

降雨による斜面の不安定化の定量的評価

酒匂一成¹, 北村良介², 荒木功平³, 島田龍郎³, 田中秀明⁴, 横山陽一⁴

¹鹿児島大学大学院 理工学研究科 システム情報工学専攻 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

²鹿児島大学 工学部 海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

³鹿児島大学大学院 理工学研究科 海洋土木工学専攻 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

⁴国土交通省 鹿児島国道工事事務所 (〒890-0005 鹿児島市下伊敷 1-52-2)

1. はじめに

鹿児島県を含む南九州一帯には、火砕流堆積物の非溶結部と定義されるシラスが分布している。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。表層すべり型崩壊のすべり厚さは、数十 cm から 1m 程度である。表層すべり型崩壊の原因として、降雨によるすべり土塊自重の増加、正の間隙水圧の増加と含水比の増加に伴う見掛けの粘着成分の低下が挙げられる。

北村らは、降雨時の表層すべり型崩壊を予知するためのシステムを提案している¹⁾。降雨時の斜面崩壊を予知するためには、雨水の浸透による斜面内の含水状態の変化や潜在すべり面付近の含水状態の変化に伴う見掛けの粘着成分を把握する必要がある。そこで、北村らは土の水分特性曲線や含水比-不飽和・飽和透水係数の関係を得るための間隙モデル²⁾や含水比の変化に伴う見掛けの粘着成分の変化を計算するための粘着モデル³⁾を提案した。崩壊予知システムを用いて、間隙モデル及び粘着モデルを用いて、2次元不飽和・飽和浸透解析及び斜面安定解析を行い、時々刻々と変化する斜面の安定性を定量的に評価することができる。

斜面の安定性を定量的に評価するための指標の代表的なものとして、安全率が挙げられる。安全率を計算するためには、潜在すべり面上でのせん断強度パラメータ(見掛けの粘着成分 c 、内部摩擦角 ϕ)が必要となる。せん断強度パラメータを得るためには、潜在すべり面上で採取した不攪乱試料を用いてせん断試験を行う必要がある。しかし、見掛けの粘着成分 c と内部摩擦角 ϕ は試料の採取方法に伴う乱れ、試料採取場所の違いや室内せん断試験の精度によって不確定性を有している。表層すべり型崩壊を想定する場合、拘束圧は極めて低く(すべり厚さが 1m の時 10kPa 程度)、そのような圧力条件でのせん断試験の精度は低く、得られたせん断強度パラメータの不

確定性は増大する。故に、せん断試験から得られたせん断強度パラメータを用いて計算された安全率にも、少なからずバラツキが含まれると考えられる。そこで、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した 2 つの確率変数とみなし、不確定性を考慮した安定性の定量的評価指標として崩壊確率を提案し、崩壊確率を適用した降雨時の斜面の不安定化の定量的評価について考察を行う。

2. 崩壊確率の算定

これまで、斜面の安定性を評価する指標として安全率が用いられてきた。しかし、安定解析に用いられるせん断強度パラメータ c 、 ϕ は、上述のように不確定性を有している。そこで、不確定性を考慮することで斜面の安定性を崩壊確率で表すことを試みる。

ある含水比 w 時の c 、 ϕ が三軸せん断試験により得られる。しかし、破壊包絡線の引き方によりいくつかの c 、 ϕ が得られる。すなわち、試験データから c 、 ϕ を一意的に決められることは希である。一般に、標本空間が 2 次元の標本点で構成されている場合、それに対応する 2 つの確率変数を用い、2 次元の確率分布を得ることができる。そこで、確率変数を (c, ϕ) とし、次式に示す二次元正規分布を用いる。

$$f(c, \phi) = \frac{1}{2\pi\sigma_c\sigma_\phi\sqrt{1-\rho^2}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\{A^2 - 2\rho AB + B^2\}\right] \quad (1)$$

$$A = \left(\frac{c - \mu_c}{\sigma_c} \right), \quad B = \left(\frac{\phi - \mu_\phi}{\sigma_\phi} \right)$$

