

# パイプ流存在下での斜面の安定性に関する 数値実験

## NUMERICAL EXPERIMENTS TO ASSESS THE INFLUENCE OF PIPEFLOW ON SLOPE STABILITY

堤大三<sup>1</sup>・Roy C. Sidle<sup>2</sup>・藤田正治<sup>3</sup>・水山高久<sup>4</sup>  
Daizo TSUTSUMI, Roy C. SIDLE, Masaharu FUJITA and Takahisa Mizuyama

<sup>1</sup>農博 京都大学助手 防災研究所水災害研究部門 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

<sup>2</sup>PhD 京都大学教授 防災研究所地盤災害研究部門 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

<sup>3</sup>正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所水災害研究部門 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

<sup>4</sup>正会員 農博 京都大学教授 農学研究科森林科学専攻 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

Pipeflow is recognized as an important hydrologic control as well as a landslide initiation factor, and the development of a theoretical method to analyze pipeflow process is needed. However, there are few modeling studies of pipeflow, and a general simulation technique for water dynamics in the hillslope scale with soil pipes has not yet been developed. In this study, a general model that describes lateral pipeflow in a hillslope was developed. In the model, matrix flow and pipeflow were calculated by their respective governing equations (Richards' equation and Manning's equation), considering the interaction between these two flow systems. Numerical experiments were conducted to analyze the effect of pipeflow on slope stability. Results indicated that pipe clogging decreases the factor of safety and could be a factor that triggers landslides, and that pipeflow affects the initiation of debris flow after landslides.

**Key Words:** pipeflow, slope stability, Richards' equation, Manning's equation, pipe clogging, debris flow

### 1. はじめに

これまでの水文学的観測から, 均質な土層を仮定した従来の浸透流理論では山地斜面における雨水流出機構を説明できず, 土層内には選択的な水の流れが存在することが示唆されてきた。近年, より詳細な観測により, 数多くの山地斜面においてパイプ (soil pipe) と呼ばれる斜面にほぼ平行な大孔隙の存在が確認され, 山地斜面の雨水流出機構に重大な影響を及ぼすことが明らかにされている<sup>1,2)</sup>。また, 崩壊発生直後の崩壊地の多くにパイプが存在し, 水の流出が観察されることなどから, パイプによる選択流が崩壊発生に関与していることが指摘されている<sup>3)</sup>。さらに, 「降雨時に発生するパイプの閉塞によってパイプ及びその周辺の間隙水圧が上昇することが, 崩壊発生の引金になる。」との仮説も提案されている<sup>2,4)</sup>。

上記の仮説を含め, どのようなメカニズムでパイプ流が斜面崩壊に関与するかを検証するためには, 従来の浸透流計算に加え, パイプ存在下での選択流 (パイプ流) を考慮した計算手法の開発が必要である。これまでのところ, パイプ流についていくつかの計算手法が提案されているが, それらは, パイプ内の水圧を一定と仮定したモデル<sup>5)</sup>や, 観測した流域にのみ適用可能な経験則的なモ

デル<sup>6)</sup>, またはパイプを透水係数の大きな土壌と仮定するモデル<sup>7)</sup>など, 実際の現象と異なる仮定や, 観測に基づく経験則を必要とするものであり, その適用には限界がある。パイプ流と斜面安定の関係を理論的に考察した数少ない研究のひとつとして, 内田・水山<sup>8)</sup>は, Jones and Connelly<sup>9)</sup>のモデルに類似した計算によってパイプの閉塞が斜面の安全率の変化に及ぼす影響を検討し, 上記の仮説<sup>2,4)</sup>を支持する結果を示した。しかし, パイプ流の計算は多くの仮定を含んでおり, パイプ周辺土壌間の水移動やパイプ内の水圧分布等の扱いには, 課題が残されている。

本研究では, パイプ周辺土壌間の水移動を適切に評価し, パイプ内の水圧分布の変化を計算することで, 実際の現象を反映したモデル化を行い, パイプ流に関するより汎用的な計算手法を構築した。この手法を用い, パイプを含む仮想的な斜面に対する降雨浸透と流出過程の数値実験を行うことで, パイプ流が斜面土層の間隙水圧分布の変化とそれに伴う斜面安全率の変化に及ぼす影響について検討し, パイプ流が崩壊発生に関与するメカニズムについて考察した。さらに, 崩壊前後の土砂流動化を念頭に置き, 崩壊後の斜面からの流出量変化についても検討を行った。

