

斜面土層内のパイプによる選択流のモデル化

堤大三・Roy C. SIDLE・藤田正治・小杉賢一朗*

* 京都大学大学院農学研究科

要 旨

斜面土層中のパイプによる選択流についての汎用的な 3 次元シミュレーションモデルを構築した。モデルにおいて、土層浸透流とパイプ流を個別の系とみなし、各系間の水移動を考慮した上で、それぞれの支配方程式 (Richards 式, Manning 式) を用いて計算した。また、パイプ内の水流を開水路流・管路流に分類し、土層からパイプへの浸透だけでなく、パイプから土層への逆流も考慮した。既往の論文に発表されている小規模水路実験を対象にモデルシミュレーションを行なった結果、土層内の間隙水圧分布と下流端からの土層浸透流量・パイプ流量ともに、良好な対応が得られた。特に、これらの値が土層内に配置された粗度係数が大きいパイプの配置に依存することが、モデル計算から確認された。

キーワード：パイプ，パイプ流，土層浸透流，Richards 式，Manning 式

1. はじめに

これまでの研究により、山地斜面の土層中には選択流路となるパイプ・ネットワークの存在が明らかとなってきている (例えば, Tsuboyama et al., 1994; Sidle et al., 2001)。これらのネットワークは、雨水浸透流の迅速化や (Sidle et al., 1995a, 2000; 北原, 1994; Mosely, 1982; Tsukamoto and Ohta, 1988), 土層内侵食 (Jones, 1987; Onda, 1994; Bryan and Jones, 1997; Terajima, 1997; Uchida et al., 1999) 等に大きく寄与していると言われている。そのため、斜面土層内の選択流は、水文学的また地形学的に重要な要素であると認識されてきており、選択流の理論的解析手法の開発が望まれている。しかしながら、斜面土層内の選択流モデル化についてはあまり研究が進んでおらず、斜面スケールでの選択流路を含んだ土層浸透流の汎用的シミュレーション技術は、今のところ開発されていない。

初期のモデル (Gilman and Newson, 1980; McCaig, 1983) は、水理学的手法によりパイプ中の水輸送を定量的計算するもので、Gilman and Newson (1980) は、人工降雨実験のデータを用いて土層内の水流に関する係数を計算すること行っており、McCaig (1983) は、簡略化のためのいくつかの仮定 (パイプ流量が下流に向かって比例的に増加する、パイプ内の水位は常に直径

の半分、粗度係数はパイプの半径に反比例する) を用い Manning 式からパイプ流を計算している。その後、Barcelo and Nieber (1981, 1982) は、パイプもしくはパイプ・ネットワークの存在を考慮した 2 次元浸透流計算手法を提案しているが、土層からパイプへの浸透流量の計算においてパイプ内の水圧を一定と仮定している。また、Nieber and Warner (1991) は、Barcelo and Nieber (1981, 1982) のモデルを 3 次元に拡張しているが、やはりパイプ内の水圧を一定と仮定し、土層全体を飽和とみなす簡略化を行なっている。最近、Jones and Connelly (2002) は、パイプ流の起源をいくつかに分類し、観測された水文データから経験式を導き出す方法を提案しており、その中でパイプ流を開水路とみなし、パイプ内の水深は観測値を用いている。

ここに示したように、Jones and Connelly (2002) のモデルを除くすべてのモデルは、パイプ流の状態が開水路流か管路流かに関わらず、パイプ中の水深を一定値、すなわちパイプ中の水圧を一定と仮定している。しかし、実際のパイプ流は、上流からの流量、周辺土層からの浸透量と、パイプ径、壁面の摩擦抵抗、勾配等によって決まるパイプの水輸送能力に依存して状態は変化する。パイプ流量が (開水路流を仮定した場合の) 水輸送能力の限界値を超えた場合、パイプは満水状態となり、パイプ流下方向に水圧分布が生じる。こ

の場合、パイプ流量と周辺土層からの浸透流量は、パイプ内の水圧に依存して変化するため、周辺土層からの浸透流量だけでパイプ流量が決まるわけではない。この意味で、既往の全てのモデルは、パイプ内の水圧を一定値と仮定していることから、満水が満水でないかに関わらず、開水路流のみを考慮している。パイプ内の水位を測定値から決定している Jones and Connelly (2002) のモデルにおいても、開水路流のみを考慮していることに、変わりはない。