ここに、 μ_c : 見掛けの粘着成分 c の平均,
 σ_c : 見掛けの粘着成分 c の標準偏差,
 μ_ϕ : 内部摩擦角 ϕ の平均,
 σ_ϕ : 内部摩擦角 ϕ の標準偏差,
 ρ : 相関係数,

相関係数は $-1 \leq \rho \leq 1$ の性質を持っており、次式で表される。また、 c と ϕ は独立であれば、 $\rho=0$ となる。

$$\rho = \text{Cov}[c, \phi] / \sigma_c \sigma_\phi \quad (2)$$

ここに、 $\text{Cov}[c, \phi]$: 確率変数 c と ϕ の共分散。

図-1 は、飽和度 19.2% 時において確率変数 c の平均 $\mu_c = 4.28 \text{ kPa}$ 、標準偏差 $\sigma_c = 0.2 \text{ kPa}$ 、 ϕ の平均 $\mu_\phi = 38.0^\circ$ 、標準偏差 $\sigma_\phi = 2.0^\circ$ であるときの二次元正規分布を示している。二次元正規分布は、 (c, ϕ) の組み合わせの発生確率を表している。そこで崩壊確率とは、安全率=1 以下となるような (c, ϕ) の組み合わせの確率を求めたものである。

ここで、安全率=1 となる時の見掛けの粘着成分 c_f と内部摩擦角 ϕ_f の関係を求める。本研究では、表層すべり型崩壊に対して、Janbu 法を適用して安全率の計算を行っている。Janbu 法の式は、以下のように示される。

$$F_j = \frac{\sum \left[\frac{c \cdot b + (W - \Delta V - U \cos \alpha) \tan \phi}{\cos^2 \alpha + \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi / F_j} \right]}{\sum \{ \Delta E + (W - \Delta V) \tan \alpha \}} \quad (3)$$

ここに、 c : 見掛けの粘着成分、 b : スライス幅、
 W : スライス自重、 ΔV : スライス間力、
 U : スライス底面に働く間隙水圧の合力、
 α : 潜在すべり面が水平面となす角度、
 ΔE : スライス側面に働く間隙水圧の合力の差、
 ϕ : 内部摩擦角、 F_j : 安全率。

式 (3) 中の見掛けの粘着成分 c と内部摩擦角 ϕ に μ_c 、 μ_ϕ をそれぞれ代入することで、安全率が計算される。

Janbu の式で $F_j=1$ となる時の $c_f - \phi_f$ 関係を求めるため、スライス底面付近の見掛けの粘着成分 c 、内部摩擦角 ϕ 及び含水状態が、全てのスライスで同一なものであると仮定する。 $F_j=1$ として式 (3) を整理すると次式が得られる。

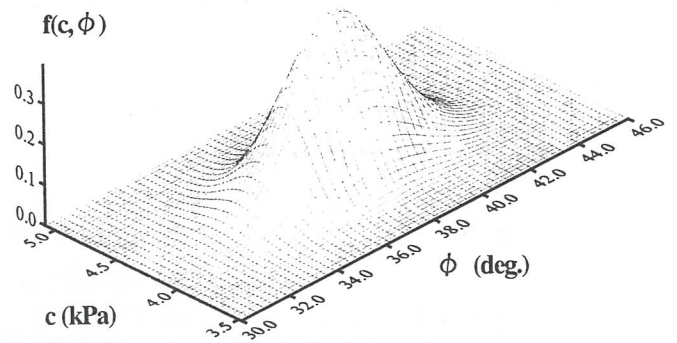


図-1 二次元正規分布

$$c_f = \frac{\sum \{ \Delta E + (W - \Delta V) \tan \alpha \}}{\sum \left[\frac{b / (\cos^2 \alpha + \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi_f)}{\sum \left\{ \frac{(W - \Delta V - U \cos \alpha) \tan \phi_f}{\cos^2 \alpha + \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi_f} \right\}} \right]} \quad (4)$$