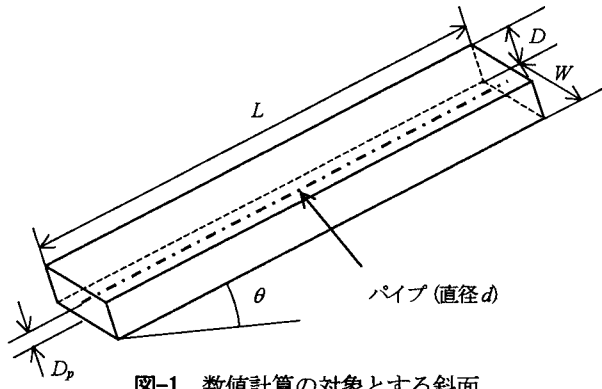


図-1 数値計算の対象とする斜面

## 2. 数値計算の方法

### (1) パイプ流を考慮した浸透流計算

斜面は、最も単純な直方体を仮定し、傾斜角 $\theta (= 30^\circ)$ 、斜面長 $L = 50 \text{ m}$ 、土層厚 $D = 1.0 \text{ m}$ 、斜面幅 $W = 5.0 \text{ m}$ とした。土層底面から $D_p (= 0.2 \text{ m})$ の位置に直径 $d (= 2.5, 5.0, 10.0 \text{ cm})$ 、長さ $L_p$ の円柱形状をしたパイプが、斜面上端から下端まで ( $L_p = L$ ) 連続して存在するものとした (図-1)。

土層内の浸透流は、式(1)に示す Richards 式を有限要素法により計算し求めた。有限要素の分割においてパイプの中心に節点を配置し、パイプを各節点によって分割された「体積を持たない線分」とみなした。

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \{ K(\psi) [\nabla(\psi + z)] \} \quad (1)$$

ここで、 $t$ は時間、 $C(\psi)$ は土壌の比水分容量、 $K(\psi)$ は透水係数、 $\psi$ は圧力水頭、 $z$ は鉛直上向きの座標を表す。パイプ上の節点が不飽和( $\psi < 0$ )の場合、その部位のパイプ流は無いものとみなす。逆に、パイプ上の節点が飽和( $\psi \geq 0$ )の場合、以下に示す2通り (開水路流・管路流) にパイプ流を分類し (図-2)、パイプ周辺土壌間の水移動を考慮し、土壌浸透流およびパイプ流を計算した。

#### a) 開水路流

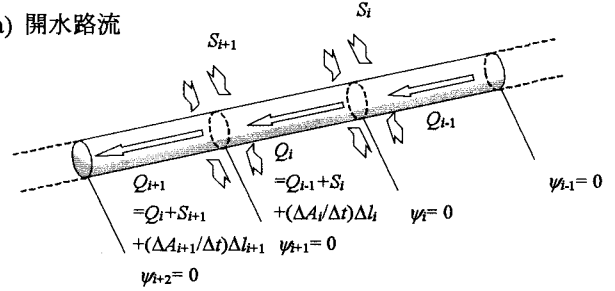
節点 $i$ での圧力水頭値を $\psi_i = 0$ とし (Dirichlet 境界)、パイプに流入 (またはパイプから流出) する水量 $S_i$ を浸透流計算において求めた。節点 $i-1$ から $i$ 間のパイプ流量 $Q_{i-1}$ と $S_i$ は、節点 $i$ から $i+1$ 間のパイプ流量 $Q_i$ と水位の上昇に消費される事から、

$$Q_i = Q_{i-1} + S_i - \frac{(A_i^{(t)} - A_i^{(t-\Delta t)})}{\Delta t} \Delta l \quad (2)$$

ここで、 $A_i^{(t)}$ と $A_i^{(t-\Delta t)}$ は時刻 $t$ と $t-\Delta t$ における節点 $i$ から $i+1$ 間の流水断面積、 $\Delta l$ は節点 $i$ から $i+1$ 間のパイプ長、 $\Delta t$ は時間ステップを表す。また、 $Q_i$ を Manning 式にて表わすと、

$$Q_i = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} A_i^{(t)} \quad (3)$$

#### a) 開水路流



#### b) 管路流

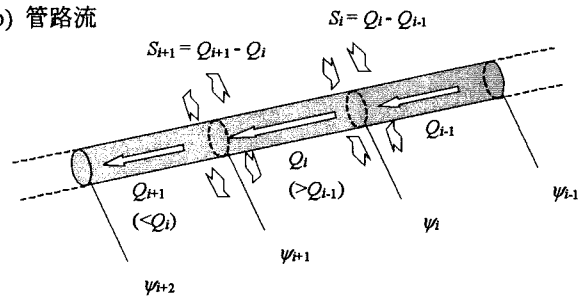


図-2 パイプ流の概念図: a) 開水路流, b) 管路流

ここで、 $n$ は粗度係数、 $R$ は径深、 $I$ はエネルギー勾配 (ここでは、パイプの勾配 $\sin \theta$ )を表す。式(2)と(3)を連立し、パイプ上流から順に、収束計算によって $Q_i$ と $A_i^{(t)}$ を求めた。ただし、 $A_i^{(t)} < 0$ となった場合、節点 $i$ は Dirichlet 境界条件から開放し、パイプ流は無いものとして浸透計算をやり直した。また、 $A_i^{(t)} > A_p$  ( $A_p$ はパイプ断面積) となった場合も、節点 $i$ は Dirichlet 境界条件から開放し、パイプ流を管路流に分類して、浸透計算をやり直した。

