

## 閉塞条件の異なるパイプを有する斜面における 間隙水圧分布の再現

多田 泰之\*・奥村 武信\*\*・久保田 哲也\*\*\*・本田 尚正\*\*

### Simulation of Pore Water Pressure Distribution in the Slope Soil Layer with Pipes Clogged in Different Ways

Yasuyuki TADA \*, Takenobu OKUMURA \*\*, Tetsuya KUBOTA \*\*\* and Naomasa HONDA \*\*

#### 要 旨

山地斜面で発生する崩壊には水みちの関与するものがある。パイプなどの水みちを適切にモデル化すれば、崩壊発生の予知・予測に寄与できる。筆者らは模型実験によって、①パイプ系が排水システムとして働く場合間隙水圧の上昇が抑えられ、②パイプシステムが閉塞していると間隙水圧は閉塞点とその下方で上昇し、③排水システムとして完全であったパイプの一部が突発的に閉鎖した場合は、はじめから閉鎖していた場合に比較して、より下方で間隙水圧上昇が見られ、斜面上方へも飽和帯が拡大することを確認した。

これら実験で確認した間隙水圧分布を、有限要素法による飽和-不飽和浸透流解析で再現計算した。パイプを水平方向に非常に大きな透水性をもつ異方性土層に置換することで、パイプの閉鎖に起因する間隙水圧の上昇過程は的確に再現できた。浸透流解析を用いて斜面の崩壊発生時刻を予測する場合、水みちを考慮することで、予測精度がさらに改善すると考える。

キーワード：パイプ、間隙水圧分布、飽和-不飽和浸透流解析、崩壊

#### Summary

For appropriate prediction of slope failure, we need an applicable model for water passages, especially of soil pipes in the soil layer. In this paper, we begin by illustrating the different aspects of pore water pressure distribution affected by soil pipes in model slopes, we then discuss the procedures and results of a numerical simulation of the raising process of pore water pressure by saturated and unsaturated infiltration analysis.

Model experiments showed; ① The soil pipe system functioned as a drain system to depress pore water, ② The pipe system, plugged before rainfall began, become raised pore water pressure in the vicinity of the plug, and ③ The pipe system, being plugged after establishing a steady state of pore water pressure and discharge from the pipes by rainfall, raised pore water pressure around the plug by a large margin. These experimental results were simulated by saturated and unsaturated infiltration analysis. The pipes were replaced with an anisotropic soil layer of higher hydraulic conductivity horizontally. The calculated and measured results corresponded well. It can be shown to reproduce pore water pressure distribution on slopes that have soil pipes under different closed condition by saturated and unsaturated infiltration analysis. We conclude that saturated and unsaturated infiltration analysis which takes into consideration water paths can improve the prediction of slope collapse time.

Key words : Soil pipe, Pore water pressure distribution, Percolation analysis, Slope failure

\*鳥取大学大学院連合農学研究科 (〒 680-8553 鳥取市湖山町南 4-101)

The United Graduate School of Agricultural Science, Tottori University, Tottori, 680-8553, Japan

\*\*鳥取大学農学部生物資源環境学科学森林科学講座 (〒 680-8553 鳥取市湖山町南 4-101)

Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Tottori University, Tottori, 680-8553, Japan

\*\*\*九州大学大学院農学研究院森林資源科学部門 (〒 812-0081 福岡市東区箱崎 6-20-1)

Department of Forest and Forest Products Science, Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka, 812-0081, Japan

## 1. はじめに

従来、崩壊の発生時刻の予測は、浸透流解析と安定解析を組み合わせたカップリング解析で行われることが多い(矢田部ら 1986, 三森ら 1990, 小川 1997 など)。しかし、既往のモデルで解析した場合、計算による崩壊時刻は実際の崩壊時刻よりも遅くなると報告されている(平松ら 1990, 三森ら 1995)。水山(1994)は、実斜面では決して一様ではない透水性や土質特性を一様と仮定することに原因があると指摘した。また、小杉ら(2001)は崩壊の発生時刻・場所の予測精度の向上には、パイプのような透水性の高い土層の適切なモデル化が不可欠と指摘している。内田ら(1996)は、パイプの斜面安定に与える影響を評価する場合、パイプの排水システムの違いに起因する間隙水圧分布の差異を定量的に評価する必要があると述べている。

多田ら(2002)は、状態を単純化した模型実験によって、パイプの有無やその閉塞条件が崩壊の発生、崩土の挙動に及ぼす影響を検討し、パイプの閉塞条件は崩壊の発生時刻に影響を及ぼすと指摘した。この結果は前述した平松ら(1990)、三森ら(1995)、水山(1994)の指摘を支持した。土層を均一と考えた既往モデルにパイプのような不均一要素を組み込み、地下水の挙動を予測できれば、崩壊発生時刻をより高い精度で予測できる可能性がある。しかし現在のところ、そのような試みは非常に少ない。

筆者らは、不均一要素であるパイプを水平方向に非常に大きな透水性をもつ異方性土層に置換すれば常例の有限要素法による飽和-不飽和浸透流解析での地下水挙動の予測精度を向上できる可能性があると考えた。本稿では、まず人工降雨装置と模型斜面を用いた崩壊実験より得られたパイプの閉塞条件の違いに起因する間隙水圧分布について述べる。そして、その間隙水圧分布を有限要素法による飽和-不飽和浸透流解析によって解析し、模型実験で得られた間隙水圧分布と計算結果の適合性について検討する。

## II. 模型斜面実験で得た知見

### 1. 模型斜面・人工降雨装置と模擬パイプ

模型斜面の模式を図1に示す。斜面のディメンションは水平長380cm、幅88cm、上層厚40cm、勾配35°である。斜面は、森脇(1993)の指摘を参考に、上下端に水平地盤を有するものとした。土槽底には3cm間隔に厚さ1cm、幅1cmの合板を横断方向に、また側壁には3cmメッシュの亀甲金網を貼り付け、土層の滑動を防止した。斜面下端は、土中水の移動に影響しないようにステンレス網と不織布で支持した。

