

斜面崩壊確率の変動に関する一考察

A CONSIDERATION ON FLUCTUATION OF PROBABILITY OF SLOPE FAILURE

荒木 功平¹, 石野 孝樹¹, 北村 良介²

Kohei ARAKI, Koki ISHINO and Ryosuke KITAMURA

¹ 鹿児島大学大学院理工学研究科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

² 鹿児島大学工学部 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

1. はじめに

鹿児島県を含む南九州には火砕流堆積物の非溶結部と定義されるシラスが広く分布している。シラス斜面では豪雨時にしばしば表層すべり型の崩壊を生じる。表層すべり型斜面崩壊のすべり厚さは数十 cm~1m 程度である。

このような斜面の安定計算を行う際には、せん断強度パラメータ（見かけの粘着成分 c 、内部摩擦角 ϕ ）が必要である。せん断強度パラメータを求める一般的な手順の中には多くの不確定性を含んでおり、不確定性を考慮した研究がすすめられている¹⁾²⁾³⁾。

本論文では、せん断強度パラメータを二次元正規分布に従う独立した2つの確率変数とみなし、平面すべり（無限斜面法）に対する崩壊確率の誘導を示し、それぞれのパラメータが崩壊確率に与える影響について考察を加えている。

2. 崩壊確率について

(1) 限界状態におけるせん断強度パラメータ

無限斜面法はすべり面の形を斜面表面に平行な平面と仮定した安定計算で、滑動長さがすべり深さに対して、十分大きい斜面（図-1、参照）の安定計算に用いる。無限斜面法での安全率の定義は次式で表される。

$$F = \frac{c + (W_A \cos \theta - U_A) \tan \phi}{W_A \sin \theta} \quad (1)$$

ここに、

θ : 斜面勾配

W_A, U_A : 単位面積あたりの土塊自重, 間隙水圧

$$W_A = \{ \rho_t (H_t - h_w) + \rho_{sat} h_w \} g \cos \theta \quad (2)$$

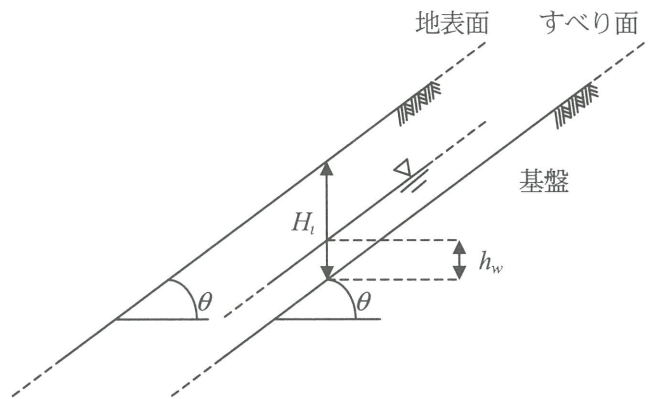


図-1 解析モデル（無限斜面）

$$U_A = \rho_w g h_w \cos^2 \theta \quad (3)$$

ここに、水位面はすべり面に平行。

ρ_t : 湿潤密度, H_t : すべり面より上位の表層厚さ, h_w : すべり面より上位の水面の高さ, ρ_{sat} : 飽和密度, g : 重力加速度, ρ_w : 水の密度

式(1)において、安全率 1 における c と ϕ の関係式は次式で表される。

$$c_{F=1} = W_A \sin \theta - (W_A \cos \theta - U_A) \tan \phi_{F=1} \quad (4)$$

斜面崩壊の発生を左右する事象としては、断続的・長期的な降雨による地下水位の上昇、瞬間的・短期的な集中豪雨による土塊自重の増加、風化の進行・含水比の増加による強度の低下などがある。崩壊確率にどのパラメータがどの程度影響するかをあらかじめ定量的に算出しておき、その特性を把握しておくことが重要である。式(4)に、式(2)、(3)を代入した式を式(5)に示す。

$$\frac{2c_{F=1}}{\rho_w g H_t \sin 2\theta} = \left\{ \frac{\rho_t}{\rho_w} \left(1 - \frac{h_w}{H_t} \right) + \frac{\rho_{sat}}{\rho_w} \right\} \left(1 - \frac{\tan \phi_{F=1}}{\tan \theta} \right) + \frac{h_w}{H_t} \frac{\tan \phi_{F=1}}{\tan \theta} \quad (5)$$

