

## パイプ流が降雨流出過程と斜面安定性に及ぼす影響に関する実験とモデル化

京都大学防災研究所 正会員 ○堤大三  
 京都大学防災研究所 正会員 藤田正治  
 京都大学大学院工学研究科 宮崎俊彦

## 1. はじめに

近年, 詳細な水文学的観測により, 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, 山地斜面の降雨流出過程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, 崩壊発生直後の斜面でパイプからの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可能性も指摘されている<sup>3)</sup>. しかし, パイプ流が降雨流出過程や斜面崩壊に影響する機構は, これまでのところ完全には解明されていない. 本研究では, パイプを含む人工斜面からの降雨流出と斜面安定性を調査する実験を行うと共に, 斜面土層内でのパイプ流のモデル化を行い, 山地斜面におけるパイプ流の降雨流出過程と斜面安定性に対する影響について検討した.

## 2. 実験方法

実験は, 京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーにて2003年12月に行った. 水路に, 土壌(6号珪砂,  $K_s = 0.022$  cm/s)を充填し土層(斜面長500 cm, 幅50 cm, 土層深35 cm, 傾斜角 $20^\circ$ )を作成した. 土層下流端は, 不織布で固定して大気開放条件とし, 土層表面には人工降雨装置を用いて降雨を与えた. その他の境界は, 不透水境界条件とした. ステンレスメッシュを円筒形に形成し, 不織布を巻いたものを人工パイプ(外径2.57 cm, 粗度係数 $n = 0.025$ )として土層に埋設した(斜面横断方向の中心, 底面から2.5 cm). 実験開始から82 mm/hrの人工降雨を与え, 下流端からの浸出量(マトリックス流)とパイプからの流出量(パイプ流)を1, 2分間隔で測定した. また, 土層底面における圧力水頭の変化を, テンシオメータを用いて1分間隔で測定した(計10ヶ所). 実験は, パイプ埋設の条件を変え(Run 1; パイプなし, Run 2; 斜面全長にパイプあり, Run 3; 斜面上流端から4 mまでパイプあり)計3回行った.

## 3. モデル

土層内の浸透流は 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, パイプを節点により分割し, 各パイプを「体積を持たない線分」とみなした. パイプ上の節点が不飽和(間隙水圧 $\psi < 0$ )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, パイプ流を開水路流( $\psi =$

0)と管路流( $\psi > 0$ )に分類, パイプ-周辺土壌間の水移動を考慮し, 土層浸透流およびパイプ流を計算した.

## 2.1 開水路流

節点 $i$ (上流から $i = 1, 2, 3, \dots$ )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 $S_i$ の和は, 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,

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

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,

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

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(1)と(2)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.

## 2.2 管路流

式(2)におけるエネルギー勾配 $I$ を節点間の水理水頭勾配とし,

$$I = \frac{(\psi_i - \psi_{i+1} + \Delta z)}{\Delta l} \quad (3)$$

式(2), (3)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,

$$S_i = Q_i - Q_{i-1} \quad (4)$$

として節点 $i$ に与え(Neumann 境界;  $S_i > 0$ 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.

キーワード: パイプ流, 降雨流出過程, 斜面安定性, 浸透流計算, 斜面崩壊, モデル化

〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所 電話: 0774-38-4122, FAX: 0774-32-6039

#### 4. 結果

図-1に、マトリクス流量とパイプ流量の時間変化の実測値および計算値を示す。実験において、初期の流量変化はどのRunも類似しており、一定の割合で増加した。その後、約50 minから流量の急増が起こった。間隙水圧の計測から、この時点で地下水面が形成され始めたことが確認された。Run 2では、この流量の急増がパイプ流の増加でまかなわれ、マトリクス流はほぼ一定値となった。Run 1, 3では、それぞれ65, 60 minに表面流が発生、続いて表層の流動が起こった（図-2）。Run 2では、表面流および表層の流動化は観察されなかった。

従来の浸透流計算であるRun 1の計算値は、実測値とよく一致している。Run 2, 3でも、実測値と計算値は比較的よく一致している。特にRun 2において、パイプ流の発生時刻に数分の遅れはあるものの、その流量変化は定量的に再現できている（図-1）。土層底面での圧力水頭 $\psi$ の変化についても、実測値と計算値はよく一致した。