上層材料は、マサ上の5mmフルイ通過分とした。その粒径加積曲線を図2に示す。含水比8%に調整した材料を、乾燥密度 $1.2\text{t/m}^3$ となるよう盛り土した。盛り土は、あらかじめ求めた土壌硬度-乾燥密度関係を基準に山中式土壌硬度計で締固め度を管理しながら5cm厚ごとに土羽打ちし、各層間での剥離を防ぐため表面に溝を刻んだ。同様に締め固めたサンプルの飽和・非排水条件での一面せん断試験で得た粘着力( $c'$ )及び内部摩擦角( $\phi'$ )は、それぞれ $0.0\text{ kgf/cm}^2$ 及び $27.65^\circ$ であり、飽和透水係数は $9.38 \times 10^{-3}\text{ cm/s}$ であった。

上層へは、図1に示す人工降雨装置で崩壊が発生するまで定常給水を継続した。スプレーノズルからの水滴は霧状で、表面侵食を生じさせない。給水の不偏性を確認するため斜面上10cmグリッド格子点351箇所を降雨強度を測定した。設計強度 $34.5\text{ mm/hr}$ に対し、分布幅 $32.5 \sim 35.5$ 、標準偏差 $1.43\text{ mm/hr}$ であった。

斜面土層内でのパイプの発達様式はさまざま考えられている(塚本ら 1988)。実験では難・

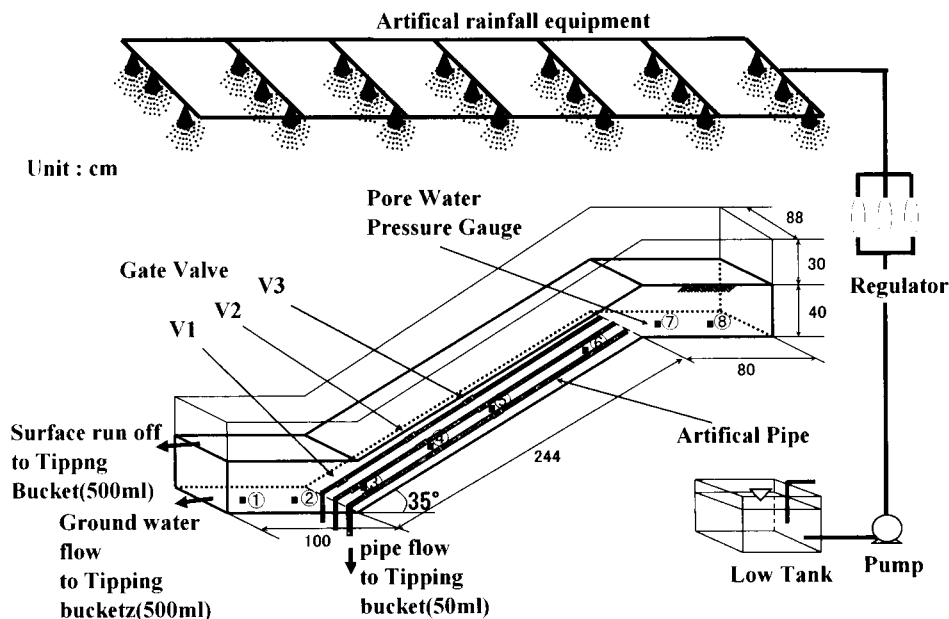


図1 模型斜面とセンサーの配置

Fig.1 Schematic illustration of experiment apparatus

不透水層直上に発達したパイプを想定し、図1に示すように土槽斜面底部に模擬パイプを等間隔(22cm)に3本設置した。パイプは、 $1\text{cm}^2$ あたり0.6個の密度(寺嶋ら1996)で $\phi=7\text{mm}$ の孔を穿った内径13mmの塩化ビニル管を厚さ1mmの不織布で2重に包んだものとした。パイプの外径は $\phi=3\text{cm}$ となった。各パイプには図1および3に示す3箇所にてゲートバルブを取り付け、パイプ下端は傾斜末端で土槽外へ開口させ流量を把握した。

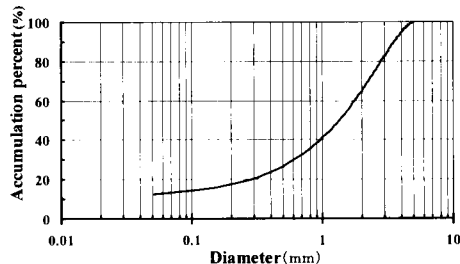


図2 上層材料の粒径加積曲線

Fig.2 Size cumulative curve of slope material

## 2. 実験条件と測定項目

実験はパイプの状態が斜面安定に及ぼす影響を検討することを目的とするので、パイプ条件以外の実験条件は全て同一とした。

自然斜面におけるパイプの存在形態には次の場合が想定される。①土層外へ達する連続したパイプがある；②パイプが土層内で途切れ、土層外へ開口しない；③パイプ流生起時にパイプの一部が突発的に閉鎖する。

実験では、パイプを配置しない1)パイプ無し(No pipe)と、模擬パイプに取付けたバルブの開閉で次の3ケースを設定した。

2) 開放パイプ(Open pipe)：全てのバルブを開放。

- 3) 閉鎖パイプ (Plugged pipe) : 給水開始時からバルブ V1 を閉鎖。
- 4) 途中閉鎖 (Late plug) : 給水開始時は全てのバルブを開放するが、パイプ流出がほぼ安定した後バルブ V1 を閉鎖。

図3にこれらの実験条件でのバルブの状態を示す。バルブ V2, V3 は、今回の実験では開放したままである。

給水開始時点からパイプ流出量, 地下水流出量, 地表面流出量, 間隙水圧, 地表面移動量を測定した。計測方法は次のとおりである。

- 1) パイプ流出量: パイプ毎に 250cm<sup>3</sup> 転倒枡に受け, 転倒数を 1 分間隔で記録した。
- 2) 地下水流出量: 斜面下端からの浸出水を 500cm<sup>3</sup> 計転倒枡に集水し, 転倒数を 1 分間隔で記録した。
- 3) 地表面流出量: 斜面下端の地表面下 2cm に挿入した薄鉄板製トラップに集水し, 500cm<sup>3</sup> 計転倒枡の転倒数を 1 分間隔で記録した。
- 4) 間隙水圧: 図1に丸囲み数字で示す土層底パイプ間中央の 8 点に外径 0.5cm, 長さ 2cm のポーラス・カップをもつマイクロ・テンシオメータを埋設し, 電圧出力を 1 分間隔で記録した。

