦抵抗力を $P \sin(\alpha + \theta) (\tan \phi' / Fp)$ と仮定しているが、これは正確でないことに注意されたい。この力を正確に評価するには、FEMのような精度が高い解析法の助けを借りる必要がある。式(13)より、計画安全率 $Fp$ は次式で表される。

$$Fp = \frac{\sum c'l + \sum \{ \Delta W \cos \alpha + P \sin(\alpha + \theta) \} \tan \phi'}{\sum \{ \Delta W \sin \alpha - P \cos(\alpha + \theta) \}} \dots(14)$$

上記の導出過程からわかるように、式(14)は無補強斜面の安全率の定義と整合性を持つ。道路土工-のり面工・斜面安定工指針には、式(14)に加えて、式(14)の分母の $P \cos(\alpha + \theta)$ を分子に置き換えた式も提示されているが、これは本論文で示した斜面安全率の定義と整合性をもたないことは明らかである。ところで、あるアンカーモデルを対象として弾塑性FEMとフェレニウス法から計算される安全率の比較計算が行なわれ、フェレニウス法による安全率は弾塑性FEMによる安全率より約5%小さくなることがわかっている<sup>7)</sup>。また式(14)から計算される安全率値が1以上である場合、この値は式(14)の分母の $P \cos(\alpha + \theta)$ を分子に置いた安全率式から計算される値より大きくなることがわかっている。すなわち後者の安全率式を用いると、安全率の値がFEMから得られる精度の高い値よりさらに小さくなることになり、好ましくない。この点からも式(14)を使うことが推奨される。

以上では、簡便分割法を例にして杭工とアンカー工のような対策工がある場合の安全率の考え方を説明し、せん断強度低減法の考え方のもとで安全率式を導出したが、簡易ビショップ法など他の解析法についても同様な考察により、無補強斜面の安全率式と整合性を持つ補強斜面の安全率式を導くことができる。

8.4 地すべり対策事業費の低減に対する対応

最近公共事業費は低減される傾向にある。これに伴い地すべり対策事業費も低減しつつある。事業費の低減は、対策工の設計または計画安全率の低減として直接跳ね返る。すなわち、これまでならアンカー工や杭工を用いていたのに、経費の面からこれが使えなくなり、地下水排除工のみで地すべり対策を済ませるケースが見られるようになった。このような場合には、たとえば100年に一回と言った豪雨の場合には、対策工の効果が限定されるため、地すべりの再活動を生じる可能性が高くなる。従って、地すべりが再活動することを前提とした対応策が求められることになる。また事業費を初期コストのみで評価するのではなく、事業完了後の効果や維持管理までを考慮に入れた試みも始まっている。

### 8.4.1 群馬県生須地すべりの例<sup>8), 9)</sup>

群馬県生須地すべりは、本体ブロックが幅800m、長さ600m、最大厚さ80mの大規模岩盤地すべりである。群馬県土木部のもとで、平成元年より平成15年までに本体ブロックの地すべり対策工として、排水トンネル工と集水井工（9基）を組み合わせた立体地下水排除工が施工された。しかしながら、地すべり活動を完全に終息させるには至らず、対策工の追加が要請されていた。一方、対策事業費の削減が要請されたため、ハード対策を当初案から縮小し、ソフト対策とチェック機能の追加により、住民の安全性を確保する新たな事業方針を立案した。すなわち、

①新規対策工は地下水排除工（集水井工）とし、大規模な抑止工（深礎杭工）は性急に実施しない。地下水排除工計画は、非定常の3DFEM浸透流解析を用いた予測解析を行い、将来的にも安定性が確保できる計画とする。具体的には、“それまでの観測期間中の最大降雨（1/30年確率に相当）に対して計画安全率1.05を確保する。また1/50年確率の降雨に対して計画安全率1.00を確保する”というものである。このような条件を満足する集水井の最適な組み合わせを、3DFEM浸透流解析と安定計算により検討し、当面の施工集水井は8基（原案は22基）、対策工費は7億円（原案は18億円）に抑えることができた（図-3、図-4）。

