

# 降雨時の浸透挙動と斜面の不安定化について（その2）

## Seepage Behaviors and Instability of Slopes during Rainfall (No.2)

成田国朝<sup>†</sup>

Kunitomo NARITA

**Abstract :** As a complementary report for the previous paper, which concerns evaluation of seepage behaviors during rainfall and their influences on instability by wetting of slopes of soil layers with uniform thickness, seepage flow analyses are additionally conducted in this paper to investigate and discuss for other various influential factors and conditions. The factors to be considered in this paper are the configuration of slopes (height and inclination of layer), the wet condition of slopes before rainfall (initial degree of saturation) and the relationship between the strength of rainfall and the permeability of soil ( $r/k_s$ -ratio). The evaluation method of seepage failure at the toe of slope is revised to investigate the extension of failure in details.

### 1. はじめに

近年、異常気象に伴う局地的・集中的な豪雨により、自然斜面や盛土斜面が崩壊し、人的・物的に多大な被害を及ぼす事例が多々見られる。筆者は前報<sup>1)</sup>において、一様層厚の表層斜面を対象に降雨時の浸透挙動をFEM飽和・不飽和浸透解析で明らかにし、表層地盤の飽和化に伴う斜面の不安定化、すなわち地下水位の上昇による間隙水圧の増加、これに伴う傾斜岩盤面に沿う表層のすべり破壊や、間隙水圧の場所的変化に伴う斜面先の浸透破壊（パイピング）の可能性などを論じた。この際、斜面の勾配や表層厚などの表層形状や、降雨強度を幾つか変えて計算し、表層崩壊に及ぼす各種要因の影響について二三言及した。

本研究は、前報の延長線上として、一様層厚の表層斜面を対象に更なる状況や要因を想定した解析を行い、主題に関し議論を補充するものである。降雨に伴う浸透挙動や不安定化に関しては、具体的に、①表層の形状（斜面高・勾配）、②降雨前の表層の湿潤状態（初期飽和度）、③降雨強度と透水係数の関係（ $r/k_s$ 比）などの影響について言及する。また、法先の浸透破壊に関して評価手法を一部改良し、破壊領域の範囲や拡大傾向について二三検討した結果を報告する。

### 2. 解析概要

#### 2.1 解析モデル

解析に使用した有限要素モデルは、基本的に前報と同様であり、傾斜岩盤上に張り付いた一様厚の盛土や風化土層を図-1のように要素分割する。斜面の形状は、高さ $H$ 、勾配 $1:n$ 、土層幅 $B$ （あるいは層厚 $D$ ）で表される。そして、飽和透水係数 $k_s$ の土層に対し、降雨強度 $r$ の雨が連続的に降った場合の土層内の浸透挙動と、飽和化に伴う不安定化の状況を調べる。

使用した浸透解析手法は、FEM飽和-不飽和浸透流解析<sup>2)</sup>であり、不飽和領域まで含めて、飽和度の変化に伴う透水性や圧力保持特性の変化を考慮して解析を進める。

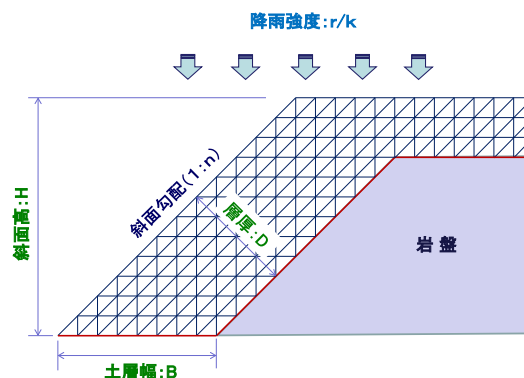


図-1 FEM 解析モデル

<sup>†</sup> 愛知工業大学 工学部 都市環境学科（豊田市）

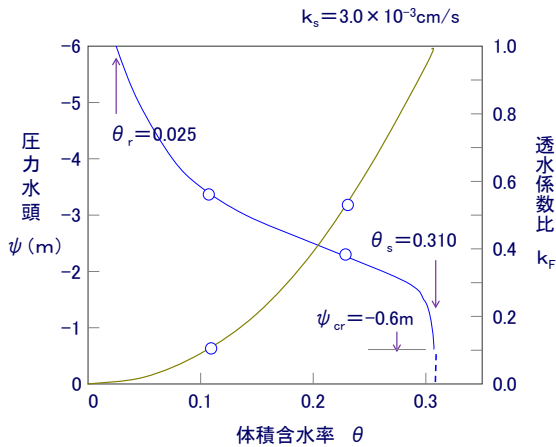


図-2 計算に使用した水分保持曲線

解析に用いた物性値も前報と同様であり、既報の水位急低下解析<sup>3)</sup>に使用した遠心模型実験の堤体材料（細粒分混じり砂:SF）の物性値を参考に決定した。すなわち、水分保持曲線は、図-2の曲線形状を採用した。

最小含水量： $\theta_r = 0.025$

飽和体積含水率： $\theta_s = 0.310$

限界毛管水頭： $\psi_{cr} = -0.6\text{m}$ （毛管上昇実験の計測値）

飽和透水係数： $k_s = 3.0 \times 10^{-3}\text{cm/s}$

浸透特性以外の物性値も上記の堤体材料を参考にし、表土層として、間隙比： $e = 0.74$ 、飽和度： $S_r = 50\%$ 、含水比： $w = 13.9\%$ 、湿潤及び飽和単位体積重量： $\gamma_t = \gamma_{sat} = 17.0\text{kN/m}^3$ を採用した。なお、三軸試験により強度定数（ $c = 20\text{kPa}$ 、 $\phi = 30^\circ$ ）を得ているが、後述の安定計算では、 $c$ 、 $\phi$ 値を幾つか変えて計算し、その影響を調べることにした。

## 2.2 計算内容

本報告でも、図-1のモデルにおいて、高さ $H = 10\text{m}$ 、勾配 $1:1.5$ 、土層幅 $B = 4.5\text{m}$ （層厚 $D = 2.50\text{m}$ ）の斜面に、降雨強度 $r = 20\text{mm/hr}$ の雨が継続して降る場合を標準的な計算例とするが、これ以外に次のように条件設定を変えて計算し、各項目が浸透挙動や不安定化に及ぼす影響

表-1 計算条件

条件項目	数値変化
斜面勾配 (1:n)	1:1.0, 1:1.5, 1:2.0
斜面高H (m)	6.0, 10.0, 14.0
初期飽和度 $S_r$ (%)	50.0, 70.0, 90.0
降雨強度 $r$ (mm/hr)	10, 20, 30 ( $k_s = 3.0 \times 10^{-3}\text{cm/sec}$ 一定)
飽和透水係数 $k_s$ ( $\times 10^{-3}\text{cm/sec}$ )	0.6, 3.0, 15.0 ( $r = 20\text{mm/hr}$ 一定)