ここに、 $c_f : F_j=1$ の時の見掛けの粘着成分、
 $\phi_f : F_j=1$ の時の内部摩擦角。

式 (1) の二次元正規分布と式 (4) で得られる $c_f - \phi_f$ 関係から崩壊確率 P_f が次式のように算定される。

$$P_f = \int_{-\infty}^{c_f} \int_{-\infty}^{\phi_f} f(c, \phi) d\phi dc \quad (5)$$

図-2 は、潜在すべり面を持つ急勾配斜面を示している。表-1 に示される条件で式 (3) を用いて安定解析を行うと安全率 $F_j=1.98$ となる。式 (4) を用いて $c_f - \phi_f$ 関係を計算した結果を図-3 に示す。図-1 と図-3 より、式 (5) を用いて崩壊確率が計算される。

飽和度 19.2%、安全率 $F_j=1.98$ の斜面の崩壊確率は、0.0% となる。

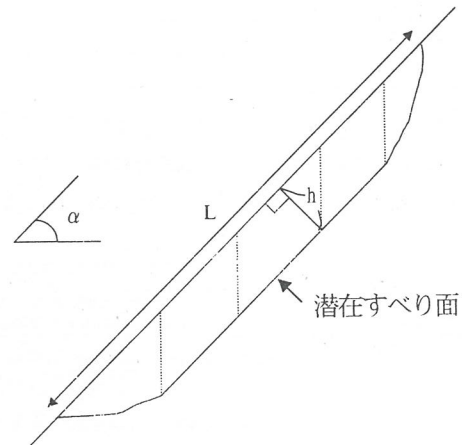


図-2 急勾配斜面と潜在すべり面

表-1 計算条件 (飽和度 19.2%時)

斜面の条件		見掛けの粘着成分c	
すべり長さL	20m	平均 μ_c	4.28kPa
すべり厚さh	50cm	標準偏差 σ_c	0.2kPa
斜面の傾斜角 α	45°	内部摩擦角 ϕ	
スライス数	5	平均 μ_ϕ	38°
飽和度	19.2%	標準偏差 σ_ϕ	2°

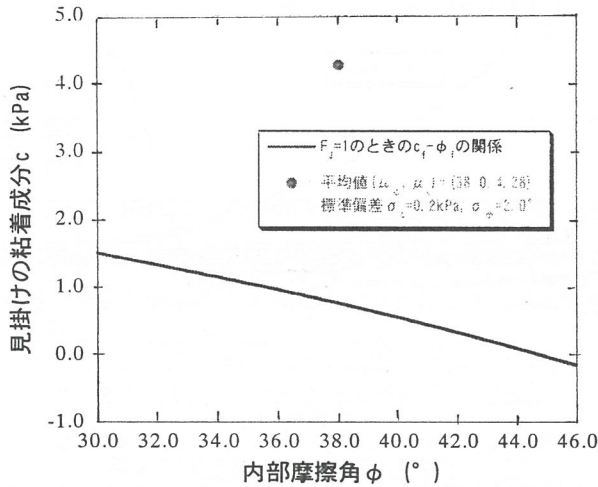


図-3 $F_j=1$ の時の c_f-c_ϕ 関係 (飽和度 19.2%)