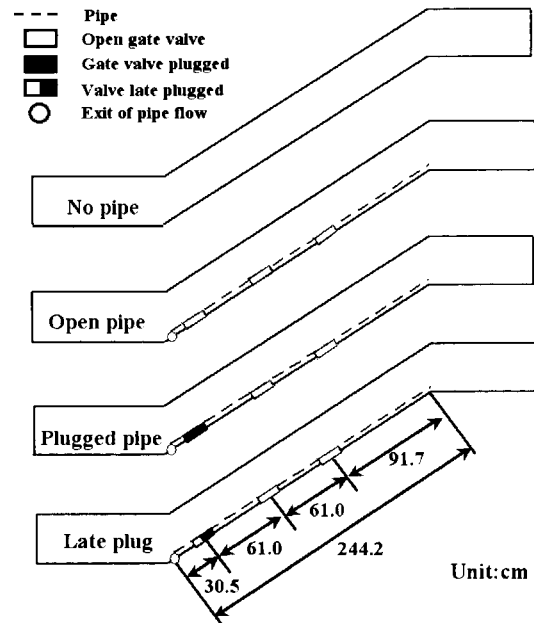


図3 各実験条件でのゲートバルブの開閉状態  
Fig.3 Gate valves setting in each run  
(Late plug was operated after the stationary water table established)

### 3. 実験結果

#### (1) 崩壊発生時間の差異

パイプ無しの場合降雨開始から 164 分で崩壊したが, 開放パイプでは 215 分経過後も崩壊しないままで地下水流出量, パイプ流出量がほぼ安定に至った。閉鎖パイプでは, パイプ無しより早く 88 分で崩壊した。開放パイプ状態で 215 分経過後にバルブ V1 を閉鎖して下部途中閉鎖の実験に移行したが, 閉鎖後 64 分で崩壊した。詳細は既に議論した (多田ら 2002)。

#### (2) 間隙水圧分布の差異

間隙水圧と流出ハイドログラフの経時変化を図4に示した。間隙水圧の図中の数字は測定位置を表す。また, ハイドログラフは各流出成分の 10 分間の移動平均値を示した。図中に▼・▲で示した時刻における斜面の間隙水圧分布を図5に示した。各図の数字は時刻 (分) を示し, 図中のプロットが間隙水圧測定位置を表す。

時間経過とともに間隙水圧が上昇する過程は, パイプの有無・閉塞条件によって異なる。各実験条件における特徴は次のようであった。

##### 1) パイプ無し

下方の勾配変換点付近 (125cm) で発生した飽和帯が時間経過とともに斜面上方へ拡大し,

斜面全体に飽和帯が形成される。間隙水圧は、斜面下方勾配変換点付近で最も高く、上方ほど低い。

## 2) 開放パイプ

時間経過と共に斜面上下部の水平地盤部 (25, 75, 325cm) で飽和帯が発生し、その厚さは下部地盤で 25cm, 上部地盤で 10cm 程度となる。しかし、パイプが存在する斜面部での間隙水圧は非常に低い。水平地盤部で間隙水圧の上昇している時刻でも斜面部での間隙水圧は低く、パイプ流出量が非常に多い。このことから、パイプが斜面部の土中水を集水し、斜面部での間隙水圧の上昇を抑制していることがわかる。この現象は、異なる給水方法での内田ら (1995) の実験でも確認されている。下流端から 25cm の間隙水圧が 75cm でのそれよりも高くなったことは 75cm の土層でもパイプに向かって地下水が逆流していることを示すと考える。

## 3) 閉鎖パイプ

閉鎖点 (125cm) での間隙水圧の上昇が大きく、60～65 分の 5 分間に 20cm も上昇した。閉鎖点より上方では、開放パイプと同様に飽和帯はほとんど形成されない。パイプから系外への流出が無いためパイプへの流入開始時刻は明確ではないが、59 分にパイプ上端に相当する 325cm で正圧を記録していることから、この時刻前後に土層からパイプへの集水が始まったと考える。60～65 分の閉鎖点での大きな間隙水圧の上昇は、斜面上方でパイプに集水された土中水が閉鎖点で土層へ還流したことを示すと考える。

## 4) 途中閉鎖

図 5 には 125cm でパイプを閉鎖してからの間隙水圧分布を描いた。また、破線は閉鎖時の間隙水圧分布を表す。閉鎖でパイプ流出が停止し、閉鎖点近傍での間隙水圧が急激に上昇を始め、飽和帯は下部水平地盤部へ伝播していく。飽和帯は斜面上方へも拡大するが、これはパイプ流の逆流の発生を示唆する。崩壊時の地下水形状は閉鎖パイプに類似するけれども、下部水平地盤部での間隙水圧が高い。また、閉鎖点 125cm での上昇速度は閉鎖パイプに比べ緩慢である。

以上から、次の知見を得た。①パイプが集・排水システムとして完全な開放パイプの場合、斜面部での飽和帯形成が抑制される。②しかし、一部で閉鎖したパイプあるいは降雨中にパイプが閉鎖した場合は、土中水を閉鎖点へ集中させ局所的な間隙水圧の上昇を生じさせる。