度合いを調べた。条件数値を表-1に整理した。

(1) 表層形状（斜面高と勾配）

(2) 降雨前の表層の湿潤状態（初期飽和度）

(3) 降雨強度と透水係数の関係（ $r/k_s$ 比）

なお、(3)  $r/k_s$ 比の変化は表-1の3,4段の $r$ 、 $k_s$ 欄に相当し、3段目の $k_s = 3.0 \times 10^{-3}\text{cm/sec}$ 一定で $r$ を変える場合は $r/k_s = 0.0926, 0.185, 0.278$ の変化に対応し、4段目の $r = 20\text{mm/hr}$ 一定で $k_s$ を変える場合は $r/k_s = 0.926, 0.185, 0.037$ の変化に対応する。

## 3. 計算結果と考察

### 3.1 表土層形状（勾配と斜面高）の影響

図-3は、高さ $H = 10\text{m}$ 、勾配 $1:2.0$ 、土層幅 $B = 6.0\text{m}$ の斜面に $r = 20\text{mm/hr}$ の連続的な降雨が発生した時の浸潤面（つまり飽和域）の形成状況を、降雨開始からの時刻歴 $t$ で表したものである。前報では勾配 $1:1.0$ と $1:1.5$ の場合を示したが、状況は勾配によらず共通しており、時間の経過とともに飽和域が順次拡大し、法先付近で雨水が貯留して水面が上昇するが、やがて排水と貯留が平衡して水位の上昇速度が鈍る傾向が見られる。

図-4は浸潤面と斜面表面との交点、すなわち浸出点の水位 $h_s$ の上昇を経過時間 $t$ との関係で見たものであり、3つの勾配の計算結果を範囲で示している。図から、浸

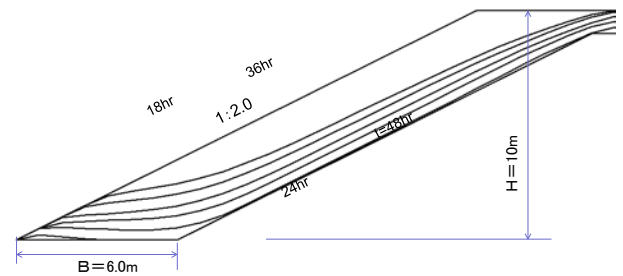


図-3 飽和域の形成 ( $n = 2.0$ ,  $r = 20\text{mm/hr}$ )

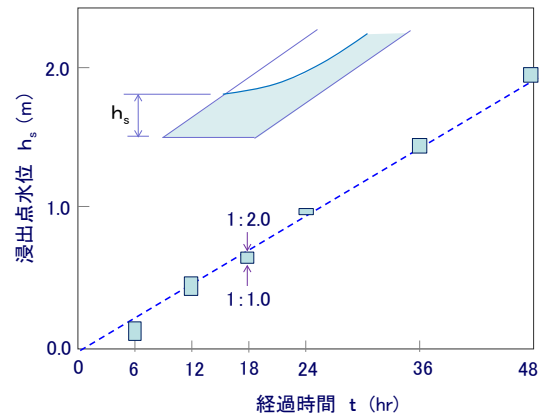


図-4 浸出点水位の変遷 ( $r = 20\text{mm/hr}$ )

出点の水位は勾配の影響をほとんど受けないこと、また先の指摘とは異なり、浸出点では水位が時間に伴いほぼ比例して上昇することが分かる。

図-5は、勾配1:1.5で斜面高Hを変えて飽和域の形成状況を比較したものである。前報H=10mの場合を含めて考察すると、時間に伴う飽和域の形成は、法先部を含む一定の領域内では斜面高の影響をほとんど受けない。また、例えばt=24hr後の浸出点水位(h<sub>s</sub>)を比較しても、ほぼ一致する結果が得られている。

以上のように、降雨強度が同じであれば、飽和域の形成状況、したがって斜面内の間隙水圧の発生過程は、斜面の勾配や高さによってほとんど影響を受けない。そこで、岩盤面に沿うすべり破壊に対しても、これらの影響が小さく現れるのか確認してみた。適用する手法は前報で示した無限斜面に対する極限平衡解析であり、図-6のように表土層を鉛直の帯片に分割し、岩盤面に沿う間隙水圧分布を帯片ごとに読み取って、すべり安全率を図中式で計