この式(5)は、右辺、左辺ともに無次元量となっている。右辺では、表層厚さと水面高さ、内部摩擦角と斜面勾配、湿潤密度と水の密度、飽和密度と水の密度の比に着目して整理している。ここで、飽和密度と水の密度の比は間隙比、土粒子密度が一定であれば変化しない。また、湿潤密度と水の密度の比についても飽和度の変化に伴う変化量は小さいものと考えられる（一般に湿潤密度は1.4~1.7g/cm³程度である）。一方、左辺では、粘着成分や表層厚さ、斜面勾配に着目している。

(2) 崩壊確率式の誘導

せん断強度パラメータの不確定性を考慮した崩壊確率は、 c 、 ϕ が正規分布に従うと仮定すると次式で表される。

$$P_f = \int_{-\infty}^{c_{F=1}} \int_{-\infty}^{\phi_{F=1}} f(c, \phi) d\phi dc \quad (6)$$

$f(c, \phi)$

$$= \frac{1}{2\pi \sigma_c \sigma_\phi \sqrt{1-\rho^2}} \cdot \exp \left[- \frac{\left\{ \left(\frac{c-\mu_c}{\sigma_c} \right)^2 + \left(\frac{\phi-\mu_\phi}{\sigma_\phi} \right)^2 \right\}}{2(1-\rho^2)} - 2\rho \left(\frac{c-\mu_c}{\sigma_c} \right) \left(\frac{\phi-\mu_\phi}{\sigma_\phi} \right) \right] \quad (7)$$

ここに、

- $f(c, \phi)$: 二次元正規分布確率密度関数
- μ_c, σ_c : 見かけの粘着成分の平均, 標準偏差
- μ_ϕ, σ_ϕ : 内部摩擦角の平均, 標準偏差
- ρ : 相関係数

3. 結果および考察

(1) 素因となるパラメータに関する考察

$\mu_\phi, \theta, H_t, h_w / H_t$ (この項では h_w は晴天時などにおける基準となる水面の高さを意味する。また、 h_w の増加は $\rho_t = \rho_{sat}$ の領域の増加を意味しており、 ρ_t (土塊

表-1 土質パラメータ

湿潤密度
ρ_t (g/cm ³)
1.45

表-2 二次元正規分布パラメータ

c の標準偏差	ϕ の標準偏差	相関係数
σ_c (kPa)	σ_ϕ (deg.)	ρ
0.2	3.0	0.0

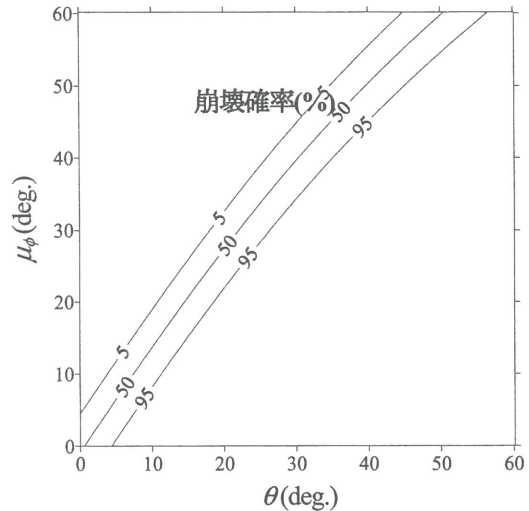


図-2 $\mu_\phi \sim \theta$ 面上の崩壊確率
($\mu_c = 0\text{kPa}, H_t = 0.5\text{m}, h_w / H_t = 0.5$)