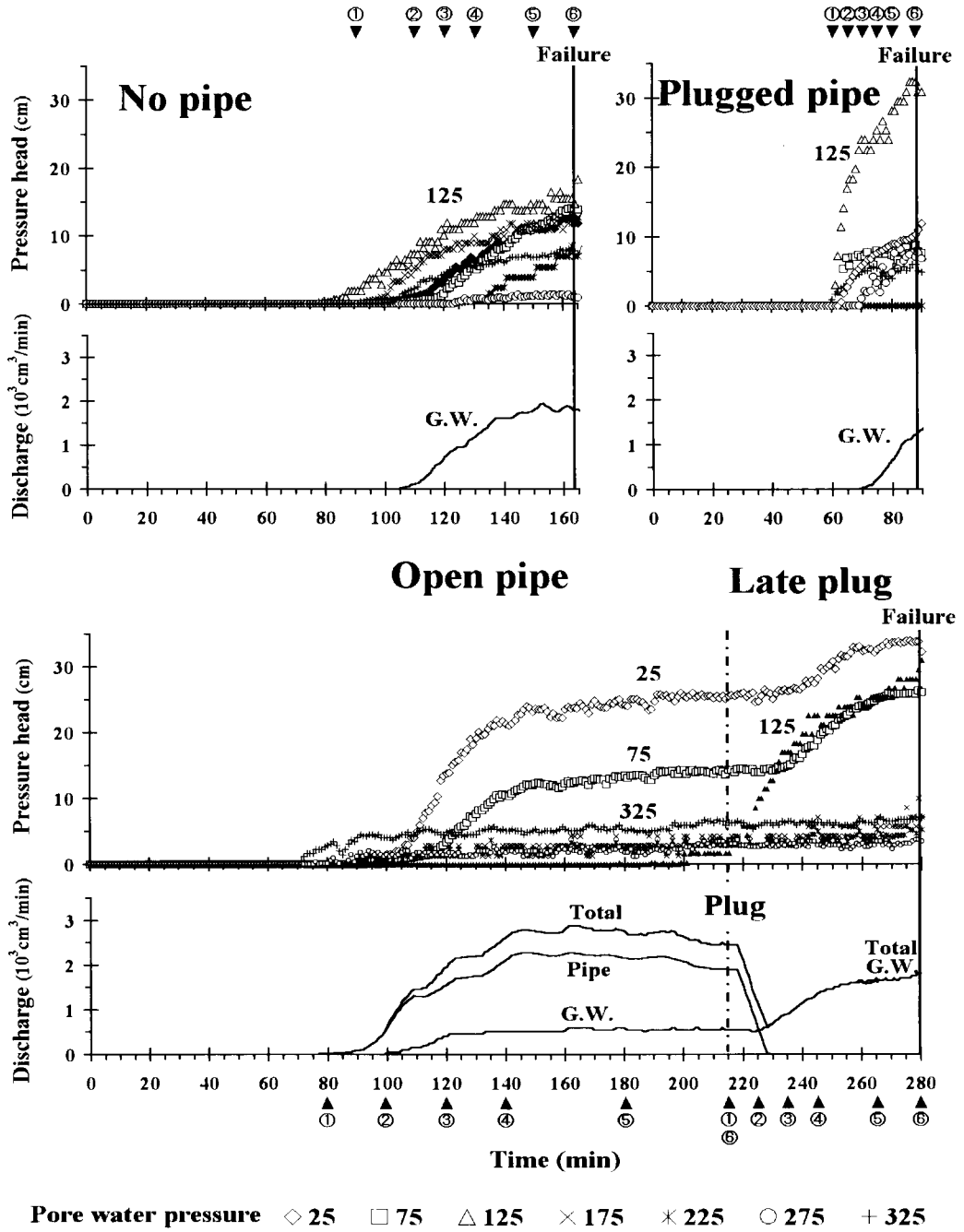


図4 間隙水圧と流出量の経時変化

Fig.4 Changes of pore water pressure and discharge

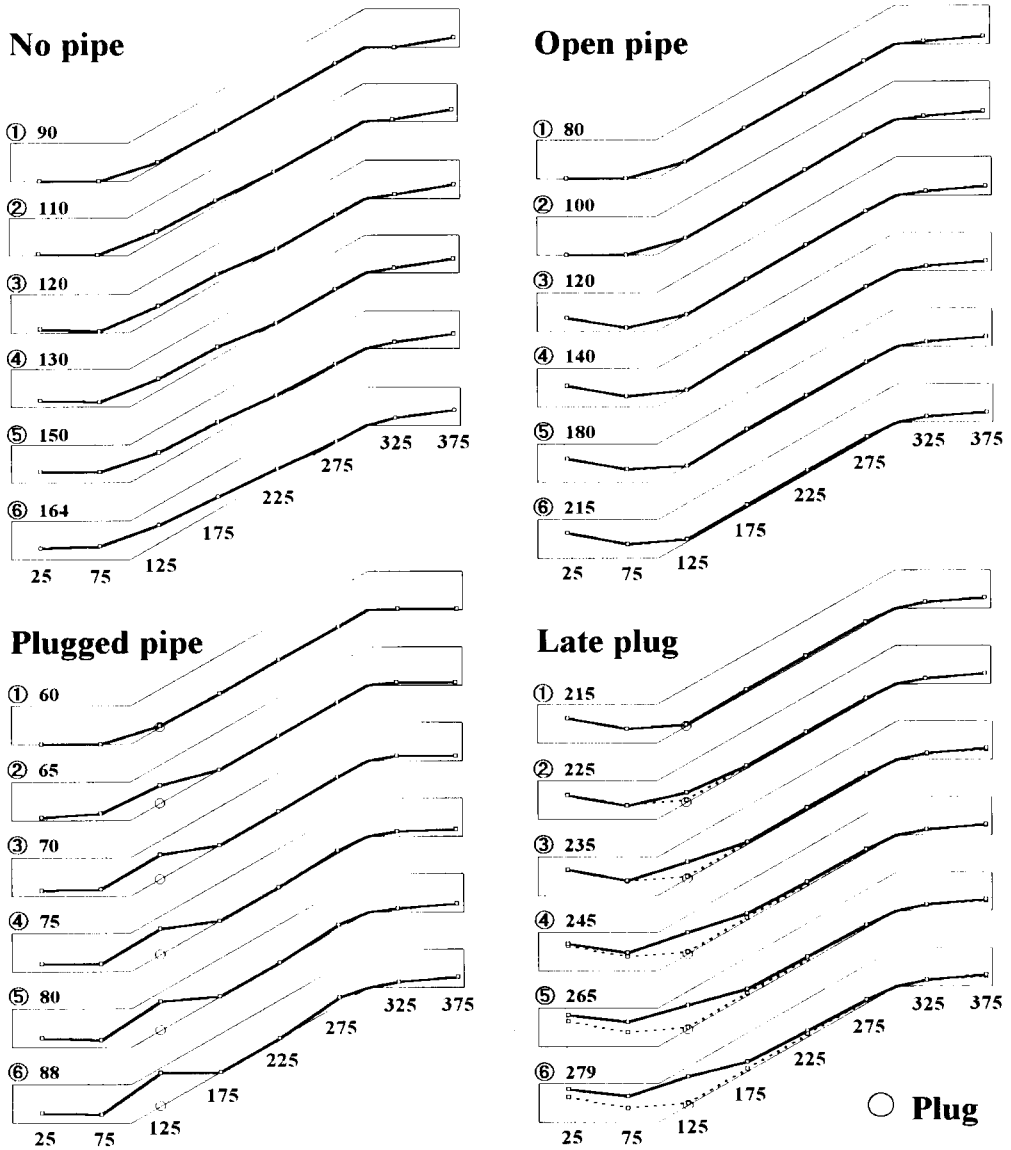


図5 間隙水圧分布の経時変化  
Fig.5 Changes in pore water pressure distribution

### III. 浸透流解析

#### 1. 飽和一不飽和浸透流解析

降雨開始時の斜面表層土は不飽和状態であることから、不飽和地盤の浸透特性を考慮する必要がある(赤井ら 1977)。ここでは、不飽和領域での浸透特性を組み込める有限要素法による飽和一不飽和浸透流解析を行って斜面土層内の間隙水圧を定量的に評価し、降雨に伴う斜面内の地中水挙動を再現する。計算には西垣ら(1999)が開発した UNSAF のコードを変更し、使用した。

飽和・不飽和領域の浸透を支配する基礎方程式は、質量保存則より導かれた連続の式と Darcy 則を不飽和領域に拡張することによって次式で表される(赤井 1977)。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( K(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial z} + K(\Psi) \right) - q = (C(\Psi) + \alpha S_s) \frac{\partial \Psi}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1: \text{飽和領域} \\ 2: \text{不飽和領域} \end{cases}$$

ここに、 $K(\Psi)$ : 不飽和透水係数,  $x, z$ : 水平・鉛直座標,  $\Psi$ : 圧力水頭,  $q$ : 流量,  
 $S_s$ : 比貯留係数,  $t$ : 時間,  $C(\Psi)$ : 比水分容量。

比水分容量  $C(\Psi) (= \partial \theta / \partial \Psi)$  は圧力水頭の増分に対する体積含水率の変化の割合を表すものである。浸透が進み土層が飽和すると  $C(\Psi) = 0$  となり、(1)式は飽和浸透式となる。また、(1)式の不飽和透水係数を(2)式のように相対透水係数  $K_r$  を用いて不飽和透水係数  $K(\Psi)$  を飽和透水係数  $K^S$  の関数で表すと(1)式は(3)式となり、飽和・不飽和浸透を包括的に扱うことができる。

$$K(\Psi) = K_r \cdot K^S \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( K_r K_{xx}^S \frac{\partial \Psi}{\partial x} + K_r K_{xz}^S \left( \frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1 \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_r K_{zx}^S \frac{\partial \Psi}{\partial x} + K_r K_{zz}^S \left( \frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1 \right) \right) - q \\ = (\alpha S_s + C) \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad \dots (3) \end{aligned}$$

ここに、 $K_r$ : 相対透水係数,  $K_{ij}^S$ : 各座標方向への飽和透水係数。

### IV. 間隙水圧分布の再現

#### 1. 初期条件・境界条件

実験土層を図6に示した  $x, z$  軸方向へ一辺 5cm の三角形要素(節点数 693, 要素数 1216)に分割し解析を進めるが、(3)式は非線形偏微分方程式であり初期条件、境界条件によって種々の解を得る。解析を進めるには、領域内での初期条件・境界条件を設定する必要がある。

土層内各節点  $N_{i,j}$  の水分初期条件  $\Psi(N_{i,j}, 0)$  は、水分特性曲線より読みとった盛土時に管理した含水比 8% に対応する水頭  $-100\text{cmH}_2\text{O}$  とした。



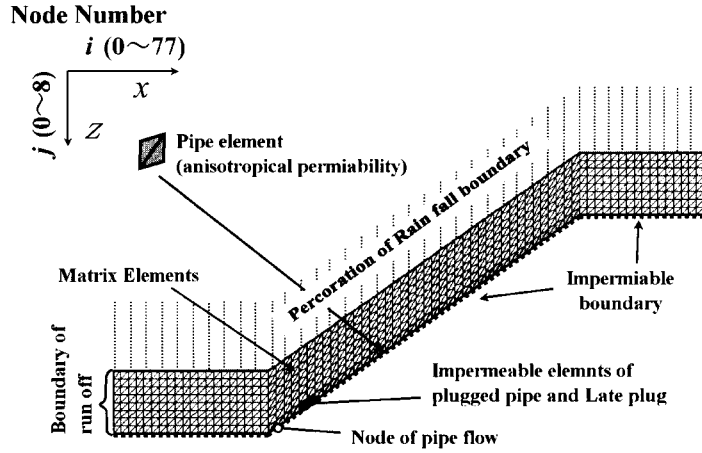


図6 要素分割、境界条件とパイプ要素の設定  
Fig.6 Elements and boundary condition for analysis

$$\Psi(N_{i,j},0) = \Psi_0(N_{i,j}) = -100.0 \quad (4)$$

ここに、 $i$ :  $x$  軸方向の接点番号 (0 ~ 77),  $j$ :  $z$  軸方向の接点番号 (0 ~ 8) であり、上層末端の地表面を  $N_{0,0}$  とする。

境界条件は、斜面下端開放部を流出境界、斜面底部、斜面上方側壁を不透水境界、地表面を降雨浸透境界とした。降雨浸透境界へは降雨強度 34.5mm/hr の定常給水を与えた。

斜面下端開放部は大気圧に常に接しているので、土層の圧力水頭は  $\Psi = 0.0$  であり、(5)式となる。

$$\Psi(N_{i,j},t) = \Psi_b(N_{0,1-7},t) = 0.0 \quad (5)$$

不透水境界である斜面底部・斜面上方側壁はフラックスが 0.0 の既知流量境界と考えられ、(6)式となる。また、降雨浸透境界もフラックスが 34.5mm/hr の既知流量境界と考えられ、(7)式となる。

$$K_r \left( K_{ij}^s \frac{\partial \Psi}{\partial x_j} + K_{i3}^s \right) n_i = -V(N_{i,j},t) = -V(N_{0-77,8},t) = -V(N_{77,0-8},t) = 0.0 \quad (6)$$

$$K_r \left( K_{ij}^s \frac{\partial \Psi}{\partial x_j} + K_{i3}^s \right) n_i = -V(N_{i,j},t) = -V(N_{0-76,0},t) = 34.5/36000 \times L \quad (7)$$