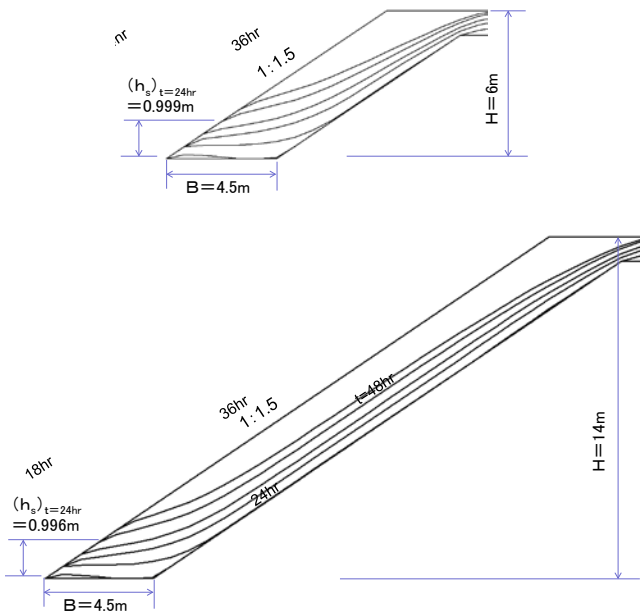


図-5 飽和域の形成（斜面高Hの影響）

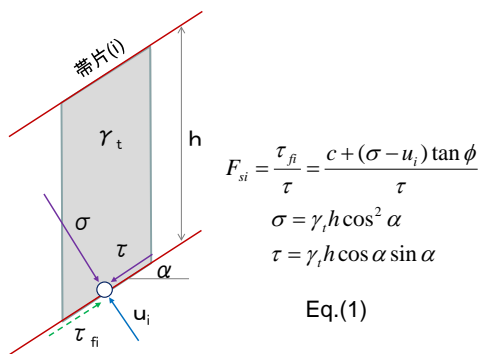


図-6 無限斜面の計算

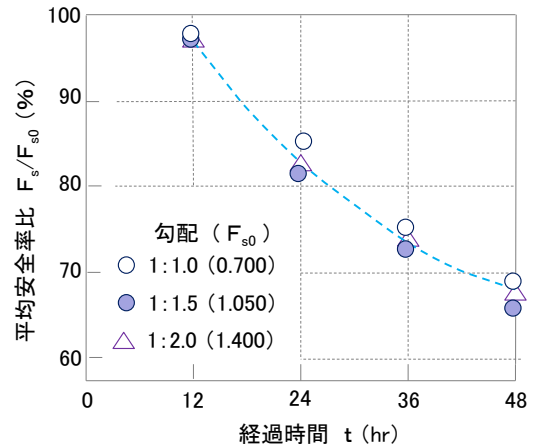


図-7 不安定化の進行（勾配の影響）

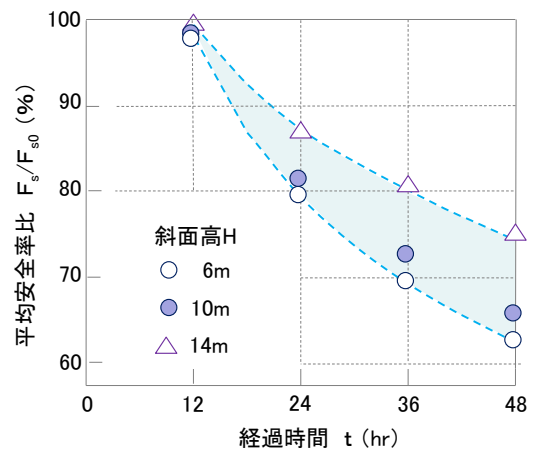


図-8 不安定化の進行（斜面高の影響）

算する。また、各帯片で計算される局所安全率F<sub>si</sub>を斜面に沿って平均化すると、土層全体のすべり安全率が評価できる。

図-7は斜面勾配が変化する場合（r=20mm/hr）について、降雨開始からの経過時間tごとに平均安全率を計算し、安全性の変動傾向を調べたものである。議論を簡明にするために、前報と同様c=0、φ=35°とし、粘着力項を無視して摩擦効果のみを考えている。また、縦軸の値は各時刻の安全率F<sub>s</sub>を無降雨時の安全率F<sub>s0</sub>（図中に勾配ごとに示す）で除して正規化し、安全率比として表している。図に見られるように、降雨時間tの経過に伴い斜面の不安定化が進行（安全率比が低下）するが、その変動傾向は斜面勾配にほぼ無関係と言える。

図-8は同様の比較として、同一勾配1:1.5の斜面について斜面高が変化する場合を調べている。この場合は、安全率比の低下傾向が斜面高Hの影響を受け、H大なるほど不安定化が緩む傾向が見られる。これは、図-5の飽和域の形成状況を見て分かるように、法先付近では、帯片高hに対して浸潤面が相対的に高く、無限斜面の計算

では局所安全率  $F_{si}$  が小さくなるためである。すなわち、前述のように、法先近傍の飽和域の形成が斜面高  $H$  の影響を受けないということは、 $H$  小なるほど、土層としての安全率の平均化に際し  $F_{si}$  値の低い帯片を取り込む割合が多いためである。

### 3.2 土層の初期飽和度の影響

前報及びこれまでの議論では、降雨前の表土層の湿潤状態、すなわち初期飽和度を  $S_r = 50\%$  一定に設定していたので、ここで飽和度を変えて計算し、その影響を確かめたい。図-9 は勾配 1:1.5、高さ  $H = 10\text{m}$ 、土層幅  $B = 4.5\text{m}$  の場合について、 $S_r = 70\%$ 、 $90\%$  の計算を追加し、飽和域の形成状況を比較したものである。特に法先近傍での飽和域の形成過程を見ると、降雨前が湿潤状態 ( $S_r$  大) であるほど、降雨開始の初期段階 ( $t$  小) で浸潤面の高まりが速くなることが知れる。

図-10 は同様に、浸潤面の拡大状況を同一時刻 ( $t = 12\text{hr}$ ,  $24\text{hr}$  後) で比較したものである。当然のことながら、初期飽和度  $S_r$  が大きければ同時刻の浸潤面は高いが、時間の経過に伴って  $S_r$  の影響が薄れ、浸潤状態が一定値に漸近する傾向が知れる。

図-11 は、以上の特性を数値的に比較して見たものであり、浸潤面が斜面表面に現れる浸出点の水位 ( $h_s$ ) の時刻歴と、土層内の間隙水圧の指標となる岩盤との接触隅角部における圧力水頭 ( $h_{pt}$ ) の時刻歴を、初期飽和度  $S_r$  との関係で示している。図によると、浸出点の水位  $h_s$  は経過時間  $t$  に伴って直線的に増加すること、また同時刻で見ると飽和度にほぼ比例して水位が上昇すること

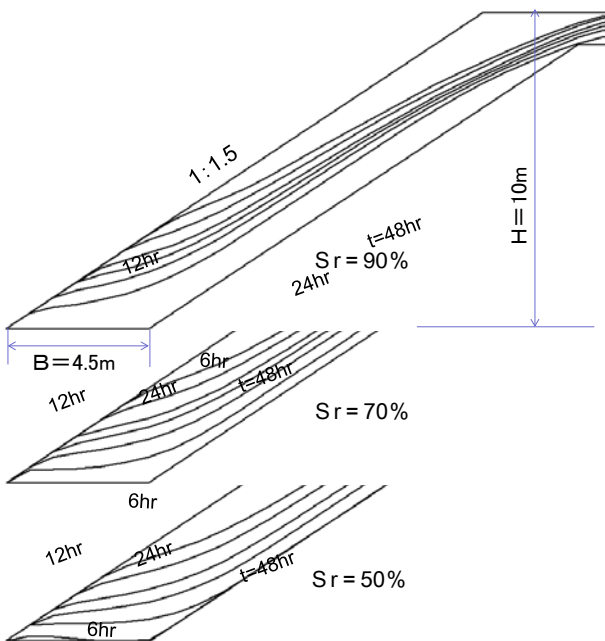


図-9 飽和域の形成 (初期飽和度  $S_r$  の影響)

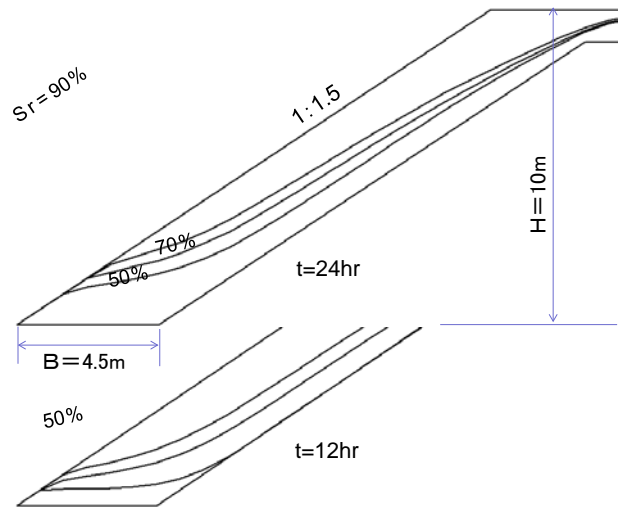


図-10 飽和域の形成 (同一時刻の浸潤面)

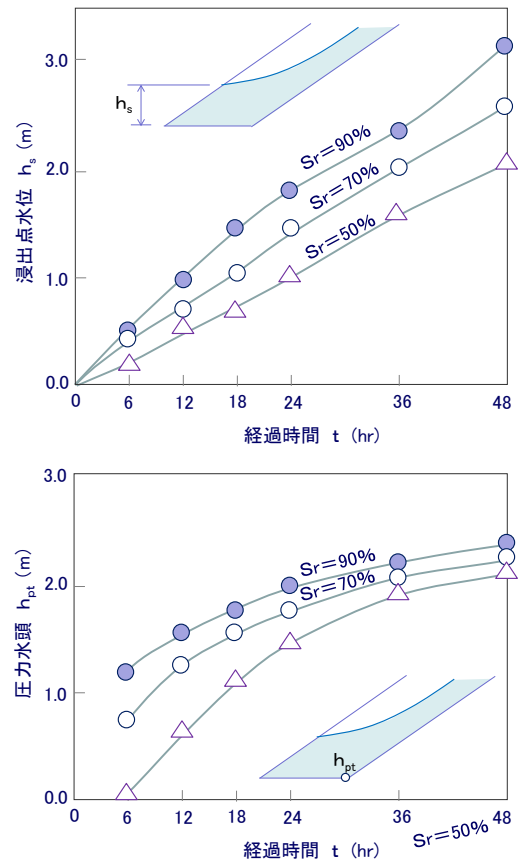


図-11 浸出点水位と隅角部の圧力水頭

が分かる。一方、隅角部の圧力水頭  $h_{pt}$  は、降雨開始直後は飽和度に大きく影響を受け、初期飽和度が高いほど浸潤面上昇が大きいという上記の特性がよく反映されている。しかし、時間経過に伴って飽和度の影響が薄れ、浸潤面は一定値 (排水と貯留の平衡状態) に漸近する傾向が見られる。

