

雨水浸透による地盤内発生間隙圧と斜面安定

PORE PRESSURE CAUSED BY RAIN WATER PERMEATION AND
STABILITY OF EARTH SLOPE

西田 義 親*・八 木 則 男**・二 木 幹 夫***

By Yoshichika NISHIDA, Norio YAGI and Mikio FUTAKI

1. はじめに

降雨が原因と思われる斜面崩壊は、毎年 2000 件以上にもものぼるといわれ、その中には人命、財産を失う例も少なくはない。雨水浸透に伴って起こる斜面内の変化は複雑で予測困難な場合もあるが、斜面を不安定にする主な要因として、土塊自重の増加、間隙圧の増加、サクシジョンの低下、吸水による土の強度低下などが考えられる。本報告では、雨水浸透に伴って発生する間隙圧（間隙水圧、間隙空気圧）を取り上げ、理論的にそれを導いて簡単な室内実験によって本式の検討を行った。さらにこの式と自重の増加、サクシジョンの消失を考慮し無限斜面の安定解析の例を示す。実際の崩壊斜面の多くは砂質地盤であること、また、比較的土質条件が簡単に表わされること等を考慮して、ここでは対象を砂質地盤に限って考察する。

2. 降雨浸透時の地盤内の間隙圧に関する理論的考察

均一な半無限水平地盤に広範囲にわたって降雨がある場合を対象として考える。この時、降雨強度が地盤の浸透能よりも大きければ湛水を生じ、雨水は地表面と平行な浸潤面を形成しながら鉛直に降下する。その結果、地表面と浸潤面との間の飽和度は非常に高く一定になると考えてもよい^{(1),(2)}。この時、単位断面積の土柱内の浸透水に働く力を考え、降雨水の挙動を知ることによって、その浸透速度とその時発生する間隙水圧および浸潤面下の間隙空気圧を求める。これらを求めるにあたり地盤の状態によって考慮しなければならない条件が多少異

なるので、本文では次の 4 つの場合について考察する。すなわち、a) 浸潤履歴を受けた地盤（以下浸潤地盤と呼ぶ）で浸潤面下の空気圧を考慮する場合、b) 浸潤地盤で浸潤面下の空気圧が無視できる場合、c) 乾燥地盤で空気圧を考慮する場合、d) 乾燥地盤で空気圧が無視できる場合である。ここで対象としている浸潤地盤とは、あらかじめ降雨による浸潤履歴を受けて、飽和度が地表面からの深さにより変化しており、その結果、毛管力も変化している地盤のことである。乾燥地盤は飽和度がゼロであり、毛管力は深さ方向に変化せず一定であるとしている。また、浸潤面の降下に伴って発生する間隙空気圧が無視できる場合とは、降雨が局部的であったり、動植物による空気の抜け道が存在したり、透気性の大きな地層を含んでいる場合などを想定している。

a) 浸潤地盤で空気圧を考慮する場合

単位断面積の土中内の水に働く力は下向きに重力 F_g 、毛管力による力 F_c 、慣性力 F_u 、上向きに土粒子からの粘性抵抗 F_k 、および空気圧による抵抗力 F_a である。これらの力はつり合っており、下向きを正とすれば、

$$F_g + F_c + F_u - F_k - F_a = 0 \dots\dots\dots(1)$$

① 重力 F_g について

湛水深さを h_0 (cm)、浸潤面の到達深さを y (cm)、水の単位体積重量を γ_w とする。浸潤面と地表面との間の飽和度が高く、重力に関しては不飽和の影響がないとする

$$F_g = \gamma_w \cdot (h_0 + y) \dots\dots\dots(2)$$

と表わすことができる。

② 毛管力について

毛管高さを h_c とすると

$$F_c = \gamma_w \cdot h_c \dots\dots\dots(3)$$

h_c は地盤の飽和度 S_{r0} (%) によって変化する。 $S_{r0} = 0$ において、 $h_c = h_{c0}$ とすると、一般に $h_c = (h_{c0} - aS_{r0})^b$ (a, b は定数) で与えられる⁽³⁾。簡単のためにいま、 $b = 1$ 、浸潤後（飽和度 S_r ）に毛管力がなくなる ($h_c = 0$) と

* 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木工学科
*** 正会員 工修 金沢大学助手 工学部土木工学科

すると

$$h_{c0} - aS_r = 0 \quad \therefore a = h_{c0}/S_r$$

したがって、 $h_c = h_{c0}(S_r - S_{r0})/S_r$ が得られる。一般に S_{r0} は浸潤深さ y により変化するので $S_{r0} = S_{r0}(y)$ とすると式 (3) は、

$$F_c = r_w \cdot h_{c0} \{S_r - S_{r0}(y)\} / S_r \dots\dots\dots (4)$$

となる。

③ 粘性による抵抗力 F_k について

土の中を水が流れる時、水と土粒子表面との間に粘性抵抗が働くため、水は土粒子から流れと反対方向の力を受ける。この力は、動水勾配を i とすると

$$F_k = i \cdot r_w \cdot y \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。浸潤後の地盤の透水係数を k (cm/sec)、 n を空隙率 (小数表示)、 n' を浸透水が実際に移動できる空隙率、および浸透水の移動速度を u (cm/sec) とすれば、 $u = k \cdot i / n'$ 、すなわち、 $i = u \cdot n' / k$ となり式 (5) に代入すれば、

$$F_k = r_w \cdot u \cdot n' / k \cdot y$$

いま、 n' が飽和度 S_r の一次関数で表わされるとすると、 $S_r = 100\%$ で $n' = n$ 、 $S_r = 0\%$ で $n' = 0$ であることを考えれば、 $n' = n \cdot S_r / 100$ となる。したがって、

$$F_k = r_w \cdot u \cdot \frac{n \cdot S_r}{100 k} \cdot y = \alpha \cdot r_w \cdot u \cdot y \dots\dots\dots (6)$$

(ただし $\alpha = n \cdot S_r / 100 k$)

④ 空気圧による抵抗力 F_a について

進行浸潤面の降下に伴う水の浸入量は空気の圧縮量と空気の放出量の和である。空気圧はさほど大きくなく空気の圧縮量は空気の放出量に比して十分少ないと思われるので、いまこれを無視する。空気放出量を q_a (cm³/sec/cm²)、浸透水量を q_w (cm³/sec/cm²) とすると、

$$q_a = k_a \cdot \frac{h}{y} \dots\dots\dots (7)$$

$$q_w = (W_1 - W_0) \cdot u_s \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 k_a は浸潤面と地表面との間の透気係数、 h は空気圧を水頭で表わしたもの (cm·H₂O)、 W_0 、 W_1 は浸潤前後の容積含水率で $W_0 = n \cdot S_{r0}(y) / 100$ 、 $W_1 = n \cdot S_r / 100$ 、また、 u_s は進行浸潤面降下速度である。ゆえに $q_0 = q_w$ より、 $h = 1/k_a \cdot (W_1 - W_0) \cdot u_s \cdot y$ となるので、

$$\begin{aligned} F_a &= r_w \cdot h = \frac{r_w}{k_a} \cdot (W_1 - W_0) \cdot u_s \cdot y \\ &= \frac{r_w}{k_a} \cdot n \cdot \frac{S_r - S_{r0}(y)}{100} \cdot u_s \cdot y \dots\dots (9) \end{aligned}$$