自重)の増加を評価している)に着目した崩壊確率について考察する。表-1、表-2には想定した土質パラメータおよび二次元正規分布のパラメータを示す。

図-2には θ (deg.)、 μ_ϕ をそれぞれ横軸、縦軸にとり、算定された崩壊確率のコンターを示す。ただし、 $\mu_c = 0\text{kPa}, H_t = 0.5\text{m}, h_w / H_t = 0.5$ で一定として導いている。図-2より、斜面勾配が急になるほど崩壊確率は上昇し、内部摩擦角が大きいほど崩壊確率は減少することがわかる。また、 μ_ϕ が $\theta + 15$ 度以上ある場合、崩壊確率は小さい値を示しており、 μ_ϕ が θ よりも小さい場合、崩壊確率は大きい値を示す傾向があることがわかる。崩壊確率の変化は $\theta < \mu_\phi < \theta + 15^\circ$ で大きく変化している。一方、実斜面において「素因としての斜面勾配」が大きい状態で安定しているということ、すなわち、その斜面の安息角が大きいことを表しており、このことは同時に「素因としての内部摩擦角」が大きいことを表している。ここで、図-2から、崩壊確率5%、50%、95%の線がともに μ_ϕ や θ の増加に伴い、湾曲し始めることがわかるが、このことは、斜面勾配の増加に比して内部摩擦角が増加する場合、崩壊確率の上昇よりも内部摩擦角の増加による安定化の方が若干大きいことを示している。

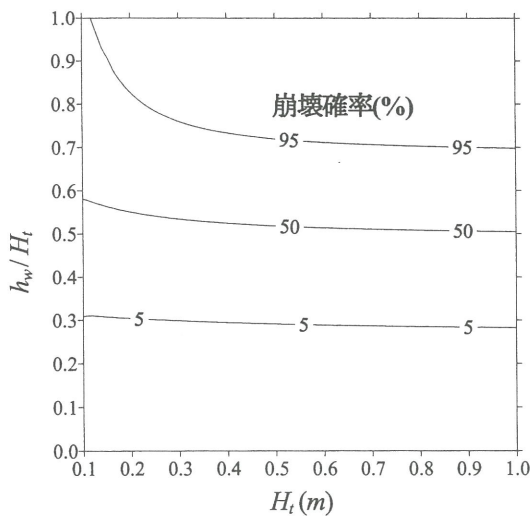


図-3 $h_w/H_t \sim H_t$ 面上の崩壊確率
($\mu_c=0\text{kPa}$, $\mu_\phi=40^\circ$, $\theta=30^\circ$)

図-3は横軸、縦軸にそれぞれ H_t , h_w/H_t をとった場合の、崩壊確率のコンターを示す。ただし、 $\mu_c=0\text{kPa}$, $\mu_\phi=40^\circ$, $\theta=30^\circ$ としている。

図-3より、表層厚さ H_t が増加するにつれて崩壊確率95%以上の領域が増加することがわかる。また、水面の高さ h_w の増加はどの H_t においても崩壊確率を増加させることがわかる。一方、 H_t が0.3m以上においては、崩壊確率5%と95%の線の h_w/H_t の間隔は、約0.4であり、 h_w/H_t が一定であれば、 H_t が変化しても崩壊確率はあまり変化しないことがわかる。したがって、斜面のもつ安定性は表層厚さよりも水面の高さに大きく左右され、断続的・長期的な降雨により水面の高さが増す場合、安定性が損なわれる可能性が高いと判断される。

図-4は、 $H_t=0.5\text{m}$, $\theta=30^\circ$ とし、 μ_ϕ/θ , h_w/H_t を横軸、縦軸にとり、算定された崩壊確率のコンターを示す。ただし、 $\mu_c=0\text{kPa}$ としている。この図は内部摩擦角と斜面勾配の値が近い場合における崩壊確率への影響を示したものである。断続的・長期的な降雨により水面の高さが高くなっていると、崩壊確率が大きい。特に内部摩擦角と斜面勾配の比が0.8である場合、水位や表層厚さに関わらず崩壊確率は95%以上の値を示している。一方、水面高さが基盤面と一致するとき ($h_w=0$) では、内部摩擦角が斜面勾配の1.2倍以上のときに崩壊確率は小さいことがわかる。水面の高さが表層厚さに比して低くても内部摩擦角が小さい場合や内部摩擦角が大きくても水面の高さが表層厚さに比して高い場合には崩壊確率が大きい値をもつことが示されている。