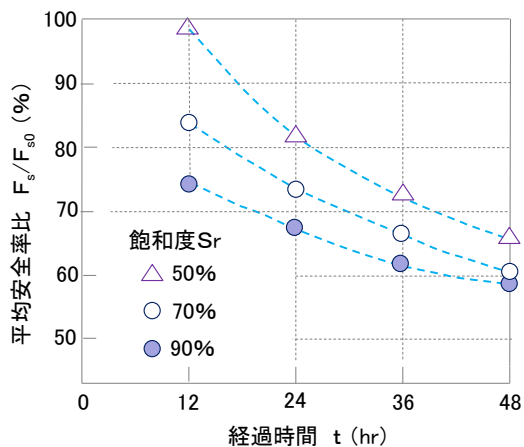


図-12 不安定化の進行（初期飽和度の影響）

以上の初期飽和度による土層内の浸潤状態の変化が、斜面の不安定化に如何に影響を及ぼすかを調べるために、図-12 に安定計算の結果を示した。評価手法や整理の仕方は図-7, 8 と同じであり、無降雨状態との安全率の比率を時間経過とともに見ている。この場合は、分母の無降雨時の安全率  $F_{s0}=1.050$  (勾配 1:1.5) が共通しているから、分子の平均安全率  $F_s$  の値と安全率比の変化状況は同等と考えてよい。図に見られるように、初期飽和度による安全率の変動は、図-11 の隅角部の圧力水頭  $h_{pt}$  の変動と類似しており、降雨開始直後は飽和度の影響が大きいが、時間経過とともに影響度合いが薄れる傾向が知れる。

### 3.3 降雨強度と透水係数の関係

図-13 は降雨浸透に及ぼす降雨強度  $r$  と飽和透水係数  $k_s$  の影響を調べたものであり、(a) 図は  $k_s=3.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$  一定の下で  $r=10, 20, 30 \text{mm/hr}$  ( $r/k_s=0.093, 0.185, 0.278$ ) に変化させた場合、(b) 図は  $r=20 \text{mm/hr}$  一定の下で  $k_s$  の値を  $3.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$  の 1/5 倍、等倍、5 倍 ( $r/k_s=0.037, 0.185, 0.926$ ) に変化させた場合の、隅角部における圧力水頭  $h_{pt}$  の時刻歴を示している。(a) 図に相当する計算は前報でも行い、 $t=24 \text{hr}$  後の浸潤面形状について比較したが、水面形の変化と本図の水頭値  $h_{pt}$  の変化は連動しており、 $r$  が大きくなるに従い両者の変化が小さくなる傾向が見られる。これは、前報で述べたように、斜面内部への降雨の浸透が一定の透水性の下で限界に達し、残りは表面に沿って流下したものと考えられる。

一方、(b) 図は降雨の強さが同じで、表土層の透水性が異なる場合の影響を調べたものである。透水性  $k_s$  が低いと同じ経過時間  $t$  でも浸潤面の発達が遅く、連動して水頭値  $h_{pt}$  の上昇も遅れることが知れる。また逆に、透水

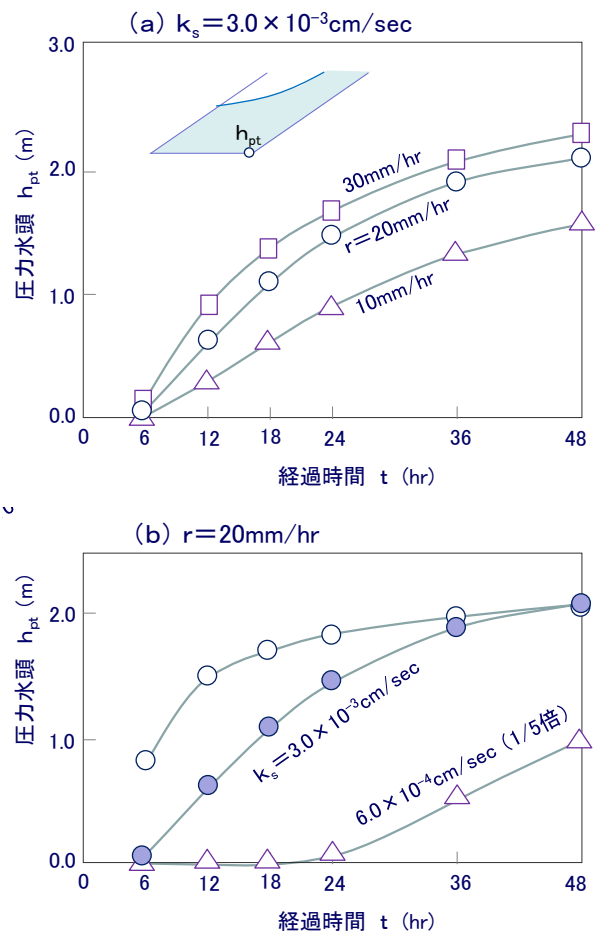


図-13 降雨強度と透水性の影響

性がある程度高くなると水頭値の上昇は急激であり、経過時間  $t$  の大きい範囲では透水性による差が縮小する傾向が見られる。

以上のように、降雨浸透の挙動には降雨強度  $r$  や飽和透水係数  $k_s$  が、それぞれの形で影響因子として関わるが、無次元の指標である両者の比率 ( $r/k_s$ ) も、意味のある重要な因子の一つと考えられる。そこで、計算を若干追加し、 $r=20 \text{mm/hr}$  一定の下、指標値が  $r/k_s=0 \sim 1.0$  の範囲で変化する場合の、隅角部の圧力水頭  $h_{pt}$  の動向を経過時間  $t$  ごとに調べたものが図-14 である。図を見ると、どの時刻においても、 $r/k_s$  値が増加する、つまり透水性能に比べて降雨が相対的に強く、土層内への降雨の浸透が制限されるに従って、水頭値  $h_{pt}$  が一定の割合で減少する傾向が知れる。また、図-13(b)の (1/5倍) の例に見られるように、 $r/k_s$  値が大きいと、時間  $t$  の経過が少ない範囲での浸透が極端に制限される様子が伺われる。逆に、図-13(b)の (5倍) のように  $r/k_s$  値が小さい場合は、時間  $t$  の経過に伴い浸透が急激に生じ、早い時間で一定の浸透状況に漸近することが知れる。