となる。

慣性力 F_u は十分小さいとして無視すると式(1)、(2)、(4)、(6)、(9) より、

$$\begin{aligned} y + h_0 + h_{c0} \cdot \frac{S_r - S_{r0}(y)}{S_r} - \alpha \cdot u \cdot y \\ - \frac{n}{100 k_a} \{S_r - S_{r0}(y)\} \cdot y \cdot u_s = 0 \dots\dots (10) \end{aligned}$$

が得られる。

浸透水の速度 (u) と進行浸潤面降下速度 (u_s) の関係は、浸潤面が降下する時、浸潤前より下側に存在する土中水は、新しく供給される浸透水といっしょに降下すると仮定すると、

$$u = \frac{S_r - S_{r0}(y)}{S_r} \cdot u_s \dots\dots\dots (11)$$

となり、式 (10)、(11) より 降雨水浸透速度は次式で与えられる。

$$u_s = \frac{dy}{dt} = \frac{S_r}{S_r - S_{r0}(y)} \cdot \frac{y + h_0 + h_{c0} \cdot \frac{S_r - S_{r0}(y)}{S_r}}{y \cdot \left\{ \alpha + \frac{S_r \cdot n}{100 k_a} \right\}} \dots\dots\dots (12)$$

また、

$$u = \frac{y + h_0 + h_{c0} \cdot \frac{S_r - S_{r0}(y)}{S_r}}{y \cdot \left\{ \alpha + \frac{S_r \cdot n}{100 k_a} \right\}}$$

となる。

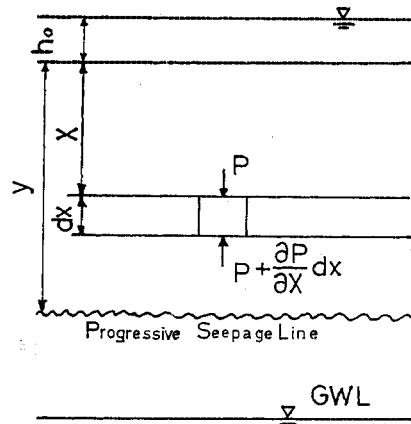


図-1

次に 図-1 に示すように、地表面と浸潤面との間の任意の深さ X における空隙水圧を求める。地表面からの深さ X において単位断面面積、微小高さ dX の浸透水要素に働く力は、

$$\text{重 力: } F_{gX} = r_w \cdot dX \dots\dots\dots (14)$$

$$\text{粘 性 抵 抗: } F_{kX} = r_w \cdot \alpha \cdot u \cdot dX \dots\dots (15)$$

$$dX \text{間の圧力差: } F_{pX} = \frac{\partial P}{\partial X} \cdot dX \dots\dots\dots (16)$$

となり、ただし、慣性力は無視するとそれらの合力は 0 であるから

$$F_{gX} - F_{kX} - F_{pX} = 0 \dots\dots\dots (17)$$

式 (14)~(17) より

$$\frac{\partial P}{\partial X} = r_w \cdot (1 - \alpha \cdot u) \dots\dots\dots (18)$$

u は X に関係なく一定であり、 $X=0$ で $P = r_w \cdot h_0$ であ

るから式 (19) を積分して

$$P = r_w \cdot (h_0 + X - \alpha \cdot u \cdot X) \dots\dots\dots(19)$$

進行浸潤面の深さが y の時、深さ $X (X \leq y)$ での間隙水圧を水頭 $H(X, y)$ で表わすと、式 (13) を式 (19) に代入して両辺を r_w で除すと

$$H(X, y) = h_0 + X \cdot \left\{ 1 - \frac{\alpha \cdot (y + h_0 + h_{c0}) \cdot \frac{S_r - S_{r0}(y)}{S_r}}{\left(\alpha + \frac{S_r \cdot n}{100 k_a}\right) \cdot y} \right\} \dots\dots\dots(20)$$

となる。また、その時の浸潤面下の空気圧 H_{ay} は式 (9) より

$$H_{ay} = \frac{F_a}{r_w} = \frac{n \cdot S_r}{100 k_a} \cdot \frac{y + h_0 + h_{c0} \cdot \frac{S_r - S_{r0}(y)}{S_r}}{\alpha + \frac{S_r \cdot n}{100 k_a}}$$

また、上式を変形すると

$$H_{ay} = h_{c0} \cdot \frac{S_r - S_{r0}(y)}{S_r} + h_0 + y \cdot \left\{ 1 - \frac{\alpha \cdot (y + h_0 + h_{c0}) \cdot \frac{S_r - S_{r0}(y)}{S_r}}{\left(\alpha + \frac{S_r \cdot n}{100 k_a}\right) \cdot y} \right\} = \frac{F_c}{r_w} + H(y, y) \dots\dots\dots(21)$$

となる。当然の結果ではあるが、間隙空気圧が間隙水圧とサクションの和となることが示される。ここで、式 (12), (20) 中の α を再び $n \cdot S_r / 100 k$ で置き換えると、それぞれ

$$\frac{dy}{dt} = \frac{100}{n \cdot (S_r - S_{r0}(y))} \cdot \frac{y + h_0 + h_{c0} \cdot \frac{S_r - S_{r0}(y)}{S_r}}{y \cdot \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k_a}\right)} \dots\dots\dots(22)$$

$$H(X, y) = h_0 + X \cdot \left\{ 1 - \frac{k_a}{k_a + k} \cdot (y + h_0 + h_{c0}) \cdot \frac{S_r - S_{r0}(y)}{S_r} \right\} \cdot \frac{1}{y} \dots\dots\dots(23)$$

となる。

b) 浸潤地盤で空気圧を無視できる場合
式 (22), (23) において $k_a \rightarrow \infty$ とおけば、

$$\frac{dy}{dt} = \frac{100 \cdot k}{n \cdot (S_r - S_{r0}(y))} \cdot \frac{y + h_0 + h_{c0} \cdot \frac{S_r - S_{r0}(y)}{S_r}}{y} \dots\dots\dots(24)$$

$$H(X, y) = h_0 - \left(h_0 + h_{c0} \cdot \frac{S_r - S_{r0}(y)}{S_r}\right) \cdot \frac{X}{y} \dots\dots\dots(25)$$