実際に見られるパイプの径は、地域の気候、植生、土質、パイプの成因等によって、大きく異なることが報告されており (Beven and Germann, 1982; Noguchi et al., 1997), 数 cm 程度の小径パイプは容易に満水状態となり、パイプ流を開水路流とみなせなくなる。また、パイプの出口が水面より下に位置する場合は、出口近傍のパイプは管路流となっている。さらに、パイプ出口が土層内にある場合や、パイプ壁面の粗度係数が極端に大きい場合は、パイプ末端部もしくは粗度係数の大きい部位では、管路流となると考えられる。このような状態は、いくつかの実験的研究において確認されており (内田ら, 1995; Sidle et al., 1995b)。特に、パイプ出口が土層内にある場合は、パイプが無い場合と比較して、パイプ出口での間隙水圧が上昇し、そこから土層への水の逆流が起こることが確認されている (内田ら, 1995)。いくつかの観測に基づく研究において、このようなパイプから土層への逆流による間隙水圧の上昇が、表層崩壊の引き金になると考えられている (太田ら, 1981; Pierson, 1983; Sidle et al., 2000)。

以上の問題点をふまえ、本研究においては、斜面土層内のパイプによる選択流について、開水路流および管路流に分類し、さらに、周辺土層からパイプへの浸透だけでなく、パイプから周辺土層への逆流も考慮し

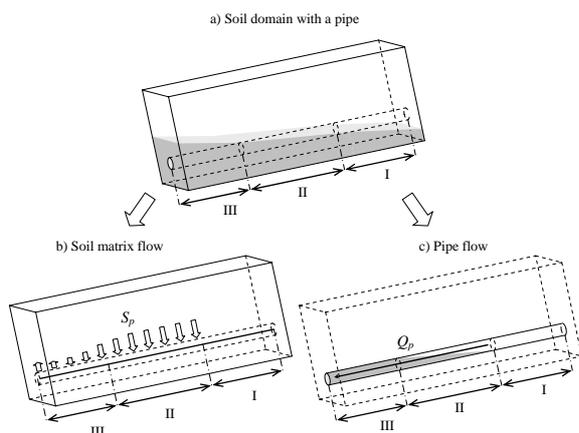


Fig. 1 The general concept of the model: a) the actual condition of the soil domain with a finite size pipe, b) soil matrix flow, and c) pipe flow. Figure 2b and c represent the model abstraction for matrix flow and pipeflow.

たモデル化を行なった。このモデルを用いて、既往の小規模水路を用いた実験 (Sidle et al., 1995b) をシミュレートし、その適合性を検証した。

2. モデル

2.1 モデルの概要

土層浸透流とパイプ流は、土層からパイプへの浸透または、パイプから土層への逆流を考慮した上で、それぞれの支配方程式によって計算される。パイプ流は、(I) パイプ流なし、(II) 開水路流、(III) 管路流、の3種類に分類される (Fig. 1)。Fig. 1a において、パイプ流の分類を明確にするため、地下水面形を示したが、必ずしも地下水面とパイプ内での水位が一致する必要はない。

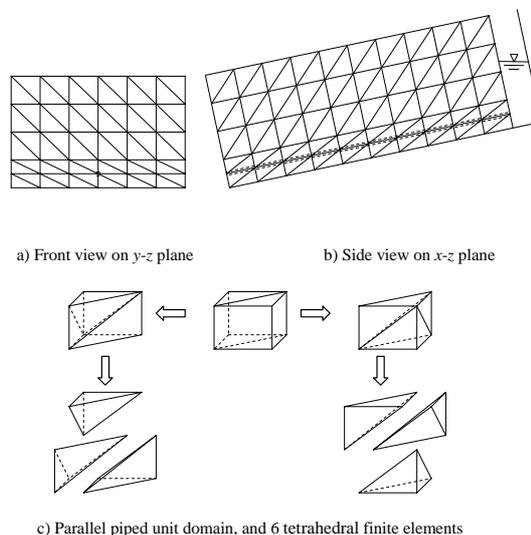


Fig. 2 The soil domain divided by the finite element grid, a) front view on the y-z plane, b) side view on the x-z plane, and c) 6 tetrahedral finite elements derived from a parallelepiped unit domain. The pipe is indicated by a) a circle and b) dashed line. The arrow in b) indicates the one-dimensional coordinate l [m] along the pipe.