図-15 は、 $r/k_s=0.185$  一定になるように、降雨強度

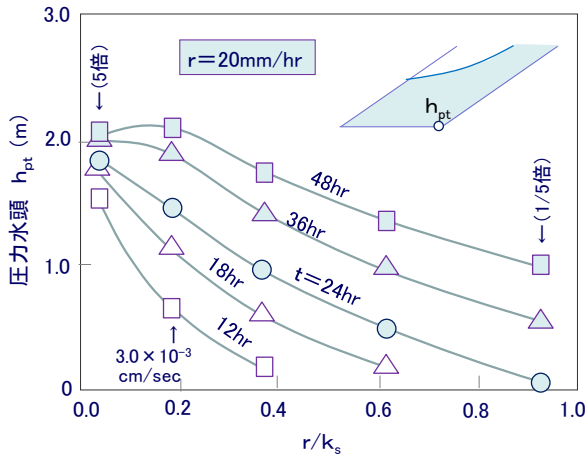


図-14 無次元指標 ( $r/k_s$ ) の影響

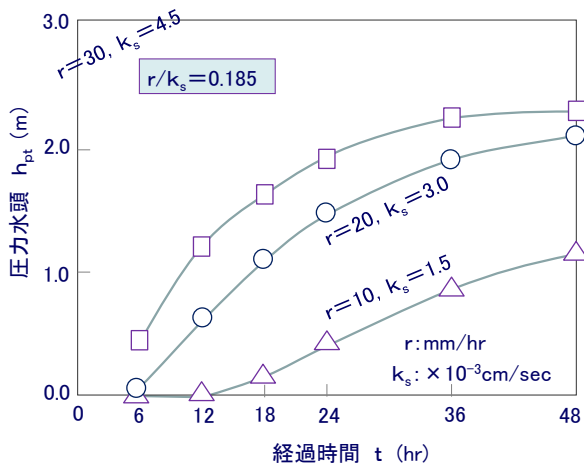


図-15 無次元指標 ( $r/k_s$ ) の影響

を  $r = 10, 20, 30$  mm/hr、対応して透水係数を  $k_s = 1.5, 3.0, 4.5 \times 10^{-3}$  cm/sec と変化させた場合の計算結果であり、前と同様、時間経過に伴う隅角部の圧力水頭  $h_{pt}$  の動向として整理している。前報では同内容の計算結果について、浸潤面の発達状況を比較し、浸透に支配的な影響を及ぼすのは降雨強度であり、透水係数の数倍の変化は現象にほとんど影響を与えないと述べたが、この傾向は図-15にも同様に現れていると考えられる。

以上総括すると、表土層内の降雨浸透に及ぼす降雨強度  $r$  と飽和透水係数  $k_s$  の影響は一律に論じることができないこと、また両者の比率  $r/k_s$  も、現象を統一的に整理・解釈するための的確な指標になり得ないことが判明した。

### 3.4 法先の浸透破壊について

前報では、表土層の傾斜底面（岩盤面）に沿うすべり破壊（図-6 参照）とは別に、図-16 に図示するような、土層先端の三角形土塊の浸透破壊（浸透力の作用に伴う

すべり出し破壊）について議論を行った。本文では、この評価手法を一部改良し、破壊領域の範囲や拡大傾向について二三検討した結果を報告したい。

図-16 に解析手法の概略を整理する。表土層先端の三角形土塊（土層幅  $B$ 、帯片高  $h$ ）に作用する力は以下の4つが挙げられる。

- ①土塊の有効重量  $W$ ：浸潤面の上で  $\gamma_t$ 、下で  $\gamma'$
- ②浸透力：浸潤面下の要素（面積  $A$ ）の図心位置での動水勾配  $i$  と水流方向の方向余弦  $(l, m)$  から計算  

$$F_x = \Sigma (l \times i \gamma_w A), F_y = \Sigma (m \times i \gamma_w A)$$
- ③土塊側面に作用する水圧： $P_w = \gamma_w h_w^2 / 2$
- ④土塊側面に作用する純土圧： $P_a$ （主働土圧）

$$P_h = P_a \cos \delta, P_v = P_a \sin \delta$$

なお、形成された地下水の影響を取り入れるため、土塊側面に作用する力は純土圧と静水圧に区分する。そして④純土圧  $P_a$  の計算にはランキン土圧を適用し、 $P_a$  が粗さ角  $\delta (= \phi)$  で側面に働くと考えて計算に取り入れる。

以上の力の内、土塊のすべり出しに関わる滑動力  $F_d$  は浸透力の水平成分  $F_x$  と水圧  $P_w$ 、水平土圧  $P_h$  であり、底面に作用する拘束力は有効重量  $W$  と浸透力・土圧の鉛直成分  $F_y, P_v$  の和である。したがって、底面の粘着抵抗と摩擦抵抗の成分が表土層の  $(c, \phi)$  に等しいとすると、すべり出しに関する安全率  $F_s$  は下式で算定される。ただし、浸透力の成分  $(F_x, F_y)$  は  $x y$  座標の方向を正としているので、滑動力及び拘束力の表現においては負符号が付く。

$$F_s = \frac{T_f}{F_d} = \frac{c \cdot B + (W - F_y + P_v) \tan \phi}{-F_x + P_w + P_h} \quad (2)$$

以上は三角形土塊の側面を土層幅  $B$ （先端から  $x = B$ ）とした場合であるが、側面の位置  $x$  を  $(0 < x < B)$  の範囲で変え、先端を含むより微小な三角形土塊を考慮の場合も同じ計算方法が適用できる。すなわち、土層幅を  $x$  とする場合は、帯片高を  $h \cdot x / B$  で計算すればよく、本文ではこのような形で、三角形土塊の位置を変えて先端部の浸透破壊を詳細に調べてみた。

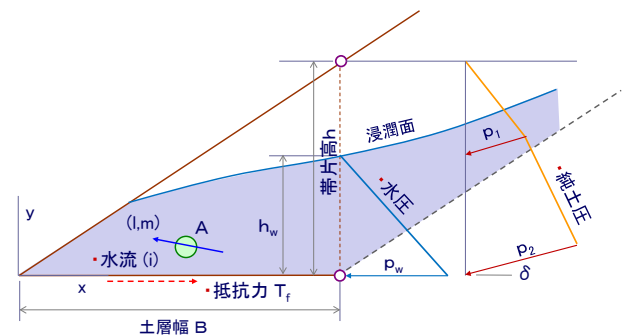


図-16 三角形土塊のすべり出し（浸透破壊）

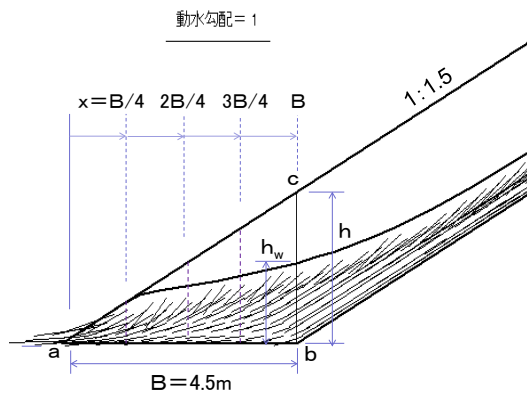


図-17 浸透破壊の計算例

図-17は、勾配1:1.5、土層幅 $B=4.5\text{m}$ 、高さ $H=10\text{m}$ の表土層に $r=20\text{mm/hr}$ の降雨が生じた時の、 $t=24\text{hr}$ 後の先端部の水流状況を示したものである。飽和域内に描いた直線は、その長さが動水勾配 $i$ の大きさ( $i=1.0$ に相当する長さ)を図中に示す、その方向が水流方向(方向余弦 $(1, m)$ )を表している。降雨は、浸潤面から降下して土層内に浸透し、斜面上部から岩盤面に沿って流下し、法先では両者が合体して排出される様子が伺われる。以下では、この法先部 $a-b$ を4等分し、先端 $a$ から $x=B/4, 2B/4, 3B/4, B$ の位置を側面とする4つの三角形土塊を設定して式(2)を適用し、破壊領域の範囲を加味して浸透破壊の様相を調べてみた。