#### b) 管路流

Manning 式におけるエネルギー勾配を節点間の水力水頭勾配とし、

$$I = \frac{(\psi_i - \psi_{i+1} + \Delta z)}{\Delta l} \quad (4)$$

式(3)、(4)によって流量 $Q_i$ を計算した。各流量の差をパイプ周辺土壌間における水移動量 $S_i$ と考え、

$$S_i = Q_i - Q_{i-1} \quad (5)$$

として節点 $i$ に与え ( $S_i > 0$ の場合は吸水項;  $S_i < 0$ の場合は湧水項)、浸透計算を行った。その結果、各節点の圧力水頭 $\psi$ は初めの仮定から変化するため、新たな $\psi$ を用いて流量計算を行った。この計算を全節点の $\psi$ が一定値に収束するまで繰り返した。ただし、計算の過程で $\psi_i < 0$ となった場合は、節点 $i$ を Dirichlet 境界条件 ( $\psi_i = 0$ ) とし、開水路流に分類して、計算をやり直した。

北原の研究<sup>9)</sup>によると、実際のパイプ (径 $0.96 \sim 3.1 \text{ cm}$ ) を用いた実験において、パイプ流-エネルギー勾配の関係は Darcy-Weisbach 式に良く適合し、流速を Manning 式で表現できる事が確認されている。また、その場合の粗度係数 $n$ は、 $0.036 \sim 1.36$ の値を持つ事が示されており、本研究では粗度係数 $n = 0.1$ を一定値として与えた。

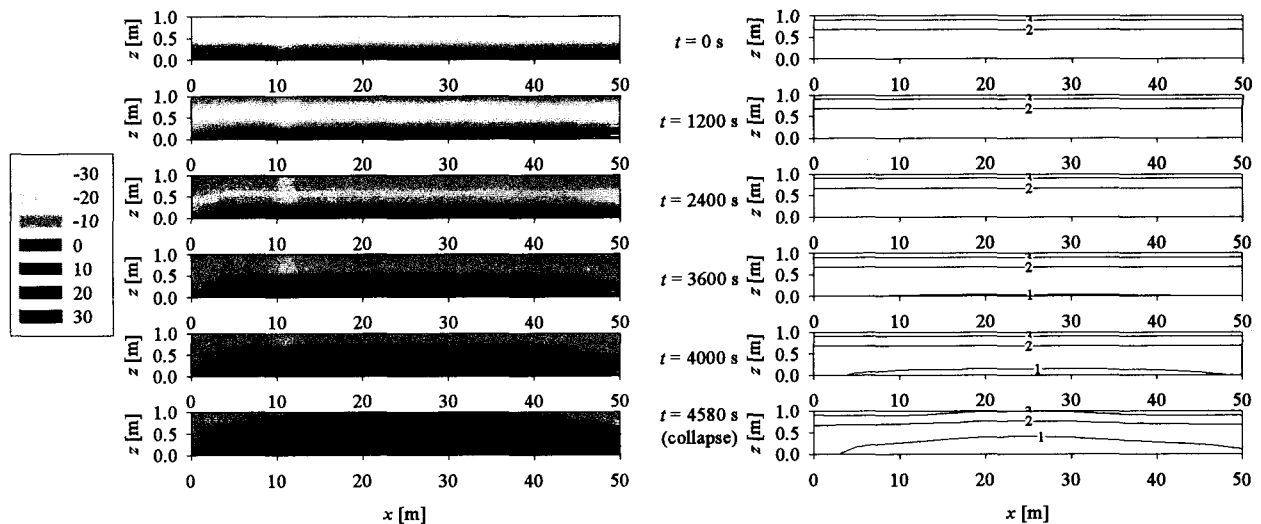


図-3 パイプが無い場合 (Case1) の斜面土層内の圧力水頭 $\psi$ [cm]分布 (左) と安全率 $F$  (右) の変化

なお、ここに示した手法により、既往の室内実験<sup>10)</sup>を再現計算することで計算手法の検証を行い、その有効性を確認している。

## (2) 斜面安定計算

2次元簡易ビショッブ法により、式(6)を用いて斜面安定率 $F_s$ を計算した。すべり面は土層底面と接触する円弧を仮定、すべり土塊を10スライスに分割し、斜面縦断方向の位置および円弧半径を変化させて、最小となる安全率 $F_s$ を求めた。

$$F_s = \frac{\sum \frac{cb + (w - ub) \tan \phi}{(1 + \tan \phi \tan \alpha / F_s) \cos \alpha}}{\sum w \sin \alpha} \quad (6)$$