と求まる。

c) 乾燥地盤で空気圧を考慮する場合

式 (22), (23) において $S_{r0}(y) = 0$ とおくと浸潤前降下速度、および間隙水圧、間隙空気圧は以下のごとく求めることができる。

$$\frac{dy}{dt} = \frac{100}{n \cdot S_r} \cdot \frac{y + h_0 + h_{c0}}{\frac{1}{k} + \frac{1}{k_a}} \cdot \frac{1}{y} \dots\dots\dots(26)$$

$$H(X, y) = h_0 + X \cdot \left\{ 1 - \frac{k_a}{k_a + k} \cdot (y + h_0 + h_{c0}) \cdot \frac{1}{y} \right\} \dots\dots\dots(27)$$

$$H_{ay} = h_{c0} + H(y, y) \dots\dots\dots(28)$$

ただし、式 (26) は t について解くことができるので初期条件 $(t, y) = (0, 0)$ を与えると

$$t = \frac{n \cdot S_r}{100} \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k_a}\right) \cdot \left\{ y - (h_0 + h_{c0}) \cdot \ln \frac{y + h_0 + h_{c0}}{h_0 + h_{c0}} \right\} \dots\dots\dots(29)$$

が得られる。

d) 乾燥地盤で空気圧を無視できる場合

式 (27), (29) において $k_a \rightarrow \infty$ にすれば

$$H(X, y) = h_0 - (h_0 + h_{c0}) \cdot \frac{X}{y} \dots\dots\dots(30)$$

$$t = \frac{n \cdot S_r}{100 k} \cdot \left\{ y - (h_0 + h_{c0}) \ln \frac{y + h_0 + h_{c0}}{h_0 + h_{c0}} \right\} \dots\dots\dots(31)$$

となる。

3. 理論式の検討

簡単な室内実験を行って、2. で求めた理論式の検討を行った。

a) 実験装置および実験方法

図-2 に実験装置の概要を示す。試料充填用パイプは内径 10 cm, 高さ約 100 cm のアクリル性パイプを使用した。圧力測定用パイプの先端に金網 (開き目 74 μ) を貼り付け、10 cm 間隔で 10 本、試料充填用パイプの中央まで差し込み、他端をマンオメーターに接続した。試料充填用パイプの上部に、散水装置と湛水面の高さを一定に保つための排水管、また、下部には地下水水面を一定に保つためにコックのついた排水管が取り付けられている。

実験は、乾燥砂と浸潤履歴を受けた砂について行い、乾燥砂の場合は、試料を詰めた後、散水装置

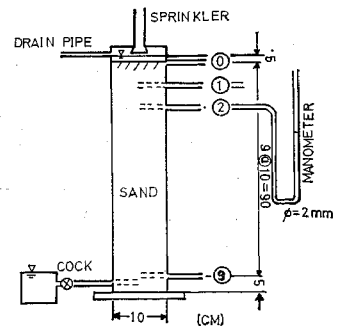


図-2 実験装置

により散水させ、一定の湛水深さを保って浸透を行わせた。10個のマノメーターを同時に目読することはできないので、写真により後で判読した。浸潤履歴を受けた砂の場合は、試料に何度も浸潤を行わせた後、下部の排水用コックを閉じて一度水を試料充填用パイプに満杯にする。十分、時間を経た後、排水させ2時間放置してから排水用のコックを閉じる。後の操作は乾燥砂の場合と同様である。なお実験には豊浦標準砂を使用した。

b) 実験結果および理論値との比較

図-3に乾燥砂の場合の浸透が始まってからの経過時間と浸透深さの関係を示す。図中計算値とは式(29)を

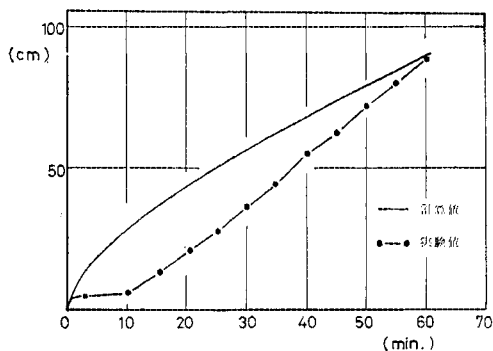


図-3 経過時間と浸透深さ (乾燥砂)

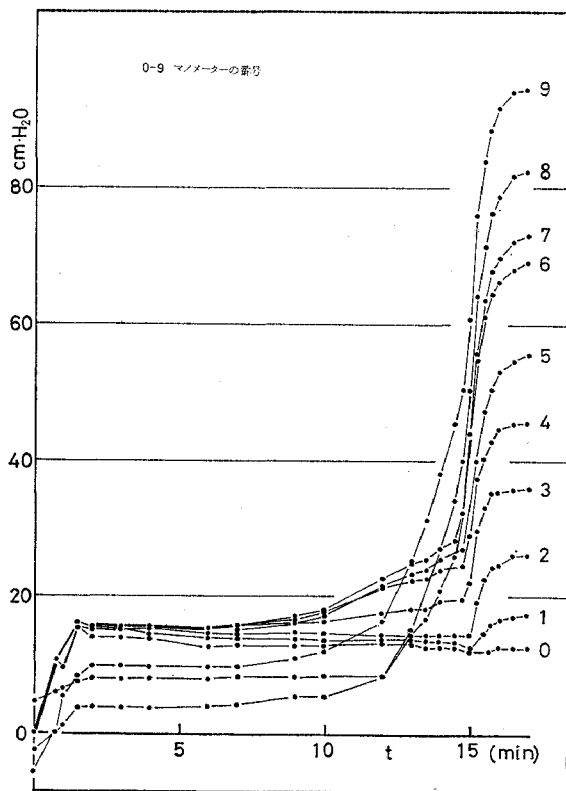


図-4 経過時間と発生間隙圧 (浸潤履歴を受けた場合)

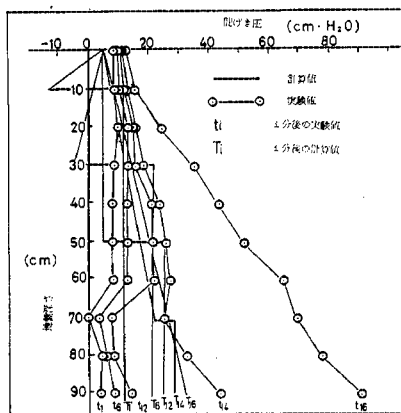


図-5 地盤深さと発生間隙圧 (浸潤履歴を受けた場合)

