

金沢大学工学部 正員 西田 義親
同 正員 八木 則夫
同 学生員 〇稻寺 隆

1. はじめに

従来、降雨に伴う斜面崩壊の問題について、実験的取り扱いがいくつかのところでなされている。本論文は雨水浸透に伴う間げき水圧の発生と自重の増加、サクションの消失等を考慮した無限斜面の安定について、若干の計算を行なったものである。著者⁽³⁾は、既に、降雨が鉛直に浸透する際に発生する間げき水圧を表わす式を与えている。その時に用いた定数 γ を $\frac{\gamma S_r}{100\alpha}$ で置きかえると次式ようになる。

$$\text{乾燥砂 空気圧を考慮する時 } H(x, y) = h_0 + x \left(1 - \frac{h_0}{h_0 + h_c} \cdot \frac{y + h_0 + h_{co}}{y} \right) \quad (1)$$

$$H_{ay} = H(y, y) + h_{co} \quad (2)$$

$$\text{無視する時 } H(x, y) = h_0 - (h_0 + h_{co}) \frac{x}{y} \quad (3)$$

$$\text{浸潤砂 空気圧を考慮する時 } H(x, y) = h_0 + x \left(1 - \frac{h_0}{h_0 + h_c} \cdot \frac{y + h_0 + h_{co}}{y} \cdot \frac{S_r - f(y)}{S_r} \right) \quad (4)$$

$$H_{ay} = H(y, y) + h_{co} \frac{S_r - f(y)}{S_r} \quad (5)$$

$$\text{無視する時 } H(x, y) = h_0 - (h_0 + h_{co}) \frac{S_r - f(y)}{S_r} \cdot \frac{x}{y} \quad (6)$$

ただし、 $H(x, y)$: 進行浸潤線が地表から y (cm) の深さにある時の深さ x (cm) ($x \leq y$) の間げき水圧 (cm・H₂O)

H_{ay} : 進行浸潤線下の間げき空気圧 (cm・H₂O) h_0 : 貯留水位 (cm) h_{co} : 乾燥砂の毛管力 (cm・H₂O)

h_c : 地表面と進行浸潤線の間の砂の透気係数 (cm/sec) S_r : 浸透後の飽和度 (%) $f(y)$: 浸透前の飽和度 (%)

γ : 間げき率 (小数表示) α : 透水係数 (cm/sec)

(1)(2)(4)(5)式は、雨水が不飽和浸透を行ない、空気が一様に交換されることを仮定し、重力、Hagen-Poiseuilleの流れて説明される抵抗力、空気による抵抗力、毛管力を考慮し、慣性力を無視することによって得られた式である。

また、(3)(6)式は、空気による抵抗力を無視して得られる。

2. 地盤内間げき圧を考慮した無限斜面安定式

無限斜面において、上記の間げき水圧、自重の増加、サクションの消失を考慮すると、安定式は、浸潤砂の場合、次のようになる。雨水浸透前強度安全率は、 $F_{s0} = \frac{C' + \{ \gamma_0 x + S \} \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{\gamma_0 x \cos \beta \cdot \sin \beta}$ である。浸透後は、空気圧を考慮する時、浸潤線上部 ($x \leq y$) で、 $\sigma' = \{ \gamma x + \gamma_0 h_0 - \gamma_w H(x, y) \} \cos^2 \beta$ 、 $T = \{ \gamma x + \gamma_0 h_0 \} \cos \beta \cdot \sin \beta$ 、 $S = C' + \sigma' \tan \phi'$ となることから、強度安全率は、 $F_s(x, y) = \frac{S}{\sigma' x \cos \beta \cdot \sin \beta} = \frac{C' + \{ \gamma x + \gamma_0 h_0 - \gamma_w H(x, y) \} \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{\{ \gamma x + \gamma_0 h_0 - \gamma_w H(x, y) \} \cos \beta \cdot \sin \beta}$ に (4) 式を代入して、次式となる。

$$F_s(x, y) = \frac{C' + \{ \gamma x + \gamma_0 h_0 - \gamma_w H(x, y) \} \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{\{ \gamma x + \gamma_0 h_0 - \gamma_w H(x, y) \} \cos \beta \cdot \sin \beta} \quad (7)$$

また、浸潤線下部 ($x > y$) では、 $\sigma' = \{ \gamma y + \gamma_0 (x - y) + \gamma_w h_0 + S - \gamma_w H_{ay} \} \cos^2 \beta$ 、 $T = \{ \gamma y + \gamma_0 (x - y) + \gamma_w h_0 \} \cos \beta \cdot \sin \beta$ となることより強度安全率は、 $F_s(x, y) = \frac{C' + \{ \gamma y + \gamma_0 (x - y) + \gamma_w h_0 + S - \gamma_w H_{ay} \} \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{\{ \gamma y + \gamma_0 (x - y) + \gamma_w h_0 + S - \gamma_w H_{ay} \} \cos \beta \cdot \sin \beta}$ に、(5) 式を代入して、次式となる。

$$F_s(x, y) = \frac{C' + \{ \gamma y + \gamma_0 (x - y) + \gamma_w h_0 + S - \gamma_w H_{ay} \} \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{\{ \gamma y + \gamma_0 (x - y) + \gamma_w h_0 + S - \gamma_w H_{ay} \} \cos \beta \cdot \sin \beta} \quad (8)$$