ここで、 $c$ は粘着力、 $\phi$ は内部摩擦角、 $w$ は土塊の自重、 $u$ はスライス底面に作用する平均間隙水圧、 $\alpha$ は各スライスのすべり面と水平面のなす角、 $b$ はスライス幅である。既往の研究<sup>8)</sup>を参照し、 $c = 35 \text{ gf/cm}^2$ 、 $\phi = 25^\circ$ 、土塊の比重は、飽和の値を想定し $2.0 \text{ g/cm}^3$ 一定値とした。土塊に作用する間隙水圧 $u$ は、浸透流計算において得られた圧力水頭を斜面横断方向に平均することで求めた。このため、斜面幅 $W$ が安全率に影響する事になる。3次元で計算される間隙水圧分布を用いて2次元の斜面安定解析を行うことには上記の矛盾を伴うが、これまで行われた崩壊跡地の観察結果のまとめによると<sup>8)</sup>、パイプの存在が確認された崩壊地の崩壊面幅は5~20 mであることから、斜面幅 $W = 5 \text{ m}$ は妥当な値であるか安全側に評価していると言える。また、側面のせん断抵抗力を無視していることから、概ね安全側に評価した解析となっている。

## (3) 数値実験の条件

浸透計算の初期条件として、土層底面から斜面垂直方向に0.175 mに地下水面を与えた。境界条件としては、

表-1 数値実験の条件

|       | パイプ条件            | 閉塞(開放)時刻 [s] |
|-------|------------------|--------------|
| Case1 | パイプなし            | —            |
| Case2 | パイプ閉塞なし          | —            |
| Case3 | パイプ下流端(0-10m)閉塞  | 0            |
| Case4 | パイプ下流端(0-10m)閉塞  | 3600         |
| Case5 | パイプ中間部(20-30m)閉塞 | 0            |
| Case6 | パイプ中間部(20-30m)閉塞 | 3600         |
| Case7 | パイプ閉塞部(0-10m)開放  | 3600         |

最も単純な条件を想定し、土層表面には $50 \text{ mm/hr}$ の降雨を与え、土層下流端は大気開放条件とし、それ以外の境界(土層上流端、底面、側面)は全てno-flux境界条件とした。式(1)の $C(\psi)$ と $K(\psi)$ には、lognormalモデル<sup>11)</sup>を採用し、森林土壌の平均的なパラメーター( $K_s = 0.00537 \text{ cm/s}$ 、 $\theta_s = 0.398$ 、 $\theta_r = 0.645$ 、 $\psi_m = -43.9 \text{ cm}$ 、 $\sigma = 1.19$ )を用いた。

数値実験は、表-1に示す7通りの条件で、異なる3種類のパイプ直径 $d$  (2.5, 5.0, 10.0 cm) についてそれぞれ行った。

## 3. 数値実験の結果と考察

### (1) 土壌の圧力水頭分布および安全率分布の変化

降雨中、何らかの原因(水流によるパイプ壁面の侵食土砂等)でパイプが閉塞し、その部分の間隙水圧が上昇することで斜面安定性が低下するとの仮説を検証するため、パイプが無い場合 (Case1) と途中でパイプが閉塞する場合 (Case4,  $d = 5.0 \text{ cm}$ ) の圧力水頭分布の斜面横断方向平均値の変化と、それに伴う安全率 $F$ (=抵抗力/滑動力)分布変化を図-3, 4にそれぞれ示す(ここでの安全率とは別に、先に示した簡易ビショッブ法による安全率 $F_s$ も同時に計算し崩壊の判定を行っている)。斜面は傾斜角 $\theta = 30^\circ$ であるが、図-3, 4では水平に表示している。