3. 降雨時の安定性評価に対する崩壊確率の適用

崩壊確率を適用するためには、斜面内の含水状態が一樣に変化し、含水状態の変化に対する見掛けの粘着成分の変化量が潜在すべり面上で一樣であることを仮定する必要がある。そこで、降雨時の斜面崩壊の原因の一つである含水状態の変化に対する見掛けの粘着成分の変化について、北村らが提案した粘着モデルを用いて計算する。図-4 は、粘着モデルにより計算された飽和度-見掛けの粘着成分の関係であり、見掛けの粘着成分の平均 μ_c が飽和度の増加に伴い減少していく様子を示している。本論文では、見掛けの粘着成分の標準偏差 σ_c 、内部摩擦角の平均 μ_ϕ と標準偏差 σ_ϕ は、含水状態の変化に対して変化しないものと仮定している。よって、含水状態の変化に対して図-1 に示した二次元正規分布は、見掛けの粘着成分 c 軸方向に平行移動することになる。また、斜面内の含水状態が変化することによって、 $F_j=1$ となる時の c_f-c_ϕ 関係が変化する。そこで、飽和度 80.9%時での計算を行い飽和度 19.2%との違いを検討する。表-2 に飽和度 80.9%時の計算条件を示している。図-5 は、飽和度 80.9%と 19.2%でのせん断強度パラメータの平均値 (プロット) と $F_j=1$ となる時の c_f-c_ϕ 関係 (曲線) を示している。図-5 より、飽和度が高くなると安全率 $F_j=1$ となるために必要な c_f の値が大きくなることわかる。これは、 $F_j \leq 1$ となる (c, ϕ) の組み合わせの数が増えたこと

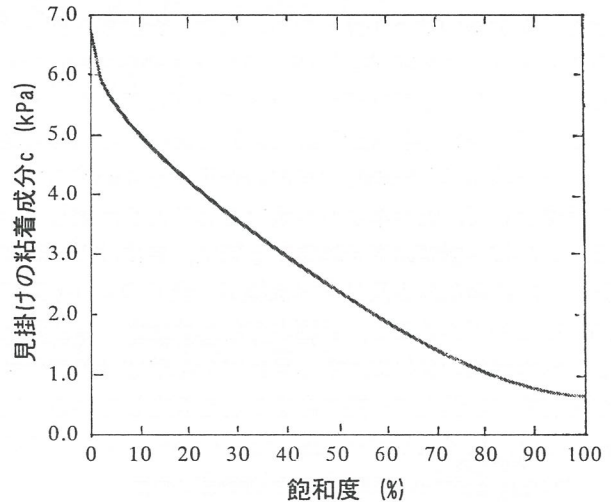


図-4 飽和度-見掛けの粘着成分 $c (= \mu_c)$ の関係
表-2 計算条件 (飽和度 80.9%時)

斜面の条件		見掛けの粘着成分c	
すべり長さL	20m	平均 μ_c	1.01kPa
すべり厚さh	50cm	標準偏差 σ_c	0.2kPa
斜面の傾斜角 α	45°	内部摩擦角 ϕ	
スライス数	5	平均 μ_ϕ	38°
飽和度	80.9%	標準偏差 σ_ϕ	2°

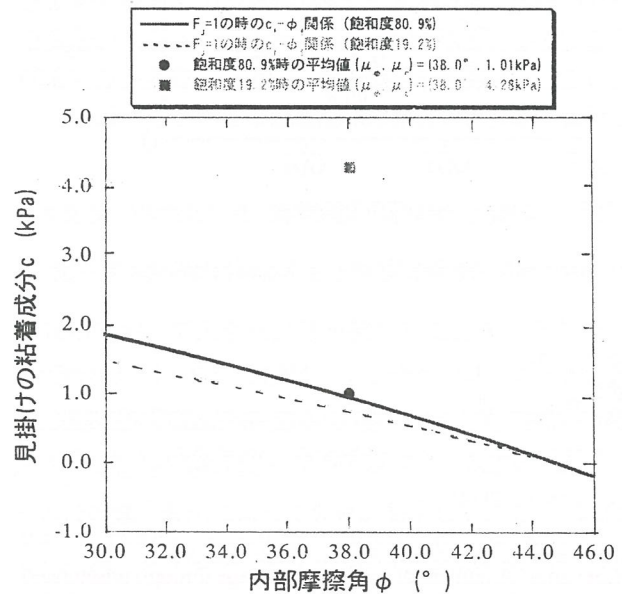


図-5 $F_j=1$ の時の c_f-c_ϕ 関係 (飽和度 19.2%, 80.9%)