使って計算したものである。式中の諸数値は他の実験から求めたものであるが、結果だけを示すと、

$$n=0.447(e=0.808) \quad S_r=75.8(\%)$$

$$k=6.4 \times 10^{-3}(\text{cm/sec}) \quad k_a=1.1 \times 10^{-2}(\text{cm/sec})$$

$$h_0=5.0(\text{cm}) \quad h_{c0}=34(\text{cm})$$

両者を比較すると理論値の方が実験値よりも早く浸透するという結果がでている。これは、乾燥砂の場合、空気量が大きく、浸透に伴って空気と水が一樣に置換しえずセル内に閉塞されてしまう部分が生じるためである。したがってこの場合、間隙圧は変動が激しく、理論値との比較はできなかった。図-4は浸潤履歴を受けた場合の経過時間と発生間隙圧の関係を示したものである。浸潤後2~3分で各点での間隙圧はほぼ一定値に達する。浸透開始後13~15分間に急激な間隙圧の上昇がみられるが、これは浸潤面が地下水面に達した後のようすを表わすものと考えられ、浸潤前線が地下水面に達した時点では静水圧を示さず、地下水面の上昇に伴って徐々に静水圧に達するようになる。図-5は同じ時刻における間隙圧の実験値と理論値(浸潤面の上部では間隙水圧、下部では間隙空気圧として計算した)が示されている。しかし、理論式においては、浸潤面が地下水面に達した後の現象は

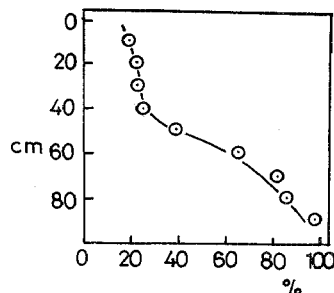


図-6 地盤深さと初期飽和度

解析できないので、両者の比較は14分位までが限度である。理論式(23)を使用して計算するにあたっては地盤の初期飽和度 $S_{r0}(y)$ は図-6に示すごとくである。また、他の諸数値は、

$$h_0=5(\text{cm}) \quad h_{c0}=34(\text{cm}) \quad n=0.445(e=0.802)$$

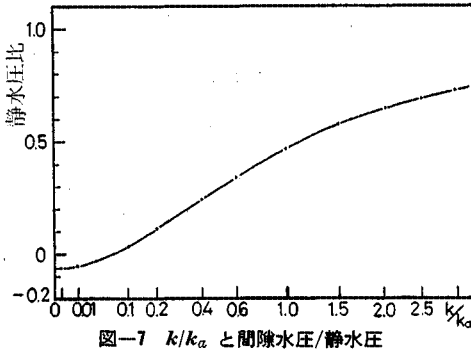


図-7 k/k_a と間隙水圧/静水圧
(=400 cm・H₂O)

$k_a = 2.72 \times 10^{-2}$ (cm/sec) $k = 1.47 \times 10^{-2}$ (cm/sec)

である。

これらの数値はいずれも実測値あるいは実測値より計算して求めたものである。図-5によれば、同一時刻における間隙圧にはかなりの違いが見られる。その主な原因として次のようなことが考えられる。

① 理論値の断点は、毛管力によるものであるが、実験値にはそのような断点が見受けられないこと。おそらく浸潤地盤では毛管力は非常に小さいものと思われる。

② 理論値では地下水面に達するのに16分要しているのに対し実験では13分位で到達していること。すなわち、浸透速度の違いが考えられる。

次に間隙水圧と透水係数、透気係数の関係について述べる。図-7は $h_0 = 5$ (cm), $h_{c0} = 33$ (cm), $S_r = 90$ (%), $S_{r0}(y) = 20$ (%), $X = y = 400$ (cm) として計算した場合の間隙水圧/静水圧 (=400 cm・H₂O) と k/k_a との関係を示したものであり、発生する間隙水圧に対して k/k_a の値が大きな影響を与えることがわかる。斎藤²⁾らの実際斜面への人工降雨による測定では、間隙水圧/静水圧が0.5に近い値が得られている。

4. 地盤内間隙圧を考慮した斜面の安定

本節では、2.において導いた降雨水浸透速度式および間隙圧式を用いて、均一な無限斜面に降雨水が鉛直に浸透する時の強度安全率式を導き、いくつかのモデル斜面について安全率の変化を追跡する。また、斜面の安定計算には、地下水面のはね返り過程(進行浸潤面が地下水面に達して後の地下水面上昇過程)も考慮する必要があると思われるので、4.(1)に述べる方法でこれを計算した。

(1) 無限斜面の強度安全率について

降雨水浸透に伴い発生する間隙水圧、間隙空気圧、自重の増加、サクシヨンの消失を考慮した安定計算式は以下のようになる。浸潤地盤の場合、雨水浸透前強度安全

率を F_{s0} とすれば一般的な土質力学的手法により

$$F_{s0} = \frac{c' + (r_0 X + S) \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{r_0 X \cos \beta \cdot \sin \beta} \dots\dots\dots (32)$$

ただし、

- c' : 有効粘着力 (g/cm²),
- ϕ' : 有効摩擦角
- β : 斜面傾斜角
- r_0 : 浸透前の上の単位体積重量 (g/cm³)
- S : サクシヨンであり $S = r_w \cdot h_c$

浸透後は空気圧を考慮する時、進行浸潤面上部 ($X \leq y$) において、

$$\begin{aligned} \sigma' &= \{r \cdot X + r_w h_0 - r_w \cdot H(X, y)\} \cdot \cos^2 \beta \\ S' &= c' + \sigma' \cdot \tan \phi' \end{aligned}$$

$$\tau = (r \cdot X + r_w h_0) \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta$$

σ' : 有効応力 (kg/cm²)

S' : せん断抵抗力 (kg/cm²)

τ : せん断応力 (kg/cm²)

r : 浸透後の土の単位体積重量 (g/cm³)

となるから進行浸潤面の深さ y の時の深さ $X (X \leq y)$ での強度安全率 $F_s(X, y)$ は

$$F_s(X, y) = \frac{S'}{\tau} = \frac{c' + \{r \cdot X + r_w h_0 - r_w \cdot H(X, y)\} \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{(r \cdot X + r_w h_0) \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta} \dots\dots\dots (33)$$

式(33)に式(23)を代入して

$$F_s(X, y) = \frac{c' + \left\{ (r - r_w) \cdot X + r_w \cdot \frac{k_a}{k_a + k} \cdot \left(y + h_0 + h_{c0} \cdot \frac{S_r - S_{r0}(y)}{S_r} \right) \cdot \frac{X}{y} \right\} \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{\tau_w h_0 \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta} \dots\dots\dots (34)$$