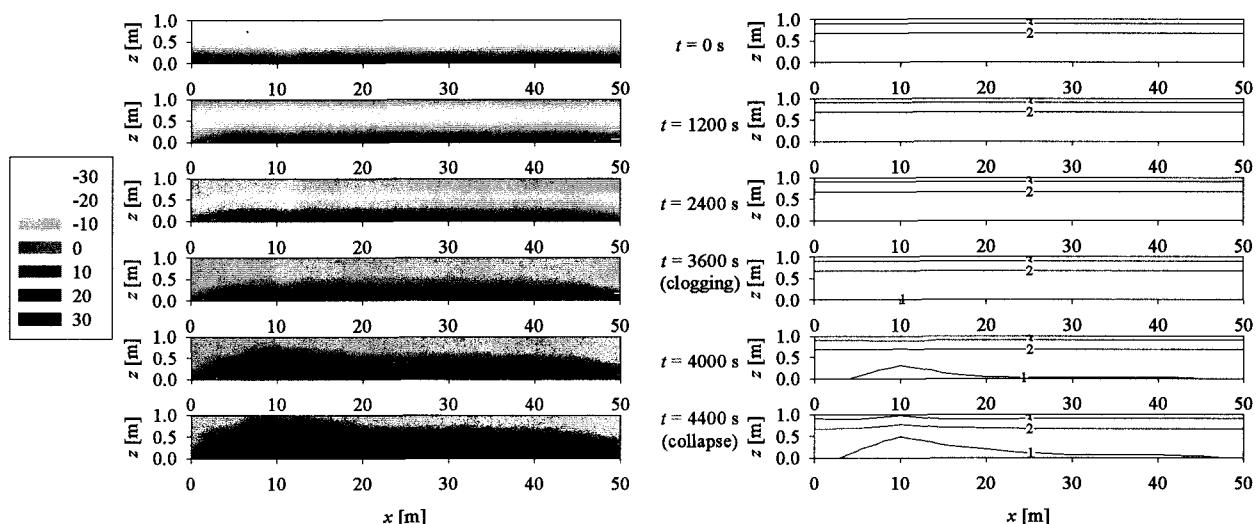


図-4 降雨中のパイプ閉塞 (Case4,  $d = 5.0\text{cm}$ ) に伴う斜面土層内の圧力水頭 $\psi[\text{cm}]$ 分布 (左) と安全率 $F$  (右) の変化

パイプが無い場合 (図-3), 土層表面から降雨が徐々に浸透し, 斜面全体が比較的均等に湿潤状態になった.  $t = 3600\text{ s}$  以降, 地下水面の上昇が顕著になり, それに伴って斜面内の安全率が低下し, 最終的に簡易ビショップ法により計算された安全率が  $F_s < 1.0$  となり, 斜面崩壊が発生した ( $t = 4580\text{ s}$ ).

パイプが途中で閉塞する場合 (図-4) もパイプが無い場合と同様, 初期段階では土層表面から降雨が徐々に浸透し, 斜面全体が比較的均等に湿潤状態になった ( $t = 0 \sim 3600\text{ s}$ ). ただし, 地下水面の上昇は少し遅れており ( $t = 3600\text{ s}$ ), パイプ流による排水機能が働いている事が判る. パイプの閉塞後 ( $t = 3600\text{ s} \sim$ ), それまでパイプを流れていた水が出口を失ったことで, 閉塞部の直上流部の圧力水頭が急激に上昇し, それに伴って安全率が低下した. その結果, パイプ閉塞から  $800\text{ s}$  後に  $F_s < 1.0$  となり, 斜面崩壊が発生した ( $t = 4400\text{ s}$ ). この場合, 圧力水頭の高い領域 (安全率の低い領域) は, パイプが無い場合は斜面全体に及んでいるのに対し, パイプが途中で閉塞する場合は, パイプ閉塞部の直上流部に集中している. この様に, ある条件のもとで, パイプ流は土層中の水を排水し地下水面の上昇を抑制するが, パイプの閉塞は急激な間隙水圧の上昇を引き起こし, 斜面崩壊発生時の引金となる事が確認された.

## (2) 崩壊時刻・位置・規模へのパイプ流の影響

全ての数値実験について, 崩壊発生の時刻 (表-2) を比較する. ここでは, 崩壊発生時刻が早ければ崩壊発生までの降水量が少なく, より規模の小さい降雨でも崩壊するとの観点から, 斜面崩壊の危険度が高いと考える. パイプの存在しない斜面 (Case1) に対して, パイプが存在しかつ閉塞しない斜面 (Case2) では, 崩壊発生時刻が遅れる傾向が見られた. 特に  $d = 10.0\text{ cm}$  の場合, 計算時間  $7200\text{ s}$  の間に崩壊は発生せず, パイプの排水機能が土

表-2 崩壊 ( $F_s = 1.0$ ) のタイミング

| 崩壊発生時刻 (Case1 との差) [s] |            |             |                   |
|------------------------|------------|-------------|-------------------|
| Case1                  | 4580 (—)   |             |                   |
| $d [\text{cm}]$        | 2.5        | 5.0         | 10.0              |
| Case2                  | 4640 (+60) | 5060 (+480) | 崩壊せず <sup>a</sup> |
| Case3                  | 4500 (-80) | 4180 (-400) | 4060 (-520)       |
| Case4                  | 4580 (0)   | 4400 (-180) | 4280 (-300)       |
| Case5                  | 4540 (-40) | 4380 (-200) | 4340 (-240)       |
| Case6                  | 4620 (+40) | 4560 (-20)  | 4540 (-40)        |
| Case7                  | 4560 (-20) | 4800 (+220) | 崩壊せず <sup>a</sup> |