図-18は、上の計算例(勾配1:1.5、 $B=4.5\text{m}$ 、 $H=10\text{m}$ 、 $r=20\text{mm/hr}$ )において、表土層と岩盤との接触を摩擦抵抗のみ( $c=0, \phi=35^\circ$ )とした場合の検討結果であり、時間経過に伴う浸透破壊安全率 $F_s$ の動向を想定領域ごとに示している。図によると、想定する破壊領域( $x$ 値)が小さい先端部を対象とするほど、特に降雨初期において安全性が低く評価されるが、時間が経過すると領域の影響は薄れ、一定値に漸近する傾向が知れる。

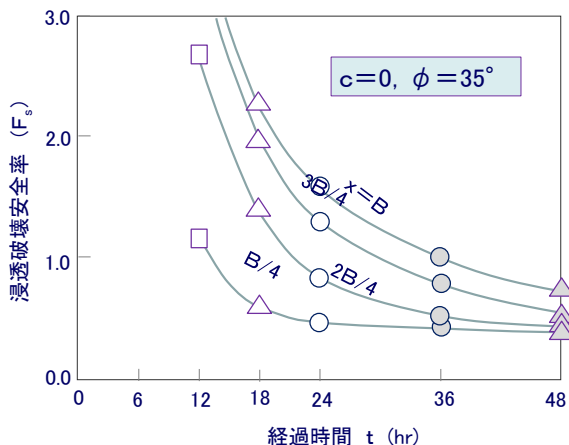


図-18 浸透破壊に対する安全性

本文で検討している浸透破壊(法先のすべり出し破壊)では、表層土と岩盤との接触抵抗の特性が、安定性評価に敏感に関わると考えられる。そこで、摩擦角 $\phi$ の他に粘着力 $c$ を加味した計算を行い、粘着抵抗の効果を調べてみた。ここでは表層土の材質に通常の盛土材料を想定して摩擦角 $\phi=25^\circ$ とし、粘着力 $c$ を単位体積重量 $\gamma_t$ と帯片高さ $h$ ( $x=B$ の側面高)の積で正規化した無次元の指標( $c/\gamma h$ )で表し、 $c/\gamma h=0.1\sim 0.3$ の範囲で変化させることとした。図-19は前図と同じ降雨計算の $t=24\text{hr}$ 後の浸透状況に対して吟味した結果である。勾配1:1.5、 $\gamma=17.0\text{kN/m}^3$ 、 $h=3.0\text{m}$ ( $\gamma h=51.0\text{kPa}$ )であるから、数値的には $c\approx 5\sim 15\text{kPa}$ の土を対象としている。図によると、粘着力の増加に伴い安全率がほぼ比例的に増加するが、その変化傾向は、三角形土塊全体が水没する最先端の場合(図-17の $x=B/4$ 参照)を除いて、想定する破壊領域の大きさに依存しないことが分かる。すなわち、 $x=B/4$ の場合以外は、浸潤面より上の土塊の湿潤重量がすべり出し底面において有効接触圧の増加に効くため、摩擦効果の割合が比較的大きく、粘着力の増加に対応する分だけ安全率が上昇する。これに対し、 $x=B/4$ の最先端の三角形土塊では、他の場合と比べて有効接触圧が相対的に大きく低下するため、粘着力の効果が一段と反映される結果になったと考えられる。

次に、浸透破壊に及ぼす斜面形状の影響を見るために、斜面勾配 $n$ と土層幅 $B$ を変えた計算を行い、図-20及び図-21に整理した。計算条件は図-18と同じで、摩擦抵抗のみ考慮し( $c=0, \phi=35^\circ$ )、降雨強度 $r=20\text{mm/hr}$ とする。そして他の条件を固定し、図-20では斜面勾配を $n=1.0, 1.5, 2.0$ と変え、図-21では $B=3.0\text{m}, 4.5\text{m}, 6.0\text{m}$ と変えて計算し、 $t=24\text{hr}$ 後の浸透状況に対し破壊領域を変えながら浸透破壊の安全性を調べた。

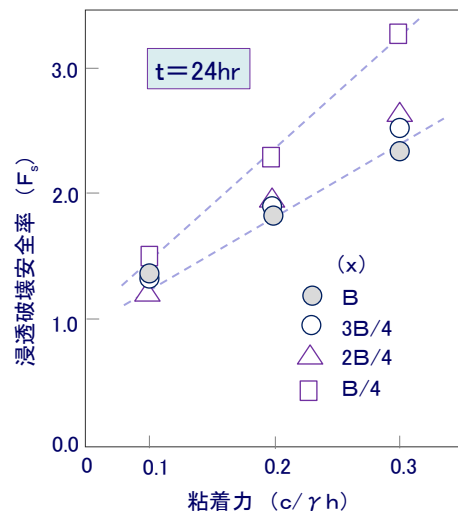


図-19 粘着力の効果

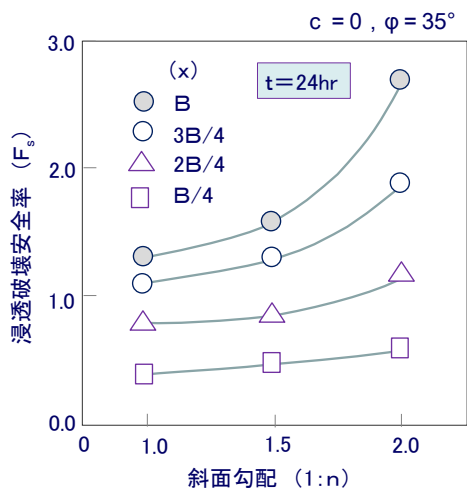


図-20 斜面勾配の影響 (B=4.5m)

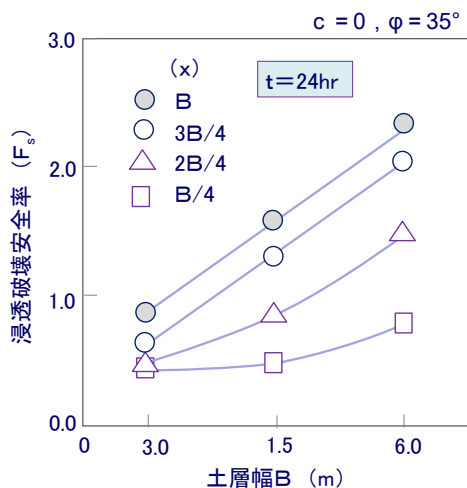


図-21 土層厚の影響 (1:1.5)