また、進行浸潤面下部 ($X > y$) においては

$$\begin{aligned} \sigma' &= \{r \cdot y + r_0(X - y) + r_w h_0 + S - r_w H_{ay}\} \cdot \cos^2 \beta \\ \tau &= \{r \cdot y + r_0(X - y) + r_w h_0\} \cos \beta \cdot \sin \beta \end{aligned}$$

となることから次式が得られる。

$$F_s(X, y) = \frac{c' + \{r_0 \cdot X + (r - r_0) \cdot y + r_w h_0 + S - r_w H_{ay}\} \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{\{r_0 \cdot X + (r - r_0) \cdot y + r_w h_0\} \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta} \dots\dots\dots (35)$$

式(35)に式(21)を代入して $S = r_w h_c$ と置き換えて代入すると、

$$F_s(X, y) = \frac{c' + \left\{ r_0 \cdot X + (r - r_0 - r_w) \cdot y + r_w \cdot \frac{k_a}{k_a + k} \cdot \left(y + h_0 + h_{c0} \cdot \frac{S_r - S_{r0}(y)}{S_r} \right) \right\} \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{\{r_0 \cdot X + (r - r_0) \cdot y + r_w h_0\} \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta}$$

$$(X > y) \dots \dots \dots (36)$$

となる。

次に空気圧を無視する時、浸潤前線上部および下部において、それぞれ $k_a \rightarrow \infty$ とすればよく、 $X \leq y$ に対しては式 (34) より

$$F_s(X, y) = \frac{c' + \left\{ r \cdot X + r_w \left(h_0 + h_{c0} \cdot \frac{S_r - S_{r0}}{S_r} \right) \cdot \frac{X}{y} \right\} \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{(r \cdot X + r_w \cdot h_0) \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta} \dots \dots \dots (37)$$

$X > y$ に対しては式 (35) において $H_{ay} = 0$ とおけば、

$$F_s(X, y) = \frac{c' + \left\{ r_0 \cdot X + (r - r_0) \cdot y \right.}{\left\{ r_0 \cdot X + (r - r_0) \cdot y \right.} \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi' + \left. \left. + r_w \cdot h_0 + S \right\} \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{\left. + r_w \cdot h_0 \right\} \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta} \dots \dots \dots (38)$$

となる。

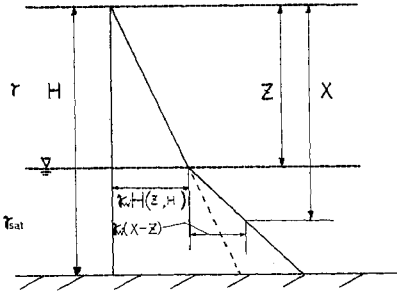


図-8 はね返り後の間隙水圧 (浸潤地盤・空気圧考慮)

乾燥地盤の場合は、浸潤地盤の式において S の項を除き $S_{r0}(y) = 0$ と置けば強度安全率を求めることができる。

次に浸潤面が地下水面に達して地下水面のはね返りが起った後の斜面の安全率について考える。対象を浸潤地盤で空気圧を考慮する場合に限って述べる。図-8 は浸潤面が地下水面に達し、地下水面が上昇する時の間隙水圧の様子を示したものである。地下水面が地表面より Z の深さまで上昇した時の深さ $X (X \leq Z)$ での間隙水圧 $p(Z, X)_{X \leq Z}$ は、浸潤面が地下水面に達したときの深さ X での間隙水圧に等しいとすると式 (23) より、

$$p(Z, X)_{X \leq Z} = r_w \cdot H(X, y)_{y=X} = r_w \cdot H(X, H)$$

となる。

また、 Z より深い所での間隙水圧 $p(Z, X)_{X > Z}$ は、 Z より深い所で完全飽和を仮定すれば、

$$p(Z, X)_{X > Z} = p(Z, Z)_{X \leq Z} + r_w \cdot (X - Z) = r_w \cdot H(Z, H) + r_w \cdot (X - Z) \dots \dots \dots (39)$$

となる。

したがってこの時の斜面の安全率は次式で示される。

a) $X \leq Z$ の時

式 (34) において $y \rightarrow H$ とすれば

$$F_s(Z, X) = \frac{c' + \left[\left\{ r - r_{sat} + r_w \cdot \frac{k_a}{k_a + k} \right. \right.}{(r \cdot X + r_w h_0) \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta} \cdot \left. \left. \cdot \left(H + h_0 + h_{c0} \cdot \frac{S_r - S_{r0}(y)}{S_r} \right) \cdot \frac{X}{H} \right] \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{\dots \dots \dots (40)$$

b) $X > Z$ の時

式 (33), (39) より 図-8 を参照して

$$F_s(Z, X) = \frac{c' + \left[\left\{ r - r_{sat} + r_w \cdot \frac{k_a}{k_a + k} \right. \right.}{\left\{ r \cdot Z + r_{sat} \cdot (X - Z) \right\} \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta} \cdot \left. \left. \cdot \left(H + h_0 + h_{c0} \cdot \frac{S_r - S_{r0}(y)}{S_r} \right) \cdot \frac{1}{H} \right] \cdot Z + (r_{sat} - r_w) \right] \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{\dots \dots \dots (41)$$

となる。

空気圧を無視する場合は式 (40), (41) において $k_a \rightarrow \infty$ とすればよい。なお、はね返り速度は、浸潤面が地下水面に達した時の容積含水率を $W_1 \left(= \frac{n \cdot S_r}{100} \right)$ はね返り終了時のそれを W_2 とすると $V = k / (W_2 - W_1)$ で求めることができる¹⁾。

(2) 計算結果

表-1 に表す I ~ IV のモデル斜面について前記のべたように、自重増加、サクシヨンの消失、間隙水圧、間隙空気圧の発生を考慮して、2. で求めた各式を用いて浸潤深さと強度安全率の関係を計算した。計算に必要な諸定数は以下の数値を用いた。なお、斜面上に湛水が生ずると掃流力が発生し、 $c' = 0$ の時表面浸食が起るので、計算例では湛水深さは $h_0 = 0$ とした。

a) 斜面条件

- 高さ H : 1000 cm
- 傾斜角 β : 25°

b) 雨水浸透前後の飽和度 S_{r0}, S_r

- 乾燥地盤 $S_{r0} = 0\%$
- $S_r = 70\%$
- 浸潤地盤 $S_{r0} = 20\%$
- $S_r = 90\%$

c) 透気係数 k_a と透水係数 k との比

透気係数と透水係数との比については、ブダゴフスキ⁸⁾、E. Biczok¹⁰⁾ の研究を参考にして、計算例では、乾燥地盤について、浸透後の飽和度が 70% より、飽和時の透水係数を $k_{100} = 0.01$ cm/sec とすると $k_{70} = k_{100} \times$