層内の間隙水圧を減少させ, 斜面を安定化することを示している. 初めからパイプが閉塞している場合 (Case3, 5) と, 降雨途中で閉塞する場合 (Case4, 6) では, 初めから閉塞している場合の方が崩壊発生時刻は早く, 降雨途中で閉塞することが重要なのではなく, 出口の無いパイプおよび不連続なパイプなどの構造自体が斜面を不安定にしている要因である事を示している. 数値計算の過程で, パイプが初めから閉塞している場合でも, パイプ径  $d \geq 5.0\text{ cm}$  の多くの部分で, 水はパイプ中を開水路流として流れ, 周りの土層中の浸透流よりも早く下流に輸送され, 閉塞部でパイプから土層へ逆流する事によって圧力水頭が上昇していることが確認された. パイプの閉塞が下流端の場合 (Case3, 4) と斜面中間部 (Case5, 6) の場合とでは, 閉塞部より上流が長い (集水域の大きい) 下流部閉塞の方が, より崩壊時刻が早まり危険である事が示されている. なお, 上記の全ての傾向はパイプ径が大きくなるほど顕著になり, 逆に  $d = 2.5\text{ cm}$  の場合は, どの Case においてもパイプが無い場合 (Case1) と比較してそれほど大きな差は見られない.  $d = 2.5\text{ cm}$  の場合, パイプ流は早い段階で管路流となることが確認されており, 排水能力が小さい事がうかがえる. パイプ径が大きく, 排水能力の高い場合ほど斜面安定化に対する寄与は大きい,

表-3 崩壊中心までの斜面下端からの距離と崩壊長

| 距離 (崩壊長) [m] |             |             |             |
|--------------|-------------|-------------|-------------|
| Case1        | 22.4 (18.2) |             |             |
| $d$ [cm]     | 2.5         | 5.0         | 10.0        |
| Case2        | 19.0 (18.2) | 14.6 (18.2) | —           |
| Case3        | 12.6 (16.5) | 10.0 (11.0) | 10.0 (11.0) |
| Case4        | 14.0 (17.0) | 10.0 (11.0) | 10.0 (11.0) |
| Case5        | 27.0 (17.0) | 26.0 (11.3) | 26.0 (11.3) |
| Case6        | 25.1 (18.2) | 26.0 (11.3) | 26.0 (11.3) |
| Case7        | 15.3 (16.7) | 10.3 (18.2) | —           |

それが閉塞している場合は、逆に斜面を不安定にする危険性も大きいと言える。

崩壊発生位置 (斜面下端から崩壊中心までの距離) および崩壊長さ (表-3) について比較すると、パイプが閉塞している場合 (Case3~6) 閉塞部の直上流部 (Case3, 4) か、閉塞部 (Case5, 6) での崩壊発生が顕著に見られる。これは、図-4 に示した様に、閉塞部の直上流部で間隙水圧が上昇する事によりその位置での安全率が低下する現象と良く適合している。パイプ径  $d \geq 5.0$  cm で閉塞がある場合、崩壊長は短くなる傾向が見られる。パイプが無い場合 (Case1) およびパイプがあっても閉塞していない場合 (Case2)、間隙水圧は斜面全体で比較的均等に上昇するのに対し、閉塞がある場合は図-4 に示したように、閉塞部の近傍で局所的に間隙水圧が上昇するため、より小さい円弧をすべり面に持つ場合の安全率が最小となるためと考えられる。ただし、二次的な崩壊や崩土の流動化などを考えると、パイプ閉塞を原因とする崩壊の規模が必ず小さくなると断言する事はできない。また、この場合も  $d=2.5$  cm において、上記の傾向は顕著ではなく、パイプ流による影響は小さいと言える。

### (3) 土層浸透流量・パイプ流量の変化

崩壊土の土石流化を考える時、斜面崩壊までの過程だけでなく、崩壊後の斜面から崩壊土に供給される水量の変化について検討する事も重要な課題である。本研究では、斜面崩壊後の過程においても、表-3 に示した崩壊中心位置を斜面下流端とし、そこから上流部の斜面を対象に数値計算を継続し、土層浸透流とパイプ流ならびに表面流による流出量変化を、崩壊以前から崩壊後の過程まで連続して求めた。 $d=5.0$  cm の場合を例に、Case1, 2, 3, 7 の結果を示し考察する。