②深礎対策工などのハード対策を実施する代わりに、ソフト対策として自動計測機器による監視体制の強化、情報公開、地域住民と連携した避難体制の整備を行う。すなわち、1/50年確率の降雨に対して計画安全率を1.00としているので、それより大きな降雨が起こった場合には地すべりが再活動する可能性が高い。それに備えて、地表面の変位計測などモニタリング手法の整備と、降雨量やモニタリング結果などを参考にして住民へ警戒や避難を呼びかけるシステムを整備する。

③事業のチェック機能として、PLAN（計画）、DO（施工）、CHECK（検証）の流れを取り入れる。すなわち、

集水井工の施工中や施工後において降雨、地下水位、地表面変位などを常時計測し、その過程において仮定や想定のみや誤りを定期的に検証し、解析モデルを見直すことにより、より精度の高い予測を行い、事業の合理的な推進とコスト縮減を目指す。

### 8.4.2 維持管理段階での安全率の評価方法<sup>10)</sup>

地すべり対策工としてのアンカー工は永久アンカー工と位置づけられている。豪雨などの異常気象や地震等が発生した場合には、アンカーされた構造物の変位、変形およびクラックが発生したり、周辺地盤に緩みが発生したり、アンカー頭部の変位、変形、腐食が発生することにより、アンカーが本来の機能を十分に発揮できないことがある。また、供用期間が長い場合は、地盤や地下水などの周辺環境の影響をうけやすい。そのため、必要に応じて点検を実施し、アンカーの補修、再緊張、アンカーの増し打ちあるいは緊張力緩和等の対策がとられる。アンカーの機能復旧対策がとられない場合はもちろんのこと、機能復旧対策がとられた場合でも、当初設計アンカー力が期待できない場合も多く、供用期間に応じて安全率の低減を見込む必要もあろう。今後の課題として、アン