図-3, 4に、シミュレーションにより得られた、降雨終了時の $x$ - $z$ 断面での圧力水頭 $\psi$ 分布と、その結果より計算した土層内の安全率 $F_s$  [-]分布をそれぞれ示す（ $c = 0$   $\text{gf/cm}^2$ ,  $\phi = 25^\circ$ と仮定）。Run 2では、パイプの排水効果により、Run 1と比較して圧力水頭の上昇は小さく、地下水面がちょうどパイプの位置で安定した。Run 3では、パイプ下流端部で、局所的な圧力水頭の上昇が起こった。Run 1, 3で、地下水面が地表面に達しており（Run 1:  $x = 1.0 \sim 2.5$  m, Run 3:  $x = 1.0 \sim 1.5$  m）、実験において表面流が発生した観測結果（発生位置, Run 1:  $x = 1.7$  m, Run 3:  $x = 1.0$  m）と、一致している。Run 1, 3では、安全率 $F_s$ の小さい領域が地表面に到達し、実験終了時に記録した斜面の断面形状（図-3中の破線）と、よい対応を示している。

#### 5. おわりに

パイプは、その排水能力によって斜面を安定化させるが、出口が土層中にある場合は、局所的な圧力水頭の上昇を引き起こし、パイプのない場合と比べても、斜面を不安定にすることが確認された。新たに開発した計算手法は、実験結果をよく再現しており、この手法の妥当性が確認された。今後、実斜面での降雨流出解析や表層崩壊発生予測にこの計算手法を活用できると考えられる。

#### 引用文献

- 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., Ohta 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

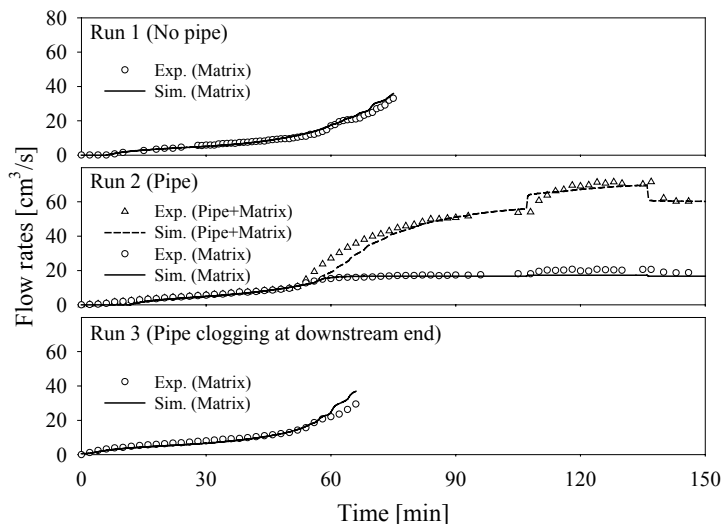


図-1 流量の実験結果とシミュレーション結果の比較



図-2 表層の流動化の様子 (Run 3)

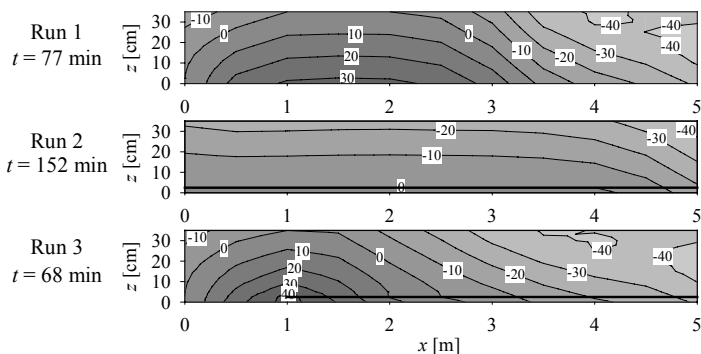


図-3  $x$ - $z$ 断面の圧力水頭 $\psi$  [cm]分布のシミュレーション結果

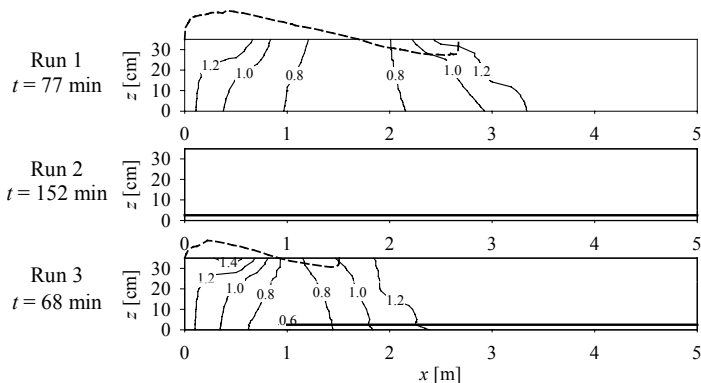


図-4  $x$ - $z$ 断面の安全率 $F_s$ 分布のシミュレーション結果と流動後の最終斜面形状（破線）の対比