したがって、崩壊確率を目安にすると表層厚さ0.3m以上では水位変動に着目すればよい。水位変動は地盤中のサクシヨンの変動をとらえることによって把握す

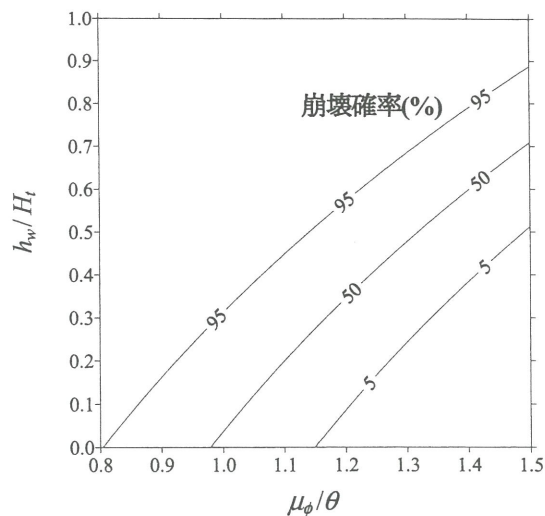


図-4 $h_w/H_t \sim \mu_\phi/\theta$ 面上の崩壊確率
($\mu_c=0\text{kPa}$, $H_t=0.5\text{m}$, $\theta=30^\circ$)

ることができる。内部摩擦角は含水状態によりあまり変化しないと考えられており、内部摩擦角は素因（ここでは降雨により変化しないパラメータを意味する）として扱うことができる。崩壊確率には内部摩擦角の具体値を土質試験などによって、あらかじめ調べておく必要がある。

(2) 誘因となるパラメータに関する考察

降雨に伴い変化するパラメータをここでは誘因と称することにする。 h_w , μ_c , ρ_t が挙げられるが、議論を簡単にするために ρ_t の変化は2.2項と同様に無視し、本項では、 h_w/H_t と μ_c の変化のもたらす影響について考察する。

図-5は $H_t=0.5\text{m}$, $\mu_\phi=40^\circ$, $\theta=30^\circ$ とし、 μ_c , h_w/H_t を横軸、縦軸にとり、算定された崩壊確率のコンターを示す。ただし、砂質土のような材料を想定し、 μ_ϕ は大きくとっている。この図より、見かけの粘着成分の増加は崩壊確率を減少させることがわかる。 $\mu_c=2\text{kPa}$ では崩壊確率は地下水位が変動しても崩壊確率が5%以下の値を示しているが、 $\mu_c=0\text{kPa}$ では地下水位の変動により崩壊確率は大きく変化することわかる。 μ_ϕ が大きい場合では、 μ_c が0~2kPaのような狭い領域で崩壊確率に大きく影響を与えることを表している。また、見かけの粘着成分が低下することにより斜面がかなり不安定化することを示している。崩壊確率5%の線と95%の線との間隔は、 μ_c において約1kPa程度しか差はない。 h_w/H_t の間隔が約0.4程度あることを考慮すると、表層すべり型斜面崩壊のような低拘束圧下では、水位変動に比べて見かけの粘着成分の及ぼす影響がかなり大きいといえる。

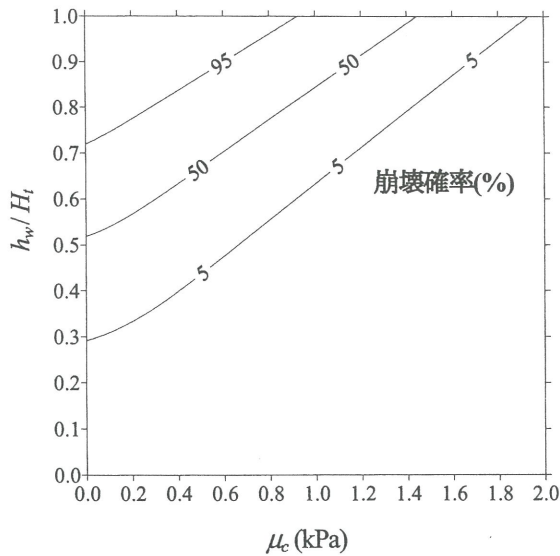


図-5 $h_w/H_t \sim \mu_c$ 面上の崩壊確率
($H_t=0.5\text{m}$, $\theta=30^\circ$, $\mu_\phi=40^\circ$)

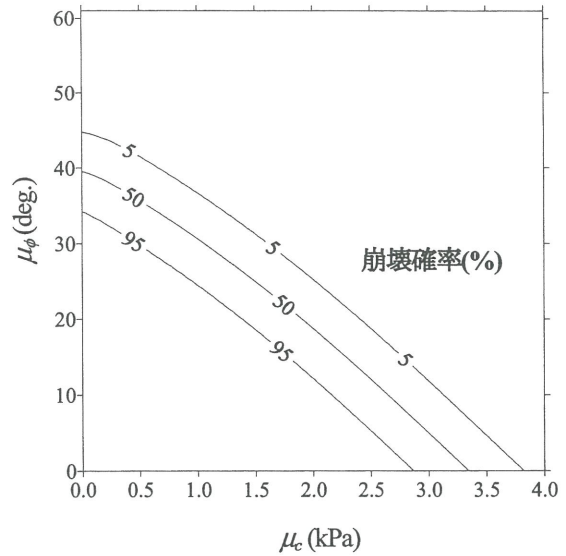


図-6 $\mu_c \sim \mu_\phi$ 面上の崩壊確率
($H_t=0.5\text{m}$, $h_w/H_t=0.5$, $\theta=30^\circ$)