ただし、 $F_s(x, y)$: 進行浸潤線が地表から深さ y の時の深さ x での強度率、 C' : 有効粘着力 (g/cm²)、 ϕ' : 有効摩擦角、 γ : 有効応力 (g/cm³)、 T : セン断応力 (g/cm²)、 β : 斜面傾斜角、 γ_0 : 浸透前後の土の単位体積重量、 γ_w : 水の単位体積重量、 S : サクション (g/cm²)、砂においては、毛管力に等しいとした。

空気圧を無視する時も、同様にして、次式のようになる。

$$\text{上部 } (x \leq y) \quad F_s(x, y) = \frac{C' + \{ \gamma x + \gamma_0 h_0 - \gamma_w H(x, y) \} \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{\{ \gamma x + \gamma_0 h_0 - \gamma_w H(x, y) \} \cos \beta \cdot \sin \beta} \quad (9)$$

$$\text{下部 } (x > y) \quad F_s(x, y) = \frac{C' + \{ \gamma y + \gamma_0 (x - y) + \gamma_w h_0 + S - \gamma_w H_{ay} \} \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{\{ \gamma y + \gamma_0 (x - y) + \gamma_w h_0 + S - \gamma_w H_{ay} \} \cos \beta \cdot \sin \beta} \quad (10)$$

乾燥砂の場合は、浸潤砂の式において、 S の項を除き $h_{co} \frac{S_r - f(y)}{S_r}$ を h_{co} で置き換えたものが、その強度安全率の式となる。勿論、これらの式は、斜面においても、雨水は鉛直に浸透し、(1)~(6)式が成り立つという仮定に立つ。

3. 計算例

強度係数 C' , ϕ' , 地下水面深さ h (地下水面深さは, 基礎深さと同じに h に H , 斜面傾斜角 β を変化させて8つの斜面について, 時間と強度安全率の関係をはね返り進行浸潤線が地下水面に達した後の地下水面の上昇過程を含めて計算した。そのための浸潤深さ y と時間 t (sec) との関係, はね返り速度等は以下のような式及び仮定より求めた。

(1). 経過時間と浸潤深さ (浸透速度)

$$\text{空気圧を考慮する時, 乾燥砂} \quad t = \frac{\pi S_r}{100} \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k_a} \right) \left\{ (y - (h_0 + h_{c0})) \log_e \frac{y + h_0 + h_{c0}}{h_0 + h_{c0}} \right\} \quad (11)$$

$$\text{浸潤砂} \quad \frac{dy}{dt} = \frac{100}{\pi (S_r - f(y))} \cdot \frac{y + h_0 + h_{c0} - \frac{S_r - f(y)}{S_r}}{y \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k_a} \right)} \quad (12)$$

空気圧を無視する時は, (11)(12)式において $k_a = \infty$ とする。これらの関係を(7)~(10)式に代入すると時間と安全率の関係を導く。(2)はね返り速度。浸潤線が地下水面に達した時の容積含水率 W_1 , はね返り終了時のそれを W_2 とすると次式となる⁽⁴⁾。 $W = k / (W_1 W_2)$ また, (3). 透気係数は透水係数との比が空気の粘性係数と水の粘性係数との逆比に一致する⁽⁵⁾とから求めた。さらに, 不飽和土の透水係数と透気係数は, それぞれブタゴフスキー⁽⁶⁾とBiczák⁽⁵⁾の結果を用いた。(4) $G_s = 2700$ $e = 0.800$ $D_{10} = 0.1 \text{ mm}$ $k = 1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ $h_0 = 5 \text{ cm}$ (5) 雨水浸透前後の飽和度 S_{r0}, S_r . 乾燥砂 $S_{r0} = 0\%$ $S_r = 70\%$ 浸潤砂 $S_{r0} = f(y) = 20\%$ $S_r = 90\%$

