

降雨に伴う表流水と浸透力に着目した緩勾配斜面の安定解析と土砂量評価

九州大学大学院 正会員 荒木功平、学生会員 奥村謙一郎、
九州大学大学院 正会員 安福規之、大嶺聖、ハザリカ・ヘマンタ

1.はじめに

地球温暖化等の気候変動に伴う大雨の頻度増加が指摘されるようになり、各種産業への影響等が懸念されている。特に沖縄県では、亜熱帯特有の高温多雨気候により、土壌侵食を受けやすく、農地からの赤土等の土砂流出量は年間 20 万トン以上といわれる。このような中、沖縄県は圃場勾配修正事業（勾配上限 3%）等様々な対策を行っている。安福ら¹⁾は、流出メカニズムの解明および気候変動を踏まえた適応策の立案に向け、宜野座村の農地で実験研究を進めている。一方、粒子の力のつり合いに着目し、降雨に伴う表流水と粒度分布を考慮して土砂流出量を評価してきた²⁾。しかし、土塊としての安定性評価は行っていない。一般に、農地のような緩勾配斜面が地盤工学の研究・解析対象とされることは稀であり、成果は乏しい。特に表層厚さが薄く、拘束圧が非常に小さい条件下で、せん断強度パラメータを求める際には不確実性が入りこむ。

本概要では、表流水と不飽和浸透力を考慮した緩勾配斜面の安定性評価の試みとして、無限斜面法による安定解析を行う。また、見かけの粘着成分の不確実性をその標準偏差の導入により評価し、斜面崩壊確率を導出する。さらに、崩壊確率と対象土塊量から算出した土砂流出量の期待値（リスク）を考察している。

2.斜面安定解析（無限斜面法）

無限斜面法は滑り面が地表面に平行な平面と仮定した安定計算法で、表層厚さが薄く、滑動長さが十分大きい斜面（参照、図-1）に用いられる。ここで、表流水、浸透水、鉛直・水平震度、降雨量を導入した単位奥行き・単位滑り長さ（1m）における無限斜面法の安全率 F （せん断抵抗力比）を式(1)~(6)により算出する。

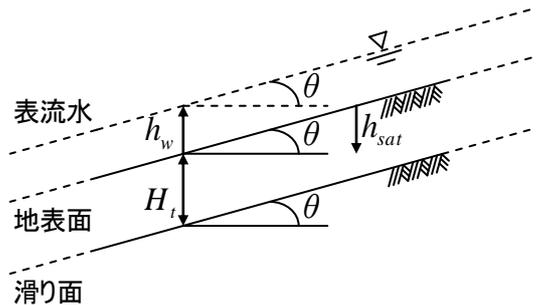


図-1 解析モデル(無限斜面)

$$F = \frac{c \cdot 1 \cdot 1 + [(1 + k_v)W - P_v] \cos \theta - k_h W \sin \theta}{(1 + k_v)W \sin \theta + k_h W \cos \theta + J} \tan \varphi \quad (1)$$

$$W = \{\rho_w \cdot h_w + \rho_t (H_t - h_{sat}) + (\rho_d + n \cdot \rho_w) \cdot h_{sat}\} \cdot g \cdot 1 \cdot \cos \theta \cdot 1 \quad (2)$$

$$P_v = \rho_w g \cdot \{S_r \cdot H_t + (1 - S_r) h_{sat}\} \cdot 1 \cdot \cos \theta \cdot 1 \quad (3), J = i \cdot P_v \quad (4), i = \sin \theta \quad (5), h_{sat} = (h_q - h_w) / \{(1 - S_r) \cdot n\} \quad (6)$$

ここに、 c ：見かけの粘着成分、 k_v ：鉛直震度、 W ：土塊と表流水の重力、 θ ：斜面勾配、 φ ：内部摩擦角、 k_h ：水平震度、 P_v ：浮力、 J ：斜面方向浸透力、 ρ_d ：乾燥密度、 g ：重力加速度、 H_t ：表層厚さ、 ρ_w ：水の密度、 h_w ：表流水深、 n ：間隙率、 h_{sat} ：浸透水深、 ρ_t ：湿潤密度、 i ：斜面方向動水勾配、 S_r ：飽和度、 h_q ：降雨量