図-7 に示したように、岩盤斜面に沿うすべり破壊においては、斜面勾配の大きさが安全率の絶対値に直接的に影響するが、無降雨時 ( $F_{s0}$ ) と降雨時 ( $F_s$ ) の安全率の低減比率 ( $F_s/F_{s0}$ ) で見ると、降雨経過時間  $t$  に関わらず、斜面勾配の影響は極めて小さい。これに対し、浸透破壊 (図-20) では、想定する破壊領域によって斜面勾配の影響度合いが異なり、領域を広く取る ( $x$  大) ほど勾配の影響が敏感に現れることが知れる。

本文の計算では、表土層の層厚  $D$  (図-1 参照) をほぼ統一して議論しようとしており、勾配に応じて設定した

表-2 斜面形状

斜面勾配	1:1.0	1:1.5	1:2.0
土層幅 $B$	3.5m	4.5m	6.0m
土層厚 $D$	2.47m	2.50m	2.68m
帯片高 $h$	3.5m	3.0m	3.0m

斜面形状の各数値は表-2 のように整理される。斜面勾配を変えた降雨浸透の計算結果では、例えば図-4 の浸出点高さ ( $h_s$ ) に見られるように、経過時間  $t$  に関わらず勾配による違いはほとんど見られない。したがって、勾配が緩く土層幅  $B$  が広い場合は、破壊領域 ( $x$  値) を大きく想定すると摩擦抵抗が倍増し、安全率  $F_s$  が大きく変動する傾向にある。逆に勾配が急な場合や、 $x$  値が小さい先端部の破壊を想定するほど  $F_s$  の変動は小さくなる傾向にあり、後者の場合は勾配の影響が薄れて先の考察を裏付けることになる。

同一勾配で土層幅  $B$  を変えた比較計算は前報でも行い、経過時間  $t$  に関わらず、土層幅が広がるほど安全性が向上する傾向にあることを述べた。これは、法先部の浸透状況が土層幅の影響をほとんど受けないため、土層幅が広がるほど土塊の有効重量、そして底面の摩擦抵抗が増える一方、側面に作用する水圧の滑動力としての影響が相対的に低下するためと考えられる。図-21 でも同様の特性が見られているが、細部を見ると、想定する破壊領域が広い ( $x$  値が大) ほど、土層幅の影響が顕著になることが知れる。これは、図-20 の斜面勾配の影響で述べたこととほぼ連動しているように考えられる。

### 3.5 難透水性薄層が降雨浸透に及ぼす影響

一般の盛土や切土では、降雨によるガリ浸食等を防止するために、土層の表面は植生等により透水性の低い材料で被覆されるのが普通である。そこで、最後に、このような難透水性の薄層が土層表面を被覆している場合の解析を行い、降雨浸透に及ぼす影響を調べてみた。

図-22 は、勾配 1:1.5、 $B=4.5m$ 、 $H=10m$ 、飽和透水係数  $k_s=3.0 \times 10^{-3} cm/sec$  の表土層に  $r=20mm/hr$  の降雨が生じた時の飽和域 (浸潤面) の形成状況を比較したもの

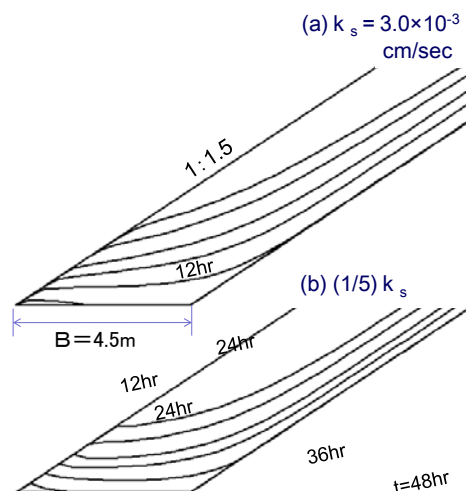


図-22 飽和域の形成 ( $r=20mm/hr$ )



であり、(a)図は難透水性の薄層がない均質な表土層、(b)図は表土層の1/5の透水係数を有する薄層が存在する場合である。ただし、難透水層は天端面には設置されず、斜面表面のみ被覆するものとし、その厚さは水平幅にして土層幅  $B=4.5\text{m}$  の1/8と設定している。図に見られるように、難透水薄層が存在する場合は表面からの雨水浸透が制限されるため、同時刻の比較では明らかに均質斜面の場合より飽和域の形成が遅れている。すなわち、法先の飽和域の盛り上がりや、斜面に沿う浸潤面の高さが相当低下することが分かる。

図-23 は法先の飽和域の形成状況を数値的に見るために、土層と岩盤の接触隅角部における圧力水頭  $h_{pt}$  を時刻歴として比較したものである。難透水層が存在する場合は明らかに水面の上昇が抑えられ、両者の水頭値の差を比率で示すと  $t=24\text{hr}$  までは30~40%程度と大きく、それ以降は差が若干縮まって15~20%程度になることが知れる。

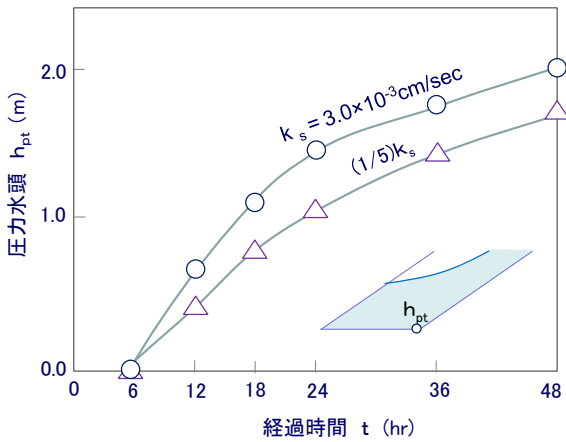


図-23 隅角部の圧力水頭

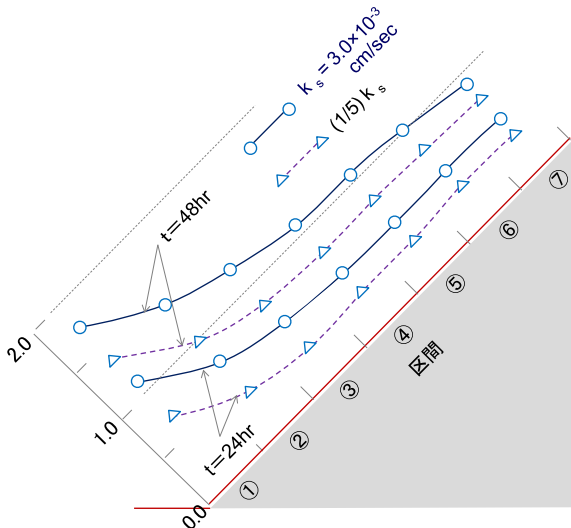


図-24 岩盤斜面に沿う水圧分布

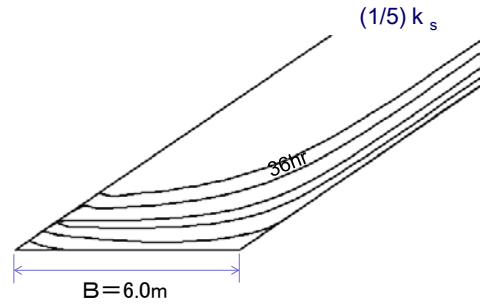


図-25 飽和域の形成 ( $r=20\text{mm/hr}$ )