ここに、 $V$ : 境界面を通過するフラックス,  $n_i$ : 境界面に垂直なベクトルの  $x$  座標方向成分,  $t$ : 時間,  $L$ : 地表面に接する 1 要素の長さ。

パイプの取扱いは、パイプを図7に示したようにパイプと等価な透水性を持つ透水異方性土層に置換えた。すなわち鉛直方向には地盤と同じ透水係数 ( $K_z = 0.938 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ) をもち、水平方向には、 $K_z$  の約 100 倍 (北原 1988) の値に相当する  $K_x = 1.0 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$  をもつものとした。パイプの閉塞条件は、パイプ要素の一部に図6中の■で示した位置に次式に示すような透水係数0の不透水要素を設けた。

$$K_{ij}(\Psi) = K_r \cdot K_{ij}^S = 0.0 \quad (8)$$

一方、土層外へ開口する開放パイプは、図中の○で示したパイプ開口点に実測したパイプ流出量を既知流量境界値として与えた。境界条件は(9)式で表される。

$$K \left( K_{ij}^S \frac{\partial \Psi}{\partial x_j} + K_{ij}^S \right) n_i = -V(N_{i,j},t) = -V(N_{21,r},t) = Q_p \quad (9)$$

ここに、 $Q_p$  : 測定したパイプ流出量。

計算の時間単位は 60sec で、実験実施時間だけ継続した。

## 2. 土層の透水性・保水性の設定

飽和—不飽和浸透流解析を行うためには、土層の物理性を表すパラメータとして体積含水率 ( $\theta$ ) と土中水分の圧力水頭 ( $\Psi$ ) の関係、および、飽和時に対する透水性の比率すなわち比透水係数 ( $K_r$ ) と圧力水頭 ( $\Psi$ ) あるいは体積含水率 ( $\theta$ ) の関係が必要となる。

実験土の  $\Psi$ — $\theta$  関係は、pF 試験 (水頭法) によって  $\Psi = -200 \text{cmH}_2\text{O}$  まで測定した。求めた  $\Psi$ — $\theta$  値の関係を van Genuchten (1980) の提案した(10)式で表現して解析を進めることにした。

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left( \frac{1}{1 + |\alpha \Psi|^n} \right)^m \quad (10)$$

$m = 1 - 1/n$

ここに、 $Se$ :有効飽和度、 $\theta$ :体積含水率、 $\theta_s$ :飽和体積含水率、 $\theta_r$ :最小含水量、 $\alpha (> 0)$ 、 $n$ :係数である。これらの最適値を非線形最小自乗法で求めた結果、 $\theta_s = 0.544$ 、 $\theta_r = 0.070$ 、 $\alpha = 0.289$ 、 $n = 1.855$  となった。実測の  $\Psi$ — $\theta$  関係と最適化結果を図 8(a) に示す。pF 試験は比較的容易に実施できるが、不飽和透水係数は特殊な装置と高度な技術を必要とするため、 $\Psi$ — $K(\Psi)$  関係は  $\Psi$ — $\theta$  曲線から推定する試みが多くなされている (例えば、Brooks & Corey

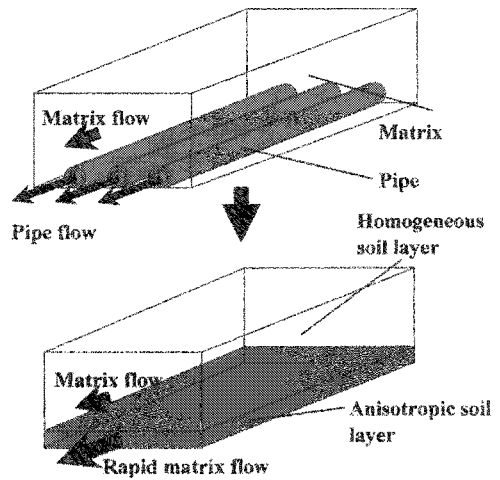


図7 パイプ要素の透水異方性土層への置き換え  
Fig.7 Substituting of pipes by soil layer of anisotropic hydraulic conductivity.

1966, 谷 1982)。van Genuchten も (10) 式の  $Se$  を因子として, Mualem (1976) の提案した理論に基づき不飽和透水係数  $K(\Psi)$  を次式で表した。

$$K(\Psi) = K_s \cdot Se^{1/2} \left\{ 1 - \left( 1 - Se^{1/m} \right)^m \right\}^2 \quad (11)$$

(10) 式より求められる係数  $Se$ ,  $m$  を (11) 式に代入し,  $\Psi - K(\Psi)$  関係を算定した。定水法で測定した飽和透水係数および定常法 (図 9) で測定した不飽和透水係数の関係と, (11) 式による算定値を図 8(b) に比較した。van Genuchten 式を用いて  $\Psi - K(\Psi)$  関係を良好に近似できる。解析ではこれらの式を用いた。

### 3. 間隙水圧分布の再現結果

崩壊発生時間までの間隙水圧分布の経時変化を閉塞条件毎に図 10 に示した。図中の実線は実測間隙水圧を, 破線は浸透流解析で得た各節点の圧力水頭値から地下水面すなわち  $\Psi = 0.0 \text{ cmH}_2\text{O}$  となる位置を結んだものである。

解析で求めた間隙水圧分布の実測値への対応性について次のように言える。

#### 1) パイプなし

120 分に斜面全体に飽和帯が形成され始め, 側方流が発生し, 斜面下方へと拡大して行く。これらの傾向は, 飽和帯発生位置・時刻ともに実測値をよく再現できている。