パイプが無い場合 (図-5a)、崩壊と同時に崩壊面が大気に開放された事で土層浸透による流出量が急増し、その後逡減している。また、崩壊時には表面流による流出量が急増しており、地下水面が地表面に到達した事を示している。崩壊後の流出量としては、表面流による寄与が大きい。パイプの閉塞が無い場合 (図-5b)、土層浸透による流出量はパイプが無い場合と同程度であるが、そ

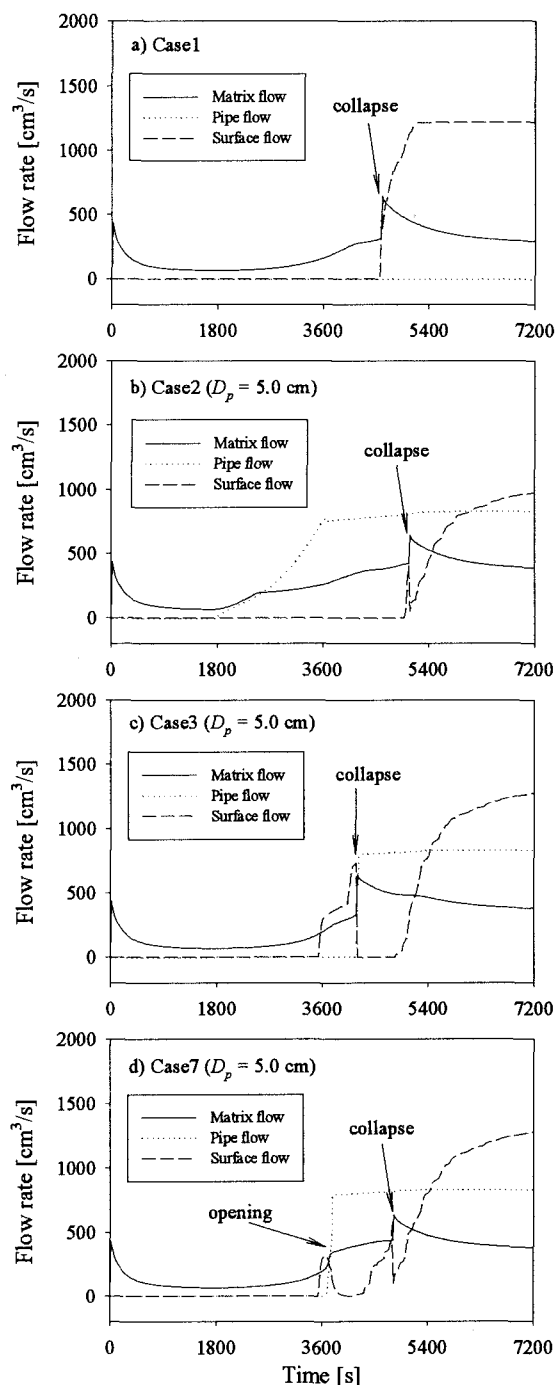


図-5 流出量 (パイプ流, 浸透流, 表面流) の変化

れを上回る量のパイプ流出が見られ、パイプによる排水機能が働いている事が判る。 $t=3500$  s のあたりで、パイプ流量の増加が止まるが、これはパイプ下流端部のパイプ流が、開水路流から管路流になった事を表しており、その後はほぼ一定値の排水量を保っている。崩壊直後の流出量への寄与は、パイプ流によるものが大きい。その後徐々に表面流も増加した。パイプ下流端部が初めから閉塞している場合 (図-5c)、局所的な地下水位の上昇により早い時期から表面流が発生しているが、すぐには崩壊していない。崩壊後、パイプの閉塞部がなくなるため急激にパイプ流による流出が発生している。また、局所的に地下水位が上昇していた部分が崩壊したため、崩

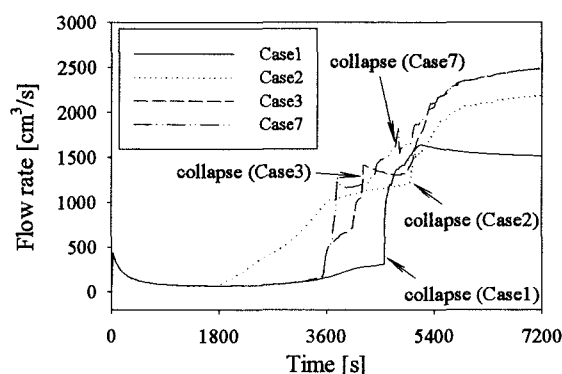


図-6 総流出量の変化 ( $d = 5.0\text{cm}$ )

壊時に一旦表面流が消失し、その後再び発生している。崩壊直後の流出量への寄与は、パイプ流によるものが多い。閉塞していたパイプ下流端部が途中で開放される場合 (図-5d)、閉塞部の開放によりパイプ流による流出が発生し、それ以前に発生していた表面流が一旦消失する。その後再び表面流が発生し崩壊するが、崩壊後は、閉塞が無い場合 (図-5b) に近い挙動を示す。