図-24 は浸透の遅れを岩盤斜面に沿う水圧分布として示したものであり、降雨開始  $t=24\text{hr}$  及び  $48\text{hr}$  後の水頭値を比較している。図-22 で見たように、難透水層を有する場合は斜面に沿う浸潤面の高まりが低く抑えられるので、間隙水圧の値もかなり低下する。均質の場合からの水圧低下の度合を数値的に見てみると、斜面上の場所によっても異なるが、 $t=24\text{hr}$  では平均的に45~55%程度、 $t=48\text{hr}$  では若干小さく25~35%程度になる。

図-25 は、先と同じ表土層の1/5の透水係数を有する薄層(厚さは同じ)が存在する計算で、土層幅が  $B=6.0\text{m}$  の場合の飽和域の形成状況を見たものである。前報でも均質の場合について土層幅の影響を調べたが、概略的に言えば浸透状況に及ぼす土層幅の影響は小さいことが知られている。ただし法先の飽和域の盛り上がり、例えば浸出点の水位  $h_s$  や隅角部の圧力水頭  $h_{pt}$  (図-11 参照) について言えば、土層幅が広がるほど両者の値が小さくなり、飽和域の形成が抑制される傾向がある。この視点で図-22 (b)と比較して見ると、 $B=6.0\text{m}$  の場合は難透水薄層の影響を受け、更に飽和域や岩盤斜面に沿う水圧の発生が抑えられていることが分かる。

表-3 は上記  $h_s$  値と  $h_{pt}$  値の時間的な変化を、 $B=4.5\text{m}$  と  $6.0\text{m}$  の場合について、数値的に比較したものである。表によると、浸出点の水位  $h_s$  は土層幅の影響をほとんど受けないが、隅角部の水頭値  $h_{pt}$  は  $B$  大なるほど低くなり、 $B=4.5\text{m}$  の場合と比べて(時刻によるが)20~40%程度抑えられることが知れる。このような特性は、図-22 (b)と図-25を対比して見れば分かるが、 $B=6.0\text{m}$  で隅角部の水頭値が低下するのは、斜面に沿う流れも抑えられていることが影響しているものと考えられる。

表-3 法先の飽和域

	$B/t$	12hr	24hr	36hr
$h_s$	4.5m	0.416	0.848	1.323
	6.0m	0.401	0.794	1.168
$h_{pt}$	4.5m	0.413	1.041	1.418
	6.0m	0.216	0.819	1.187

#### 4. 結論

本研究で得られた成果と知見を整理すると、以下のよう  
にまとめられる。

- (1) 表土層形状として、斜面勾配と斜面高の影響を調べる  
ため、前報を補間する形で幾つかの計算を追加した。  
その結果、①降雨強度が同じであれば、飽和域の形  
成状況、したがって斜面内の間隙水圧の発生過程は、  
勾配や高さによってほとんど影響を受けないこと、②岩盤  
面に沿うすべり破壊安全率の絶対値は斜面が急なほ  
ど小さくなるが、無降雨時からの安全率の低下傾向  
は斜面勾配にはほぼ無関係であること、③ただし、斜  
面高が大きいほど安全率の平均化に際し局所安全率  
の低い帯片を取り込む割合が多いため、不安定化が  
緩む（安全率の低下度合いが小さい）傾向が見られ  
ること、などが知れた。
- (2) 表土層の初期飽和度（降雨前の湿潤状態）の影響につ  
いては、①初期飽和度が高いほど、降雨の初期段階  
で法先近傍での飽和域の形成（浸潤面の高まり）が  
速いこと、②ただし、時間経過に伴って飽和度の影  
響が薄れ、浸潤状態が一定値に漸近すること、③す  
べり安全率の変動も、斜面内の水圧値の特性と類似  
しており、降雨開始直後は初期飽和度による影響が  
大きい、時間経過とともに影響が薄れる傾向が見  
られること、などが判明した。
- (3) 降雨強度  $r$  と表土層の透水係数  $k_s$  の関係について  
は、①法先における浸潤面の発達や水圧値は、 $r$  値  
が大きく、また  $k_s$  値が低くなるにしたがって、変動  
が小さくなること、②ただし、その変動傾向は  $r$  値  
や  $k_s$  値の単独の変化において様相が異なり、影響を  
一律に論じることができないこと、③また、両者の  
比率（ $r/k_s$ ）も一つの指標値であるが、本文で吟味  
した範囲では、現象の統一的な整理・解釈には的確  
に使用できないこと、などが知れた。
- (4) 法先の三角形土塊の浸透破壊（岩盤面に沿うすべり出  
し破壊）について、破壊領域の範囲を変えて吟味し  
た結果では、①破壊領域を小さく想定するほど、特

に降雨初期において安全性が低く評価されるが、時  
間経過に伴って領域の影響は薄れ一定値に漸近する  
こと、②粘着力を考慮すると安全性が比例的に増加  
するが、その変動傾向は、最先端の場合を除いて破  
壊領域の大きさに依存しないこと、③浸透破壊につ  
いては斜面勾配の影響が見られ、領域を広く想定す  
るほど勾配の影響が敏感に現れること、④表土層の  
幅が広いほど浸透破壊の安全性は向上するが、その  
変動傾向は、破壊領域を広く想定するほど敏感にな  
ること、などが判明した。

- (5) 最後に、芝などの透水性が低い材料（難透水性層）に  
よって斜面表面が被覆される場合の降雨浸透挙動を  
調べた。この結果、難透水性層の存在により雨水の  
浸透が制限されるため、飽和域の形成が遅れ、法先  
の飽和域の盛り上がりや斜面に沿う浸潤面の高さが  
相当低下する様子が見られた。その低下度合いは、  
難透水性層が表土層の 1/8 程度の厚さでも、均質斜面  
と比較して 20~30%程度、場合によっては（斜面内  
の場所や降雨開始からの経過時間にも依るが）40~  
50%程度に至ることが知れた。

#### 謝辞

本報告は、科学研究費補助金 (No. 23560599, 研究代表者：  
奥村哲夫) の助成を受けた研究をまとめたものであり、  
ここに謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 成田国朝: 降雨時の浸透挙動と斜面の不安定化につい  
て, 愛知工業大学研究報告, Vol. 47, pp. 281-290,  
2012.
- 2) 赤井浩一, 大西有三, 西垣誠: 有限要素法による飽和  
- 不飽和浸透流の解析, 土木学会論文報告集, 第 264  
号, pp. 87-96, 1977.
- 3) 成田国朝, 木村勝行, 奥村哲夫: 水位低下に伴う浸透  
挙動と斜面の安定性評価について, ダム工学, Vol. 18,  
No. 1 (69 号), pp. 10-20, 2008.

(受理 平成 25 年 3 月 19 日)