#### 2) 開放パイプ

120 分に上下の水平地盤部に飽和帯が発生する。時間経過に従い上下の水平地盤で飽和帯が上昇して行くが, 斜面では時間が経過しても飽和帯が発生しない。上部水平地盤の飽和帯の発生時刻と下部水平地盤の飽和帯の厚さに若干の差が見られるのは, 実験時に模型斜面の側壁を伝う雨水が影響を与えたからと考えられる。斜面部で飽和帯が形成されず, 上下水平地盤部で間隙水圧が上昇す

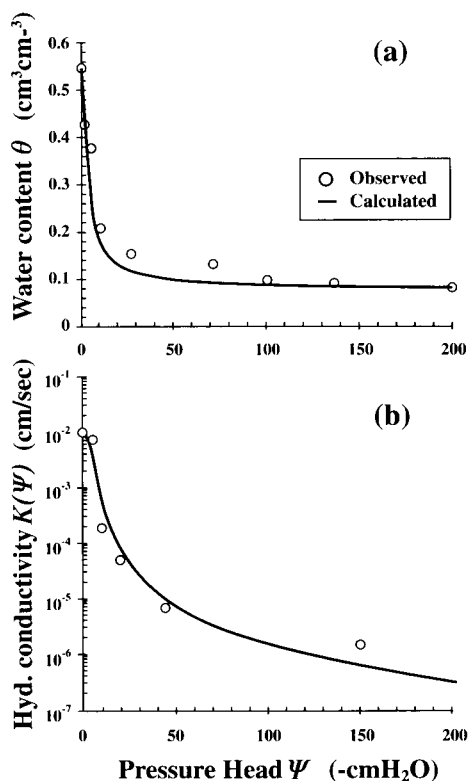


図 8  $\Psi - \theta$  および  $\Psi - K(\Psi)$  の算定結果  
Fig.8  $\Psi - \theta$  and  $\Psi - K(\Psi)$  relation observed and curves optimized after Van Genuchten

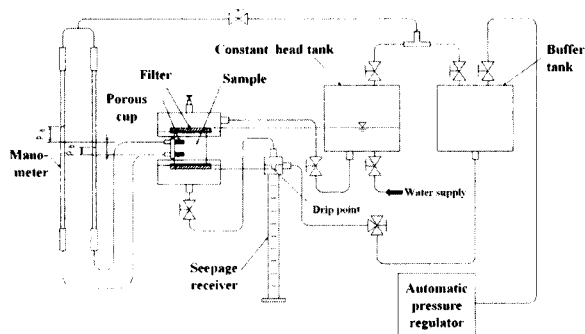


図 9 不飽和透水試験器 (定常法)  
Fig.9 Block diagram of infiltration test for unsaturated soil

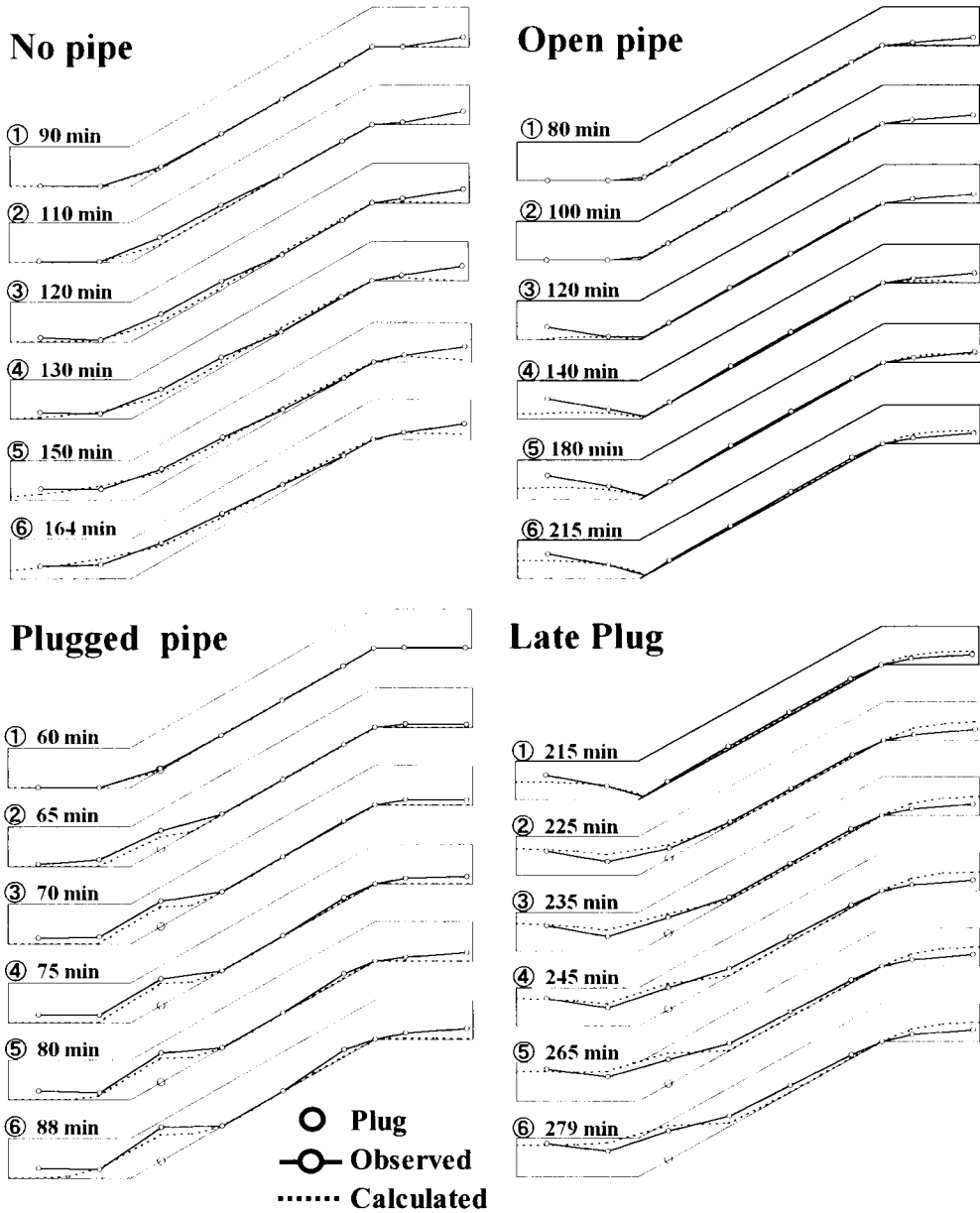


図10 間隙水圧分布の数値計算結果と実測値の比較  
 Fig.10 Change in pore water pressure distribution simulated and observed