なお、地表面直下の不飽和帯を考えているが、強度や飽和度の変化、サクシオンは考えていない。

図-2 に表-1 の想定パラメータにおける表層厚さ～安全率関係を示す。ただし、土粒子密度は宜野座村で採取した赤土（国頭マージ）の値を用い、斜面勾配は 3%（約 2 度）とした。また、浮力 P_v 、浸透力 J の違いによる計算結果を示す。図-2 より浸透力を考慮しない場合、安全率を大きく評価することがわかる。図-3～7 に安全率～斜面勾配、水平震度、見かけの粘着成分、表流水深、浸透水深関係を示す。浮力より浸透力の影響が図-3、5～7 では大きかった。図-4 では浸透力に比べ浮力の影響が水平震度とともに大きくなった。

表-1 想定入力パラメータ

重力加速度	水の密度	土粒子密度	飽和度	間隙比	乾燥密度	湿潤密度	見かけの粘着成分	内部摩擦角	斜面勾配	表層厚さ	表流水深	降雨量	鉛直震度	水平震度
g	ρ_w	ρ_s	S_r	e	ρ_d	ρ_t	c	φ	θ	H_t	h_w	h_q	k_v	k_h
m/s^2	g/cm^3	g/cm^3	%		g/cm^3	g/cm^3	kN/m^2	deg.	%	m	m	m		
9.8	1	2.668	80	1	1.334	1.734	2	25	3	0.05	0	0	0	0

キーワード 土壌侵食、表流水、浸透力、崩壊確率、斜面安定解析

連絡先 〒819-0385 福岡市西区元岡 744 番地 国立大学法人九州大学 大学院 工学研究院 TEL092-802-3378

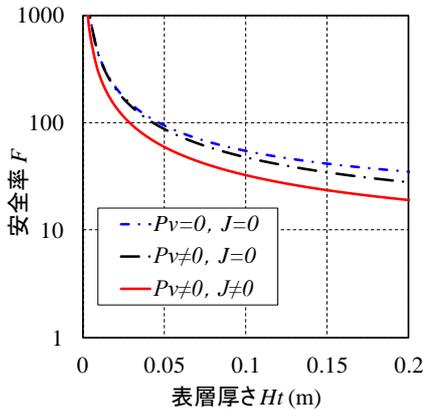


図-2 表層厚さの影響

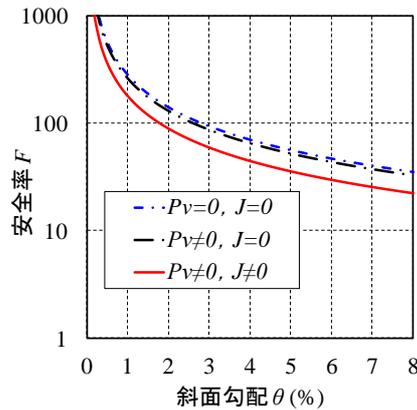


図-3 斜面勾配の影響

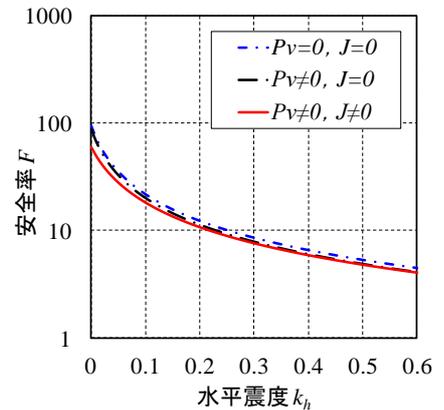


図-4 水平震度の影響

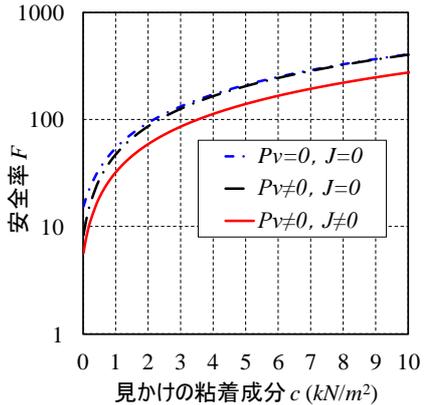


図-5 見かけの粘着成分の影響

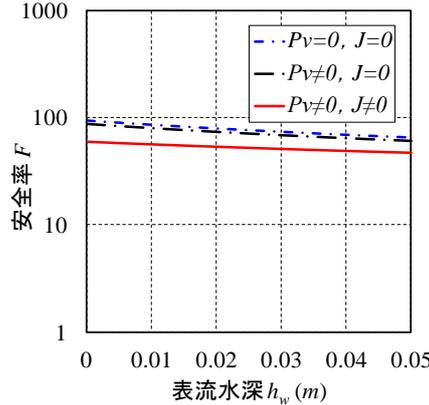


図-6 降雨に伴う表流水の影響
($h_w = h_q$ 、 $h_{sat} = 0$)