総流出量を比較すると (図-6)、パイプが無い場合 (Case1)、崩壊前は流出量が少なく土層に保持されていた水が、崩壊と同時に流出し、急激な流出量の増加をまねいている。パイプが閉塞しない場合 (Case2)、早い段階からの流出量増加が見られ、崩壊後の流出量増加も比較的緩やかである。パイプ下流端部が初めから閉塞している場合 (Case3)、崩壊後に一旦流出量の減少が見られるが、これは先に示した表面流の消失によるものである。閉塞していたパイプ下流端部が途中で開放される場合 (Case7)、パイプ開放時に流出量の急増を示した後、複雑な挙動を示すが、崩壊時の流出量はここに示した4Caseの中で最も多い。

崩壊後には、崩壊位置の違いによる降雨流入量の差が生じるため、単純に比較することはできないが、ここに示したように、崩壊前後の流出量の挙動にそれぞれ特徴があり、崩壊土に供給される水量がパイプの有無やパイプの閉塞条件によってそれぞれ異なる事が示された。このため、パイプ流は斜面の安定性に影響するだけでなく、崩壊後の土塊の流動化にも大きく影響するものと考えられ、今後さらに検討する必要がある。

#### 4. おわりに

本研究では、パイプー土壌間の水移動を適切に評価したモデルにより、パイプが存在する斜面土壌中の水移動についての計算手法を構築した。この手法を用いて最も単純な斜面・境界条件を想定して斜面安定性に関する数値実験を行い、以下の事を明らかにした。

(1) 降雨途中でパイプが閉塞し、その部分の間隙水圧が上昇することで斜面安定性が低下する現象が、数値計算上再現され、ある条件下ではその仮説が正しいことが裏

付けられた。

(2) パイプの閉塞による崩壊は、閉塞部の直上流部で起こる可能性が高い。また、排水能力の大きいパイプは、土層の間隙水圧上昇を抑制し安定化に寄与するが、それが閉塞している場合は、局所的な間隙水圧上昇が大きく、逆に危険である。

(3) 崩壊前後の流出量の挙動はパイプの有無やパイプの閉塞条件によって異なり、崩壊後の土砂の流動化にも異なる影響を及ぼす事が予想され、更なる検討を必要とする。

謝辞：この研究の遂行にあたり、京都大学農学研究科助手小杉賢一朗氏、同大学防災研究所助教授釜井俊孝氏、国土技術政策総合研究所研究官内田太郎氏には、有益な意見、指導を頂いた。ここに記して、謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) Sidle R.C., Tuboyama Y., Noguchi S., Hosoda I., Fujieda M. and Shimizu T.: Stormflow generation in steep forested headwaters: a linked hydrogeomorphic paradigm, *Hydrological Processes*, Vol. 14, pp. 369-385, 2000.
- 2) Tsukamoto Y., Ohota T. and Noguchi H.: Hydrological and geomorphological studies of debris slides on forested hillslopes in Japan, *International Association of Hydrological Sciences Publication*, Vol. 137, pp. 89-98, 1982.
- 3) Pierson T.C.: Soil pipes and slope stability, *Quaternary Journal of Engineering Geology*, Vol. 16, pp. 1-11, 1983.
- 4) 水山高久：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，文部省科研費報告書，pp. 1-33, 1994.
- 5) Nieber J.L. and Warner G.S.: Soil pipe contribution to steady subsurface stormflow, *Hydrological Processes*, Vol. 5, pp. 329-344, 1991.
- 6) Jones J.A.A. and Connelly L.J.: A semi-distributed simulation model for natural pipeflow, *Journal of Hydrology*, Vol. 262, pp. 28-49, 2002.
- 7) 渡辺邦夫，今井久：水みちを持つ斜面内の非定常地下水流れの性質，応用地質，Vol. 25, pp. 1-8, 1984.
- 8) 内田太郎，水山高久：パイプ流が斜面の安全率の変化に及ぼす影響に関する数値計算を用いた考察，砂防学会誌，Vol. 55, pp. 14-23, 2002.
- 9) 北原曜：森林土壌におけるパイプ流の特性，水文・水資源学会誌，Vol. 5, No. 1, pp. 15-25, 1992.
- 10) Sidle R.C., Kitahara H., Terajima T. and Nakai Y.: Experimental studies on the effects of pipeflow on throughflow partitioning, *Journal of Hydrology*, Vol. 165, pp. 207-219, 1995.
- 11) Kosugi, K.: Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, *Water Resources Research*, Vol. 32, pp. 2697-2703, 1996.

(2003.9.30 受付)