る傾向は、実測値とよく合致する。

### 3) 閉鎖パイプ

65分にパイプ閉塞点で飽和帯が発生する。その後、閉鎖点で間隙水圧が上昇し、下部の水平地盤へと飽和帯が拡大して行く。上下の水平地盤で実測値と解析値に若干差が見られるが、パイプ閉塞点での間隙水圧上昇過程は図11(a)に示すように実測値とよく適合している。

### 4) 途中閉鎖

215分にパイプを閉鎖させると、それまでほぼ定常であった間隙水圧分布が変化し、閉鎖点で間隙水圧が上昇する。その後、飽和帯は下部の水平地盤部へと拡大する。上部水平地盤部の飽和帯の厚さに若干差が見られるものの、閉鎖点での間隙水圧上昇傾向は、図11(b)に示したように実測値とよく合致する。

以上の結果より、全てのパイプ閉塞条件において実測値と計算値はよく合致したと言える。

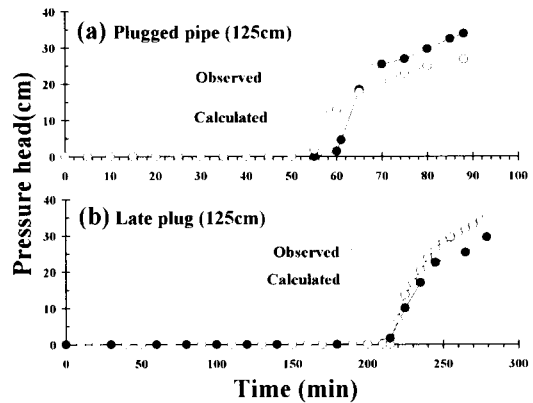


図11 パイプ閉鎖点における圧力水頭の実測値と計算値の対応

Fig.11 Change in simulated and observed pore water pressure by the side of plug

## V. まとめ

本稿では、「水みちの関与しているような崩壊を精度よく予測するには、斜面土層内の水みちを適切にモデル化しなければならない。」との観点から、人工降雨装置と模型斜面を用いた崩壊実験により土中パイプの状態に起因する間隙水圧分布を検討した。その結果、パイプの閉塞条件によって斜面土層内での間隙水圧分布が大きく異なることが解明された。

次に、この間隙水圧分布の上昇を有限要素法による飽和—不飽和浸透流解析によって検討し、模型実験の結果得られた間隙水圧分布と計算結果の適合性について考察した。結果として、パイプを水平方向に非常に大きな透水性をもつ異方性土層に置き換えることで、パイプの閉塞に起因する閉鎖点での間隙水圧の上昇を良好に再現できた。

山地のパイプなどの水みちをこのように扱って浸透解析を行えば、平松ら(1990)、三森ら(1995)が指摘したような崩壊発生時刻の遅れの問題は解消でき、崩壊発生時刻の予測精度が上昇するものと考えられる。

## 引用文献

- 赤井浩一・大西有三・西垣 誠 (1977) 有限要素法による飽和一不飽和浸透流の解析, 土論集 264 : 115-124.
- Brooks, R. H. and Corey, A. T. (1966) Properties of porous media affecting fluid flow, ASCE IR92 : 61-88.
- 平松晋也・水山高久・石川芳治 (1990) 雨水の浸透流下過程を考慮した表層崩壊予測手法に関する研究, 砂防学会誌 43 (1) : 5-15.
- 北原 曜・清水 晃・真島征夫 (1988) 林地緩斜面土層中のパイプフローの特性, 日林誌 70 (7) : 318-323.
- 小杉賢一朗・内田太郎・水山高久 (2001) パイプ流のモデル化と崩壊に与える影響の数値解析, 平成 13 年度砂防学会発表会予稿集 : 240-241.
- 西垣 誠・進上喜英 (1999) 数値計算の理論と実務—浸透流解析—, 地盤工学会関西支部第 41 回実技セミナー資料.
- 水山高久代表 (1994) 山腹斜面のパイプフローが表層崩壊発生に与える影響に関する研究, 文部省科学研究費報告書 33 pp.
- 森脇 寛 (1993) 斜面崩壊に関する実験的研究と今後の課題, 平成 4 年度砂防学会ワークショップ研究成果報告書 崩壊機構の実験的研究の現状と今後の課題 : 1-52.
- Mualem, Y (1976) A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resour. Res. 12 : 513-522.
- 小川紀一郎 (1997) 山地斜面における表土層の構造特性と水分変動過程に関する研究, 北大演研報 54 (1) : 87-141.
- 三森利昭・坪山良夫 (1990) 浸透現象を考慮した斜面安定解析法に関する研究, 砂防学会誌 43 (4) : 14-21.
- 三森利昭 (1995) 軸対称座標を用いた準 3 次元崩壊解析法の研究, 砂防学会誌 48 (2) : 4-11.
- 寺嶋智巳・北原 曜・坂本知己・中井裕一郎・北村兼三 (1996) 谷頭堆積地からの地下水流出に及ぼすパイプの影響, 日林誌 78 (1) : 20-28.
- 谷 誠 (1982) 一次元鉛直浸透流によって生じる水面上昇特性, 日林誌 64 : 409-418.
- 多田泰之・奥村武信・久保田哲也 (2002) パイプの存在が斜面安定に与える影響の実験的検討, 砂防学会誌 55 (3) : 12-20.
- 塚本良則・峰松浩彦・丹下 勲 (1988) 斜面の表層に発達する地中パイプ, 波丘地研究 6 : 268-280.
- 内田太郎・小杉賢一朗・大手信人・水山高久 (1996) パイプ流が斜面安定に与える影響, 水水誌 9 (4) : 330-339.
- Van Genuchten, M. Th. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, J. of Soil. Sci. Soc. Am. (44) : 892-898.
- 矢田部龍一・榎 明潔・八木則男 (1986) 降雨浸透を考慮した斜面安定解析法の検討, 地すべり 22 (4) : 1-7.