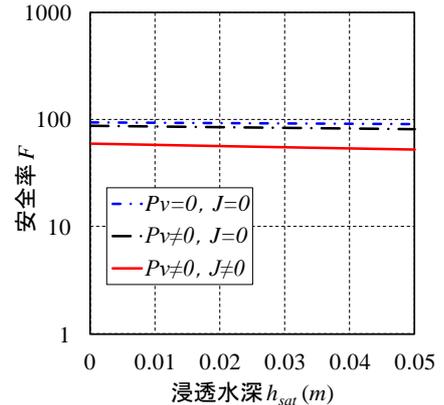


図-7 降雨に伴う浸透水の影響
($h_{sat} = h_q / \{(1-S_r) \cdot n\}$ 、 $h_w = 0$)

3. 斜面崩壊確率と土砂流出量期待値 (リスク)

見かけの粘着成分 c が正規分布 $f(c)$ に従うとして不確定性を考慮した崩壊確率 P_f を式(6)により導出する。ここに、 $c_{F=1}$ は式(1)において、安全率 F が 1 のときの c である。 c の標準偏差は、本概要では仮に c の 2 分の 1 (変動係数を 0.5) とした。単位面積 ($1m^2$)・単位厚さ (1mm) あたりの土砂流出量 (期待値) E (g/mm) は式(7)により表される。図-8、図-9 に斜面勾配～崩壊確率、土砂流出量期待値関係を示している。

$$P_f = \int_{c_{F=1}}^{\infty} f(c)dc \quad (6)、 \quad E = P_f \cdot \rho_d \cdot 1 \cdot \cos\theta \cdot 1 \cdot 1000 \quad (7)$$

斜面勾配に対して安全率は大きく変化する (図-3 参照) のに対し、図-8 における崩壊確率の変化は小さい。また、安全率が大きくても崩壊確率は存在し、図-9 より、土砂流出のリスクは存在するといえる。

4. おわりに

本概要では表流水および浸透力を考慮した安定解析、見かけの粘着成分の不確定性を考慮した土砂流出量評価を行った。今後、宜野座村で実施している現地実験結果と比較し、定量的な評価手法を確立したい。

謝辞：本研究の一部は、環境省の環境研究総合推進費 (S8-2(2)、研究代表者：小松利光)、九州大学の工学研究院若手研究者育成研究助成 (研究代表者：荒木功平)、(社)九州建設技術管理協会の建設技術研究開発助成 (研究代表者：荒木功平) により実施された。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 安福規之・大嶺聖・荒木功平・村山啓太：気候変動に伴う赤土等流リスクの増大に備える適応策に向けた取り組み、第9回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、公益社団法人地盤工学会、pp.201-206、2011。
- 2) K.Araki, N.Yasufuku, K.Murayama, K.Omine and H.Hazarika：Modeling for outflow of soil sediments considering grain size distribution、The 2nd Japan-Korea Joint Workshop on Unsaturated Soils and Ground、pp.151-160、2011。

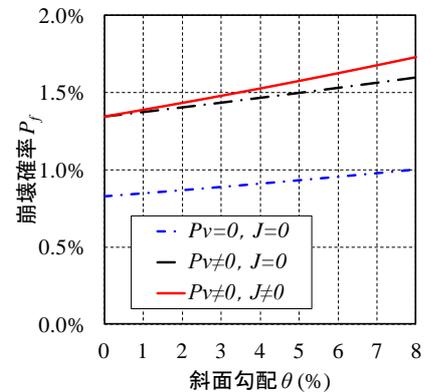


図-8 崩壊確率

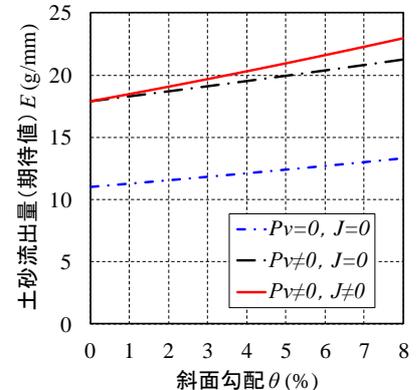


図-9 土砂流出量(期待値)