表-1 計算結果

No.	斜面条件	浸潤地盤 (W)				乾燥地盤 (D)			
		空気圧考慮		空気圧無視		空気圧考慮		空気圧無視	
		R(%)	X(cm)	R(%)	X(cm)	R(%)	X(cm)	R(%)	X(cm)
I	$c' = 0.01 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ $\phi' = 35^\circ$ $D: \frac{k}{k_a} = 0.0571$ $W: \frac{k}{k_a} = 0.364$	$R_1 = 85.5$	$y \leq 105$ $X = 1000$	$R_1 = 99.6$	$X = 1000$	$R_1 = 96.0$	$y \leq 950$ $X = 1000$	$R_1 = 99.8$	$X = 1000$
		$R_2 = 51.2$	$105 \leq y \leq 1000$ $X = y$	$R_2 = 51.2$		$R_2 = 51.0$	$950 \leq y \leq 1000$ $X = y$	$R_2 = 51.0$	
II	$c' = 0.0 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ $\phi' = 30^\circ$ $D: \frac{k}{k_a} = 0.0571$ $W: \frac{k}{k_a} = 0.364$	$R_1 = 86.8$	$X = 1000$	$R_1 = 99.8$	$X = 1000$	$R_1 = 96.9$	$y \leq 560$ $X = 1000$	$R_1 = 97.9$	$X = 1000$
		$R_2 = 50.9$		$R_2 = 50.9$		$R_2 = 50.7$	$560 \leq y \leq 1000$ $X = y$	$R_2 = 50.7$	
III	$c' = 0.05 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ $\phi' = 30^\circ$ $D: \frac{k}{k_a} = 0.0571$ $W: \frac{k}{k_a} = 0.364$	$R_1 = 86.0$	$y \leq 485$ $X = 1000$	$R_1 = 98.8$	$X = 1000$	$R_1 = 95.7$	$X = 1000$	$R_1 = 96.7$	$X = 100$
		$R_2 = 52.5$	$485 \leq y \leq 1000$ $X = y$	$R_2 = 52.5$		$R_2 = 52.1$		$R_2 = 52.1$	
IV	$c' = 0.05 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ $\phi' = 30^\circ$ $D: \text{---}$ $W: \frac{k}{k_a} = 1.128$	$R_1 = 69.0$	$y \leq 200$ $X = 1000$	$R_1 = 98.8$	$X = 1000$				
		$R_2 = 52.5$	$200 \leq y \leq 1000$ $X = y$	$R_2 = 52.5$					

R_1 : 浸潤面が地下水面に達した時の安全率の低下率 X : 最小強度安全率を与える深さ y : 浸潤面深さ
 R_2 : 浸潤面が地表面と一致した時の安全率の低下率 $X=y$ は最小安全率が浸潤面と一致することを意味する

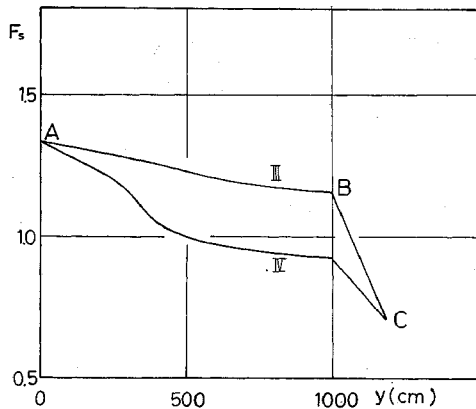


図-9 安全率と浸潤深さ (浸潤地盤で空気圧考慮)

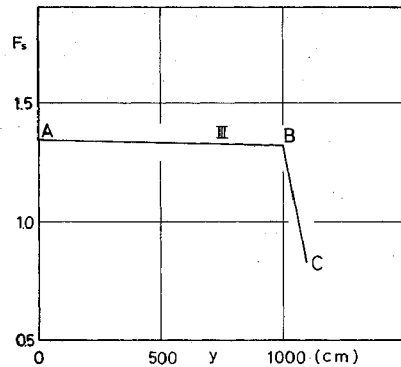


図-10 安全率と浸潤深さ (浸潤地盤で空気圧無視)

$(70/100)^2 = 0.00343 \text{ cm/sec}$, $k_a = 0.06 \text{ cm/sec}$ とすれば $k_{10}/k_a = 0.0571$ となる。浸潤地盤については同様に $k_{90} = 0.00729 \text{ cm/sec}$, $k_a = 0.02 \text{ cm/sec}$ とすれば $k_{90}/k_a = 0.364$ となる。

表-1 を 図-9, 10 を用いて説明する。

図-9, 10 は, III, IV の斜面に関し浸潤地盤において空気圧を考慮した場合と無視した場合についての斜面の安全率と, 浸潤面深さ y の関係を描いたものである。

空気圧を考慮した場合 (図-9), 斜面の安全率は, 浸潤深さにほぼ比例して低下する。そして III の斜面の場

合, 地下水面の上昇が始まる点に至って初期の安全率の 86.0% まで低下し, 以後大きく低下して C 点で地下水面が地表面と一致して最小値をとるようになる。この時の安全率の低下率は 52.5% である。IV の曲線は, III の斜面の k/k_a を 0.364 から 1.128, すなわち 図-7 の静水圧比 0.5 に対応する k/k_a の値を用いたとした時の同様の関係を示したものであるが, III の斜面と比較して安全率が 17% も多く低下する。したがって空気逃げ道が断たれるなどの原因で k/k_a の値が大きくなれば, 斜面の安全率はかなり低下することが理解される。これにひきかえ空気圧を無視する場合は, B 点に至っても安全

率は 98.8% までにしか低下せず、ほとんど変化しないことがわかる。最小強度安全率を与える X の位置は、Ⅲの斜面の場合、 $y=485$ cm までは基盤深さ $X=1000$ cm に等しく、それを越えると浸潤面深さ y に等しくなり $X=y$ となる。したがってⅢの曲線は $y=485$ cm で変曲点を有する曲線となる。同様にⅣの斜面は $y=200$ cm で最小強度安全率を与える X の位置が変化する。しかし、空気圧を無視する場合はすべて基盤深さ $X=1000$ cm に一致する。乾燥地盤の場合、浸潤面が地下水面に達する時点においても安全率はさほど低下しない（Ⅲの斜面で 95% である）。

以上まとめれば、

① 強度定数と安全率の低下率の間に目立った相関はないが、地盤内に空気圧が発生する時、 c' が適当な値を持つ時は、最小安全率面が、雨水浸透に伴い変化し、進行浸潤線と一致することがある。② 空気圧の発生する場合は発生しない場合に比べて安全率の低下は大きい。また、空気圧が発生する場合で、浸潤地盤の安全率の低下が大きいのは、乾燥地盤と比較して飽和度が高く k_a が小さくなり、 k/k_a が大きくなって大きな間隙水圧、間隙空気圧が発生するためである。