(3) せん断強度パラメータに関する考察

図-6 は $H_t=0.5\text{m}$, $h_w/H_t=0.5$, $\theta=30^\circ$ とし、 $\mu_c \sim \mu_\phi$ 面上の崩壊確率のコンターを示している。

見かけの粘着成分の平均値 μ_c が増加するにつれて崩壊確率は減少し、内部摩擦角の平均値 μ_ϕ が大きいほど崩壊確率は小さいことがわかる。また、見かけの粘着成分が 4kPa 程度であれば内部摩擦角の値によらず崩壊確率は 5%以下であることがわかる。崩壊確率 5%と 95%の線における間隔は、 μ_c において図-5 と同様に約 1kPa 程度しか差はないことがわかる。一方、 μ_ϕ でみると約 10° ほど差がある。

図-7 は図-6 における見かけの粘着成分の標準偏差 σ_c を 0.5kPa にした場合を示している。崩壊確率 5%と 95% の線における間隔は、 μ_c において約 2kPa, μ_ϕ でみると約 15° ほど差がある。図-6, 7 より内部摩擦角に比して見かけの粘着成分の影響はかなり大きいことがわかる。

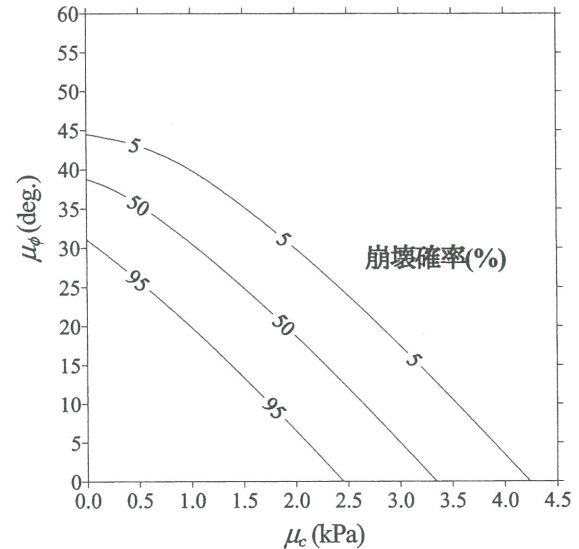


図-7 $\mu_c \sim \mu_\phi$ 面上の崩壊確率
($H_t=0.5\text{m}$, $h_w/H_t=0.5$, $\theta=30^\circ$, $\sigma_c=0.5\text{kPa}$)

4. おわりに

本論文ではせん断強度パラメータ c, ϕ を二次元正規分布に従う独立な確率変数とみなし、斜面安定解析の中に崩壊確率を導入した。そして、崩壊確率における各パラメータ間の関係を求めた。その結果、地下水位が高いと崩壊確率が大きいことを示した。また、降雨に伴うパラメータの変化を考慮した場合、見かけの粘着成分の 1kPa 程度の変化が崩壊確率に大きく影響を及ぼす。今後、降雨に伴う見かけの粘着成分の低下の定量的な評価が重要となる。

謝辞：本研究に対して科研費（基盤 B, No.13450196, 代表：北村）の援助をいただいた。ここに謝意を表します。

[参考文献]

1. 松尾稔・上野誠：破壊確率を用いた自然斜面の崩壊予測に関する研究 土木学会論文集 第 208 号/Ⅲ-5 pp.261-270, 1972.
2. 鈴木誠・石井清：土質定数の空間分布推定法を用いた確率有限要素法 土木学会論文集 第 394 号/Ⅲ-9 pp.97-104, 1988.
3. 荒木ら：降雨に伴う斜面崩壊確率について、豪雨時の斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測に関する研究委員会 社団法人 地盤工学会, pp.77-84, 2003.

(2004. 6. 18 受付)