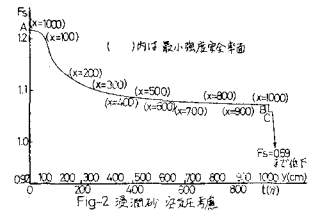
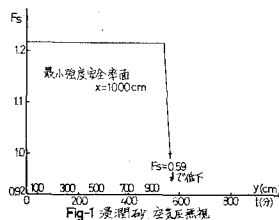
これらの仮定及び計算式を用いて, 斜面の安全率の低下を示したものが右表である。1例として, VIIの斜面の浸潤砂の場合について, 時間と安全率の関係をFig. 1~2に示す。Fig. 2は, 空気圧を考慮した場合であるが, A点は, 浸透前安全率を示し, A~Bは, 浸透中の安全率の低下を示す。浸透中, 強度安全率最小の面は, 浸潤線深さと一致する。B点で浸潤線は, 地下水面に達し, 安全率はC点まで低下し, C点からはね返りが始まる。空気圧がない場合(Fig. 1)は, はね返りが始まるまで, 安全率は, ほとんど低下しない。

No.	計算結果のまとめ	乾燥砂		浸潤砂	
		空気圧を考慮	空気圧を無視	空気圧を考慮	空気圧を無視
I	$C = 0.01$ $\phi = 35^\circ$ $H = 700 \text{ cm}$ $X = 700 \text{ cm}$	① 浸潤線は地下水面に達しない ② 浸潤線は地下水面に達する	$X = 700 \text{ cm}$	$X = 700 \text{ cm}$	$Y_{200} \times 100$ $Y_{200} \times 100$ 土壌
II	$C = 0.05$ $\phi = 35^\circ$ $H = 300 \text{ cm}$ $X = 300 \text{ cm}$	① 92.5% ② 53.1%	$X = 300 \text{ cm}$	① 94.3% ② 53.1%	① 93.8% ② 53.4% ③ 86.6% ④ 53.4%
III	$C = 0.10$ $\phi = 35^\circ$ $H = 300 \text{ cm}$ $X = 300 \text{ cm}$	① 99.1% ② 44.0%	$X = 300 \text{ cm}$	① 98.0% ② 44.0%	① 91.2% ② 44.0% ③ 79.3% ④ 44.0%
IV	$C = 0.15$ $\phi = 35^\circ$ $H = 300 \text{ cm}$ $X = 300 \text{ cm}$	① 94.9% ② 46.1%	$X = 300 \text{ cm}$	① 92.9% ② 46.1%	① 95.0% ② 46.1% ③ 81.9% ④ 46.1%
V	$C = 0.20$ $\phi = 35^\circ$ $H = 300 \text{ cm}$ $X = 300 \text{ cm}$	① 92.2% ② 52.5%	$X = 300 \text{ cm}$	① 92.2% ② 52.5%	① 94.0% ② 52.5% ③ 81.5% ④ 52.8%
VI	$C = 0.25$ $\phi = 35^\circ$ $H = 300 \text{ cm}$ $X = 300 \text{ cm}$	① 91.0% ② 53.8%	$X = 300 \text{ cm}$	① 89.0% ② 53.8%	① 91.3% ② 53.8% ③ 79.3% ④ 53.8%
VII	$C = 0.30$ $\phi = 35^\circ$ $H = 1000 \text{ cm}$ $X = 1000 \text{ cm}$	① 96.0% ② 49.0%	$X = 1000 \text{ cm}$	① 96.0% ② 49.0%	① 98.5% ② 48.5% ③ 86.9% ④ 48.5%

4. おさへ

計算結果から, 以下のことが言える。

(1) 雨水浸透時の斜面安定を考える時は, 自重の増加の他に, 発生する間げき水圧とサクションの消失をも考慮せねばならない。間げき水圧は, σ_v の値が大きく変わり, σ_v が大きくなると, 静水圧に



近くなり斜面は危険な状態になる。さらに, k と k_a の値は, 浸潤後の飽和度 S_r に依存するので, S_r は降雨強度等から, 適宜に決定する必要がある。(2) 地盤内空気圧が発生しない時は, 自重の増加による影響程度で最小安全率面も変化しない。(3) 地盤内空気圧が発生する時は, C' が適当な値を持つ時には, 最小安全面が, 雨水浸透に伴ない変化し, 進行浸潤線と一致することがある。

参考文献: (1) 斎藤上沢: 人工降雨による新幹線盛土斜面の耐雨強度の検討, 鉄道技術研究所資料 Vol. 25 (1968) (2) 田中茂: 雨水浸透に基づく斜面崩壊の実験的研究初報, 建設工学工学研究所報告 No. 6 (1964) (3) 西田, 八木, 二木, 西川: 雨水浸透による地盤間げき水圧について, 昭和48年度中部支部研究発表会講演要集 (4) 小橋, 今井他: 砂質土砂面の雨水浸透及び表層流動すべりについて, 鉄道技術研究所報告 No. 337 (1970) (5) Biczák: Untersuchung der Luftdurchlässigkeit von Kornhaufen, Proc. 3rd Budapest on Soil Mech and Found. (1968) (6) 山崎不二夫: 土壌物理, 養賢堂 (1971)