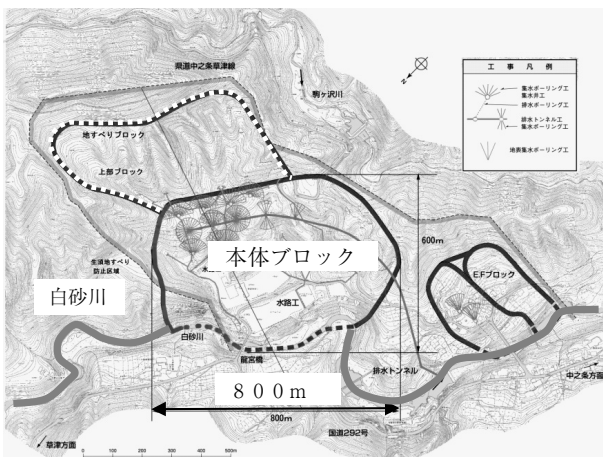


図-3 生須地すべり平面図（文献9）の図-1より引用）

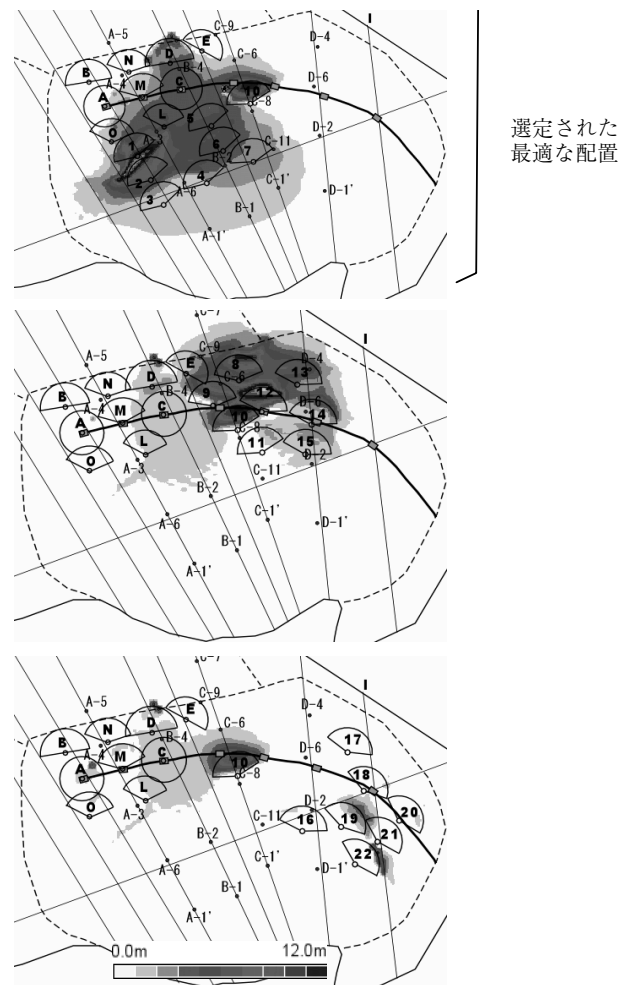


図-4 異なる集水井配置における水位低下の例（文献9）の図-10より引用）

カー工をライフサイクルの面から考えた場合、安全率の低減の評価手法についても研究しておく必要があると考えられる。

集排水ボーリングは、供用期間が長い場合、ストレーナーの目詰まりや不純物の孔壁付着等で集排水機能が低下することが多い。そのため融雪期や降雨時における地すべり滑動の抑制に支障を生じている事例も多い。集排水ボーリング洗浄工は、先端にノズルを装着した高圧ホースをボーリング保孔管に挿入し、ノズルから高圧水を噴射して、ストレーナーの目詰まりや孔壁付着物を除去するものである。最近では、ノズルの改良や高圧水の使用で洗浄効果が著しく高まっているとはいえ、地下水位や集排水量の時系列変化を観測することにより、それらの量が融雪水や降雨量に対して妥当なものかどうか、集排水機能が低下していないかどうかをチェックしておく必要がある。地下水排除工においても、施工後であっても、間隙水圧の時系列変化をもとに安全率の時系列変化を求め、長期にわたって地すべり活動状況を監視しておく必要があると考えられる。

公共事業費の縮減が行われても、住民の安全や生活は最大限に守られる必要がある。高度な解析技術、最新のモニタリング技術や維持管理技術、警戒・避難のための先進的なソフト対策技術などの発展がさらに求められている。

### 8.5 おわりに

地すべり安全率の話から始まり、最後は地すべり事業費縮減の対応策へと進んだ。このような厳しい現実の下

で事業を推進することはきわめて大変であるが、一方でより高度な技術を開発し取り入れるチャンスでもある。どのような厳しい環境下でもチャレンジ精神を失わないことが肝要である。

### 参考文献

- 1) 地すべり学会東北支部 (2001): 地すべり安定解析用強度決定法。
- 2) 地すべり: その解析と防止工 (下巻) (1985), (社)地すべり対策技術協会 (LANDSLIDE: Analysis and Control, Special Report 176の訳)。
- 3) 山上拓男・鶴飼恵三 (2001): 斜面の安定と変形解析総説—LEMとFEMの応用, 地すべり, 第38巻, 第3号, pp.9-19。
- 4) 山上拓男 (2004): 講座“豪雨時における斜面崩壊のメカニズムと危険度予測, 6. 斜面崩壊対策工 (その3)”, 土と基礎, Vol. 52, No. 3, p.71-76。
- 5) 道路土工—のり面工・斜面安定工指針 (1999), 日本道路協会。
- 6) 新版・地すべり鋼管杭設計要領 (2003), 地すべり対策技術協会。
- 7) 蔡飛・鶴飼恵三 (2003): アンカー工による斜面の補強効果—極限平衡法と弾塑性FEMとの比較, 地すべり学会誌, Vol. 40, No. 4, pp.8-14。
- 8) 藤原民章・新屋浩明・岩間倫秀・牧野孝久・倉岡千郎 (2004): 大規模地すべりの事業計画見直しとコスト縮減への取り組み, 第43回日本地すべり学会研究発表会, pp.375-378。
- 9) 角田信吉・鶴飼恵三・若井明彦・蔡飛・倉岡千郎・牧野孝久・藤原民章・新屋浩明: 4. FEMの地すべり解析への利用, 4.1FEM浸透流解析による集水井の最適配置の検討, 日本地すべり学会誌, Vol. 41, No. 4, 103-107, 2004。
- 10) 斜面防災対策技術協会 (2007): 地すべり対策技術設計実施要項。

(原稿受付2008年8月15日, 原稿受理2008年8月30日)