を意味する。式 (3) を用いて安定解析を行うと安全率 $F_j=1.01$ となる。このときの斜面の崩壊確率 P_f は、42.5% となる。

以上の方法により、降雨によって斜面内の含水状態が変化したときの斜面の安定性の評価を崩壊確率で行うことができる。ここで、表-3 に示す条件の下で飽和度が 0% から 100% に変化する時の斜面の安全率及び崩壊確率の変化を計算する。飽和度の変化に対する見掛けの粘着成分 $c (= \mu_c)$ の変化は図-4 に示された関係を用いて求めてい

る。計算結果を図-6 に示す。図-6 より飽和度の増加とともに安全率の低下が見られる。また、安全率が約 1.2 以上の場合、崩壊確率は 0.0% であり、安全率が約 1.2 よりも小さくなると崩壊確率が急激に増加していく。安全率が 1.0 の時の崩壊確率は、50.0% である。これらの結果から崩壊確率が降雨時の斜面の安定性を評価するための指標として、安全率より有望であることを示唆している。しかし、崩壊確率を誘導する際に、見掛けの粘着成分 c 、内部摩擦角 ϕ 及び含水状態が、全てのスライスで同一なものであること、斜面内の含水状態が一樣に変化し、含水状態の変化に対する見掛けの粘着成分の変化量が潜在すべり面上で一樣であることを仮定している。実斜面では、層構成や含水状態の分布の違いがあり、これらの仮定の妥当性の検討は今後の課題である。

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した 2 つの確率変数とみなし、不確定性を考慮した安定性の定量的評価指標として崩壊確率を提案し、崩壊確率を適用した降雨時の斜面の不安定化の定量的評価について考察を行った。崩壊確率が降雨時の斜面の安定性を評価するための指標として、安全率より有望であることが説明された。今後、いくらかの改良を行うことで崩壊確率は降雨時の斜面の不安定化を定量的に評価するための有用な指標となると考えられる。

謝辞：本研究は、科研費（地域連携：No. 12792009、基盤 B：No. 13450196）の援助を受けた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 北村良介ら：しらす斜面崩壊予知システム確立に関する基礎的研究，科研費報告書（課題番号：09555153），pp. 33~67, 2000.
- 2) R.Kitamura, S.Fukuhara, K.Uemura, J.Kisanuki and M.Seyama：A numerical model for seepage through unsaturated soil, Soils and Foundations, Vol.38, No.4, pp.261~265, 1998.
- 3) 酒匂一成, 山田満秀, 北村良介：新しいしらす斜面の安定解析手法, 土木学会応用力学論文集, Vol. 3, pp. 497-503, 2000.

表-3 計算条件

斜面の条件		見掛けの粘着成分 c	
すべり長さ L	20m	標準偏差 σ_c	0.2kPa
すべり厚さ h	50cm	内部摩擦角 ϕ	
斜面の傾斜角 α	45°	平均 μ_ϕ	38°
スライス数	5	標準偏差 σ_ϕ	2°

*見掛けの粘着成分 c の平均 μ_c は、図-4 を参照。

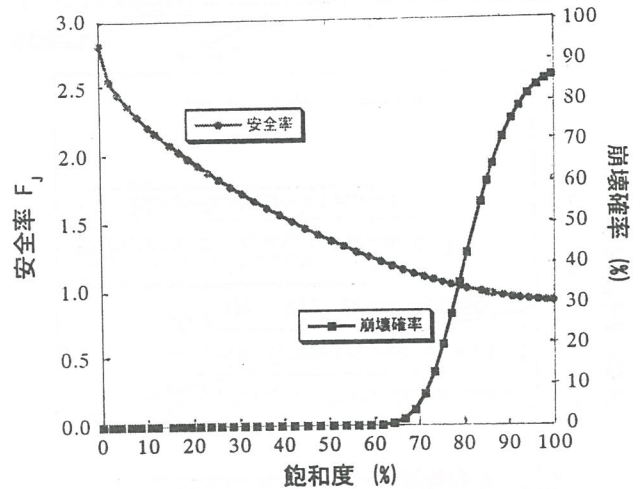


図-6 飽和度-安全率・崩壊確率の関係