(3) 有限斜面の強度安全率について

前節において無限斜面の安定式を導いたが、有限斜面では簡単な形で安定式を提示することはできない。

ここでは簡便分割法によって、降雨浸透中の斜面の安定計算を行った。

図-11 に示すような簡単なモデル斜面を想定し、降雨が点線のごとくに進行すると仮定している。斜面傾斜角 $\beta=30^\circ$ 、斜面高さ $H=10$ m、また、土質条件および浸透前後の飽和度は無限斜面について用いたものと同様である。強度定数 c' 、 ϕ' はそれぞれ $c'=0.01$ (kg/cm²)、 $\phi'=30^\circ$ を仮定した。2. で求めた各式より、各時間における間隙圧を求め、R-1~R-5 の5つの斜面先すべり面について安全率の変化を計算し経過時間を追って表わした。一般に利用されている簡便法において、自重の項が浸透を受けている部分とそうでない部分の和となること、さらに間隙水圧、間隙空気圧、およびサクション。

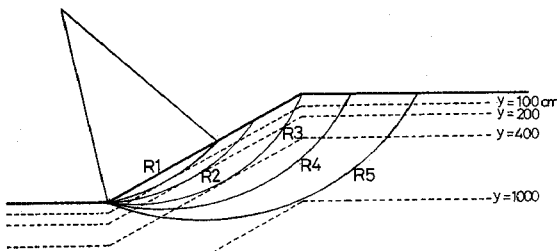


図-11 モデル斜面

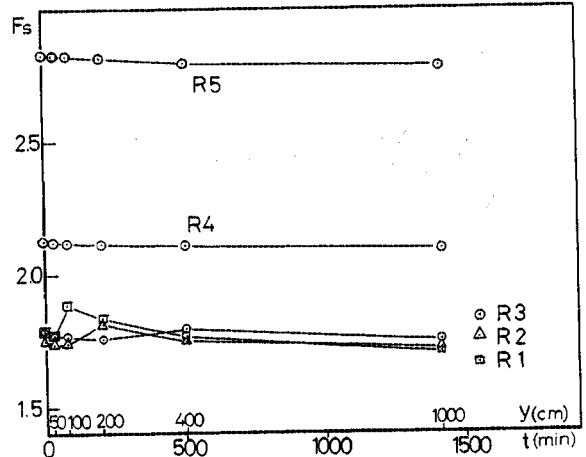


図-12 安全率と経過時間（乾燥地盤で空気圧考慮）

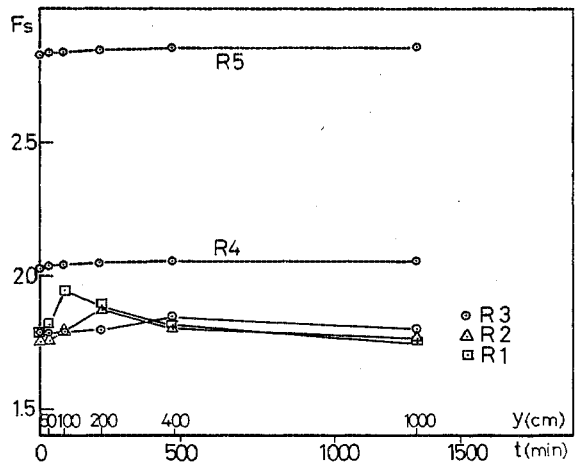


図-13 安全率と経過時間（乾燥地盤で空気圧無視）

項が付け加わることになる。

(4) 計算結果

地盤が乾燥状態にあるか浸潤状態にあるか、あるいは空気圧を考慮するか、考慮しないかによって4つの場合が考えられるが、それぞれの場合について、経過時間と安全率の関係を図-12~15 に示す。乾燥地盤で空気圧を考慮する場合（図-12）は先にも述べたように浸透後の飽和度が小さく透気係数が大きい ($k_a=0.06$ (cm/sec)) ため、発生する間隙圧が小さく安全率の低下は小さい。浸透初期には間隙水圧が負となるため浅いすべり面 (R-1~R-3) では安全率が上昇する。また、空気圧を無視する場合（図-13）はほとんど安全率の減少はない。また、 c' の値がかなり小さいためもっとも浅いすべり面 (R-1) を除いて自重増加の影響は無視できるようである。

図-14, 15 は浸潤履歴を受けた斜面についての結果で

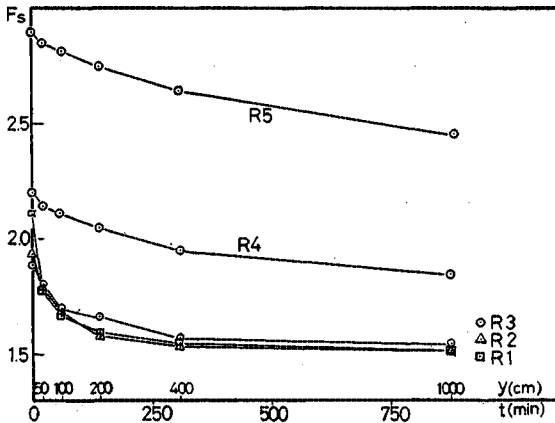


図-14 安全率と経過時間（浸潤地盤で空気圧考慮）

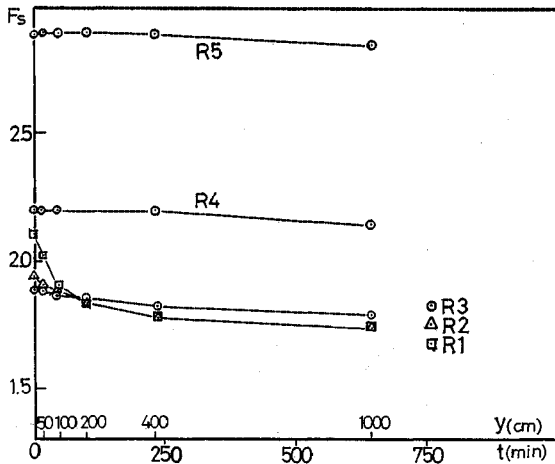


図-15 安全率と経過時間（浸潤地盤で空気圧無視）

ある。浸潤地盤ではサクシヨンの消失を考慮しているので空気圧を無視する場合（図-15）は発生間隙水圧は負であるが、安全率は最初の安全率の90%程度まで減少する。

さらに空気圧を考慮する場合（図-14）は乾燥地盤と比較して浸透後の飽和度が大きい透気係数が小さい（ $k_a=0.02(\text{cm}/\text{sec})$ ）ので、大きな間隙圧が発生して安全率は最初の80% ならずまで低下する。また、図-15と同様に最小安全率面は刻々変化する。

