

ソイルパイプの過剰間隙水圧を考慮した安定計算法

Stability analysis method considering excess pore water pressure caused by soil pipe

太田英将*, 美馬健二 (太田ジオリサーチ)

Hidemasa OHTA, Kenji MIMA (Ohta Geo Research Co., LTD)

キーワード：過剰間隙水圧，安定解析，予防工設計，浅層崩壊

Keywords: Excess Pore Pressure, Slope Stability Analysis, Preventive Design, Shallow Landslide

1. はじめに

豪雨に伴う表層崩壊を観察すると、非常に高い地中内の水圧が原因となっていると推定される現象がみられる。また、現地で地盤強度計測や単位体積重量計測をした結果を用いて安定計算すると、静水圧が地表まで達しても安全率 F_s が 1.0 より大きく、崩壊確率 PF も 0% となることが多々ある。この事実は、表層崩壊を発生させる際に、静水圧に加えて斜面上方からソイルパイプ（ミズミチ）によって供給される過剰間隙水圧が関与していると考えるのが自然である。現時点で過剰間隙水圧を考慮した安定計算法は、実用化されたものはない。

本発表では、過剰間隙水圧を考慮した実用的な安定計算法を紹介する。この手法を用いれば、簡単に表層崩壊の予防工の設計を行うことが可能となる。

2. 過剰間隙水圧を考慮した安定解析式

過剰間隙水圧を考慮した安定解析式は次のようになる。一般全応力法（ATS 法）を用いるため、せん断に伴って発生する間隙水圧 U_s は考慮しない。

$$F_s = \frac{\sum \{(N - U_n - U_{ep}) \tan \phi + c\} l}{\sum T}$$

ここで、 N ：法線力 ($W \cos \theta$)、 U_n ：中立間隙水圧（主に静水圧）、 U_{ep} ：過剰間隙水圧 ($= \alpha \cdot \gamma_w \cdot \Delta h$)、 α ：過剰間隙水圧比 (0~1)、 γ_w ：水の単位体積重量、 Δh ：圧力水頭 0 地点からの比高、 T ：接線力、 ϕ ：せん断抵抗角、 c ：粘着力、 l ：すべり面長、である。

安定性の検討は、現場で強度のもっとも小さくなる排水条件と強度を用いるため CU 条件とその強度を用いる。土層強度検査棒で推定される強度は、CU 強度とされているので、その強度を用いることに特に問題はない（計測精度の問題は残るが）。

従来の安定計算との違いは、間隙水圧として静水圧だけでなく、斜面上方からの位置エネルギーが圧力源となる過剰間隙水圧を考慮しているだけである。

3. 斜面崩壊時の過剰間隙水圧比

ソイルパイプが飽和することによって過剰間隙水圧が発生すると考えると、大きな斜面高の山裾には

（途中に圧力水頭をゼロに消散させるような地下水の水の吹き出し口がない限り）非常に大きな水圧が作用することになる。

水圧の損失がない場合には、圧力水頭ゼロの箇所との比高 Δh 地点の水圧は、 $U_{ep} = \gamma_w \times \Delta h$ となるが、実際にはソイルパイプは不透水性ではないので、圧力損失が発生する。有効に作用する水圧を過剰間隙水圧比 α (0~1) を用いて表現すると、 $U_{ep} = \alpha \times \gamma_w \times \Delta h$ となる。

実際に豪雨により崩壊した斜面崩壊を、土層強度検査棒で計測した強度を用いて再現し、 α を逆解析すると、表 1 のような結果が得られた。 α は、スコリアのような軽い土の場合小さい軽傾向がある。また、斜面傾斜角が緩いほど大きくなる傾向がある。なお、 U_n は地表までの静水圧を作用させている。

表 1 崩壊地で再現した過剰間隙水圧比 α

基盤地質	α	γ	c	ϕ	θ
相生層群	0.355	18.0	10.4	26.6	19°
三浦層群	0.298	17.0	18.7	11.5	30°
相生層群	0.163	18.0	10.4	26.6	32°
丹波帯	0.107	18.0	11.0	36.1	35°
三波川帯	0.094	18.6	11.0	29.8	33°
阿蘇山	0.013	12.9	9.1	25.8	25°
伊豆大島	0.004	13.1	10.0	12.6	37°

α ：過剰間隙水圧比、 γ ：単位体積重量 (kN/m³)、
 c ：粘着力 (kN/m²)、 ϕ ：せん断抵抗角 (deg)、
 θ ：斜面傾斜角 (deg)

4. 圧力水頭ゼロ地点の認定方法

ソイルパイプが飽和すると過剰間隙水圧が作用するが、安定計算において水圧の起点を決定する必要がある。

地表に水の吹き出し口があれば、その箇所では圧力水頭ゼロとなっていると想定できる。小崩壊跡なども、水圧消散効果があるので、圧力水頭ゼロ地点

と評価して良いだろう。

逆に、水の吹き出し口や小崩壊のない斜面は、山の上の方から水圧が作用するため、山裾では巨大な水圧となるものと考えられる。

巨大な岩盤が横に吹き飛ばされているような現象（たとえば写真 1）は、斜面の途中であまり水圧消散口がない斜面で起きたものと推定される。



写真 1 水圧で巨大な岩塊が横に吹き飛ばされた事例 $\Delta h \approx 130\text{m}$ とすると $\alpha \approx 0.4$ ，2003 年九州豪雨災害時

5. 表層崩壊予防工への応用

表層土砂の地盤強度を実測して安定計算すると、浅層すべりの場合には粘着力 c が抵抗力としてよく効くため、地表面まで静水圧を作用させても安全率 $F_s < 1.0$ とならないことが多い。実際には崩れているので、静水圧以外の水圧が存在し、それはベテランの技術者の方が言われる「山が高いと山裾には凄い水圧が作用するんだ」ということなのだろう。

それを具体的に安定計算に組み込むためには、未知の過剰間隙水圧以外は、実測値を用いて検証する必要があった。土層強度検査棒という簡便なツールのお陰で、それが可能となった。

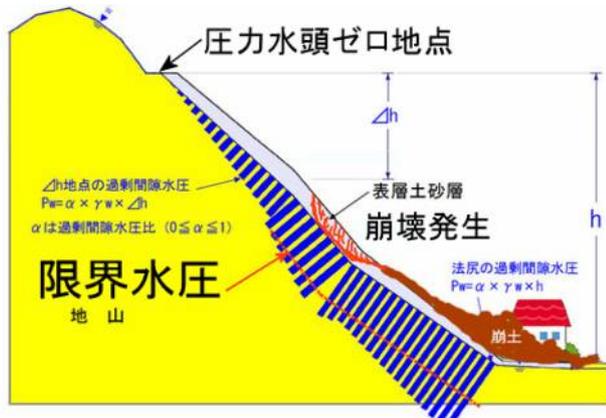


図 2 崩壊のイメージ図

比高 Δh が大きくなるほど、ソイルパイプ由来の過剰間隙水圧は大きくなるが、地盤強度で持ちこたえられなくなる

と崩壊が発生する

ソイルパイプ由来の過剰間隙水圧が作用して表層崩壊が起きるイメージ図を、図 2 に示す。地盤が持ちこたえられるギリギリの水圧を限界水圧とすると、限界水圧が発生する圧力水頭ゼロ地点からの比高 Δh の地点で斜面崩壊が発生する。斜面崩壊は、大きな水の吹き出し口でもあるので、新たな圧力水頭ゼロ地点となるため、周辺の斜面の安定度は崩壊の瞬間から急上昇する。

このメカニズムを応用すれば、表層崩壊予防工の設計が合理的かつ簡単にできる。

- (1) 崩壊事例等から、その地域の崩壊時の過剰間隙水圧比を求める。不明であれば $\alpha = 0.35$ 程度を用いる。
- (2) 崩壊が発生する限界水圧を超えないように人工的な、過剰間隙水圧消散工を配置する（図 3）。

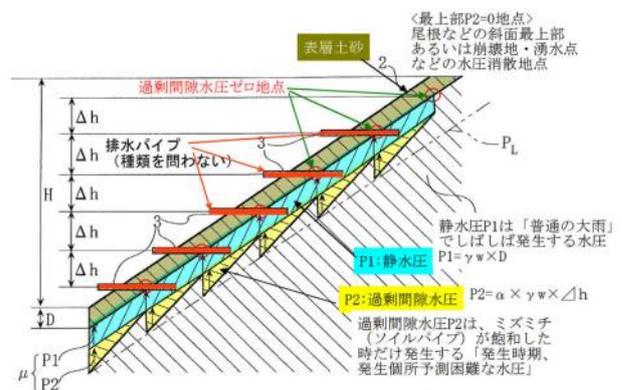


図 3 表層崩壊予防工の設計方法

地盤強度にはばらつきがあるので、ばらつきを考慮した確率計算をし、 $F_s < 1.0$ となる頻度、すなわち崩壊確率 PF を算出すれば、保全対象の重要度に応じて予防工採択の意思決定が可能となる。具体的には、崩壊確率 $PF \times$ 被害額の期待値によって判断できるようになる。

6. おわりに

「壊れたら速やかに直す」時代から、「重要地点は壊れないように事前に予防する」時代が変わってきている。

土砂災害の 8 割を占める表層崩壊に対しては、これまで「総合的に見た感じ、経験、勘」という根拠の薄い情報で意思決定が行われていたが、紹介した安定計算方法は、誰が行っても合理的に同じ結果を導ける。

参考文献

- 太田英将ほか（2016）：“浅層崩壊の安定性評価のための調査法と対策法”，第 55 回日本地すべり学会研究発表会