以上の結果は斜面条件（ β, H ）を変えて行ってもほぼ同様な結果となる。

透水係数と透気係数との比 k/k_a を浸潤地盤において $0.36(k=0.00729, k_a=0.02)$ で図-7の静水圧比0.22に相当) から、 $k/k_a=1.128$ ($k=0.00729 \text{ cm}/\text{sec}, k_a=0.00646 \text{ cm}/\text{sec}$, 静水圧比0.5に相当) に変えたと図-14において浸透時間は1.44倍になるが、 $y=400 \text{ cm}$ での安全率は最初の安全率の65%まで減少する。すなわち、なんらかの原因で同一飽和度において k_a が小

くなれば安全率はかなり低下する。したがって、 k/k_a は安全率の変化のパラメーターにもなり得る。有限斜面の安定計算では浸透水が地下水面に達してから後ののはね返りは考えていないが、この場合無限斜面の場合と同じように考えるわけにはいかない。すなわち、浸透水が地下水面に達して地下水面上昇するが、無限に斜面表面まで上昇するものではなく限度がある。この点に関しては斎藤¹¹⁾の研究がある。

5. ま と め

降雨水浸透にともなって地盤内に発生する間隙水圧ならびに間隙空気圧を求め、これを降雨浸透時の安定解析に適用した。そして、あらかじめ浸潤を受けた地盤が再び降雨に見舞われた時、斜面の安全率が著しく低下することを示した。これは、斜面に雨が二度、三度と降った時、斜面が危険にさらされることを確認するものである。さらに、ここでは対象外として考慮しなかったが、降雨水の浸透にともなって変化する強度定数についても考えてみなければならない。この点に関して行った吸水による強度定数の変化を調べた実験¹²⁾では、土質が砂からシルト質になるにしたがって c' の減少が大きく、 ϕ' はほとんど変化しないという結果が得られた。しかし、砂質土に限って論ずれば斜面の安定問題に関して、降雨水の浸透による強度定数の減少は考えなくてもよさそうである。

以上まとめるにあたり、稲寺隆氏（和歌山県庁）、西川広海氏（佐藤工業）、関口伸吾氏（東洋建設）の多大の協力があったことを記し感謝する。この研究は文部省（昭50）科学研究費自然災害（2）No. 002511（代表西田）より一部補助を受けた。

記号説明

- D_{10} : 有効径
- e : 間隙比
- F_a : 空気圧による抵抗力
- F_c : 毛管力による力
- F_g : 重力
- F_k : 土粒子からの粘性抵抗力
- F_u : 慣性力
- $F_s(X, y)$: 進行浸潤面の深さが y の時の深さが X ($X \leq y$) での強度安全率
- G_s : 土粒子比重
- H : 斜面の高さ
- $H(X, y)$: 進行浸潤面の深さが y の時の深さが X ($X \leq y$) での間隙水圧を水頭で表わしたも

の

h : 空気圧を水頭で表わしたもの
 h_c : 毛管高さ (cm)
 h_{c0} : $S_{r0}=0$ の時の毛管上昇高さ
 h_0 : 湛水深さ (cm)
 H_{ay} : 浸潤面下の空気圧
 i : 動水勾配
 k : 浸潤後の地盤の透水係数 (cm/sec)
 k_a : 浸潤面と地表面との間の透気係数 (cm/sec)
 n : 間隙率
 n' : 浸透水が実際に移動できる間隙率
 p : 水圧
 $p(Z, X)$: はね返り後の地下水面の深さ Z の時の深さ X における間隙水圧
 q_a : 空気放出量 (cm³/sec/cm²)
 q_w : 浸透水量 (cm³/sec/cm²)
 S : $S = r_w \cdot h_c$
 S' : せん断抵抗力
 S_r : 浸潤後の飽和度
 S_{r0} : 初期飽和度
 u : 浸透水の移動速度
 u_s : 進行浸潤面降下速度
 V : 地下水面のはね返り速度
 W_0 : 浸潤前の容積含水率
 W_1 : 進行浸潤面が地下水面に達した時の容積含水率
 W_2 : はね返り終了時の容積含水率
 X : 地表面からの深さ (cm)
 y : 浸潤面の到達深さ (cm)
 α : $n \cdot S_r / 100 k$
 β : 斜面傾斜角

r : 浸潤後の土の単位体積重量
 r_0 : 浸潤前の土の単位体積重量
 r_{sat} : 土の飽和単位体積重量
 r_w : 水の単位体積重量
 c' : 有効粘着力
 ϕ' : 有効摩擦角
 σ' : 有効垂直応力
 τ : せん断応力

参 考 文 献

- 1) 小橋澄治・今井篤雄ほか：砂質土斜面の雨水浸透および表面流動すべりについて，鉄道技術研究所報告 No. 737, pp. 1~23, (1970.12).
- 2) 斉藤迪孝・上沢 弘，ほか：人工降雨による新幹線盛土斜面の耐雨強度の検討，鉄道技術研究所報告 No. 588, pp. 1~36, (1967).
- 3) 田中 茂：雨水の浸透に基づく斜面崩壊の実験的研究 第1報，建設工学研究所報告，第6号，pp. 131, 1964
- 4) 丸井信雄：浸透速度について，第10回水理講演会講演集 p. 7, (1966).
- 5) 田中 茂，ほか：土壌間げき空気の圧縮を伴う水の浸透速度に関する研究，第10回水理講演会講演集 (1966).
- 6) 田中 茂：自然斜面における浸透流の取り扱い，土と基礎，Vol. 21, No. 8, pp. 27, (1973).
- 7) 佐藤邦明：間げき空気の圧縮を伴う鉛直浸透に関する一考察，土木学会論文報告集 216 pp. 21~28, (1973.8).
- 8) 山崎不二夫：土壌物理，養賢堂 (1971) pp. 119.
- 9) 西田義親，ほか：雨水浸透による地盤内発生間げき水圧について，土木学会中部支部研究発表講演概要 pp. 117. (1974).
- 10) Biczok, E. : Untersuchung der Luftdurchlässigkeit von kornhanfer, Proc. 3rd Budapest Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., pp. 11 1968.
- 11) 斉藤迪孝：盛土斜面の崩壊について，土と基礎特集号 No. 6 斜面の安定 pp. 25~32, (1957).
- 12) 関口伸吾，ほか：土の吸水による強度低下が斜面安定に及ぼす影響，金沢大学工学部卒業研究 (昭. 51).

(1976.9.20・受付)