2.2 土層浸透流

Richards 式を有限要素法 (Zienkiewicz, 1971; Istone, 1989) を用いて数値計算することで、3次元土層浸透流を求めた。Barcelo and Nieber (1981) の手法に従い、パイプを体積のない線とみなし、有限要素法に用いるグリッドの節点上に配置した (Fig. 1b)。この手法により、有限要素による分割を簡略化することができ、複雑な選択流解析にも対応できる。浸透流計算に必要な土壌水分容量 $C(\psi)$ と透水係数 $K(\psi)$ は、対数正規分布モデル (Kosugi, 1996) により推定した。対数正規分布モデル中のパラメータは、水路実験に用いられた砂

質土に類似した豊浦標準砂のパラメータを用い ($\theta_s = 0.368 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $\theta_r = 0.044 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $\psi_m = -0.525 \text{ m}$, $\sigma = 0.363$), 飽和透水係数には, 実測値 $K_s = 0.000314 \text{ m/s}$ (Sidle et al., 1995b) を用いた。有限要素法において, 計算領域を 1800 の四面体要素に分割し, 全 462 節点における圧力水頭値を求めた (Fig. 2)。

土層の側面, 底面, 表面および上流端の水面から上には不透水境界条件, 上流端の水面から下には静水圧分布を仮定した Dirichlet 境界条件, 下流端には Seepage Face 境界条件を適用した。また, パイプ流の分類 (I) パイプ流なし, (II) 開水路流, (III) 管路流, に従い, 以下に示すようにそれぞれ異なる境界条件をパイプに設定した。

(I) パイプ流の無い領域

パイプの体積を無視するという仮定に従い, パイプの境界を無視して土層浸透流を計算する。

(II) 開水路流領域

Dirichlet 境界条件 ($\psi = 0$) を設定し, 周辺土層からパイプへの浸透流を計算した。この手法は, Nieber and Warner (1991) のモデルと同様であるが, 彼らのモデルでは「equivalent drain technique (Vimoke et al., 1963)」を用いている点異なる。Fipps et al (1986) は, Richards 式において, パイプへの浸透量を異なる 4 種類の方法 (多節点法; 流量指定型の単節点法; 圧力指定型の単節点法; 抵抗適合法) で計算を行なっているが, 本モデルでは, 最も単純で未知パラメータも必要としない圧力指定型の単節点法を採用することとした。

(III) 管路流領域

パイプへの浸透量 S_p を指定する Neumann 境界条件を設定し, パイプ壁面の土層に生じる圧力水頭の分布を計算した。

パイプ内の流量 Q_p は, 以下の式で示すように, 単位長さあたりの浸透量 S_p' [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$] を上流から積算することで求められる。

$$Q_p(l) = \int_0^l S_p'(u) du \quad (1)$$

ここで, l [m] パイプに沿った長さ (下流方向に正) である。 $l = l_1$ から l_2 までの微小区間 Δl [m] を考えると, 式 (1) は,

$$\int_{l_1}^{l_2} S_p'(l) dl = Q_p(l_2) - Q_p(l_1) \quad (2)$$

$Q_p(l)$ を, パイプ線分 k での流量 $Q_{p,k}$ で置き換えると, 式 (2) の左辺は, パイプ線分 k と $k-1$ の接続点である節点における浸透流量 $S_{p,k}$ [m^3/s] となり,

$$S_{p,k} = Q_{p,k} - Q_{p,k-1} \quad (3)$$

と書き換えることができる。式 (3) 中の Q_p は, 次節で示す, パイプ流の支配方程式により計算される。

2.3 パイプ流

パイプ流を数値的に計算するため, パイプを n_p 個の線分に分割した。それぞれの線分の末端は, 有限要素の節点に設置した (Fig. 2)。本稿で示したモデルシミュレーションでは, $n_p = 10$ とした。土壌浸透流と同様に, パイプ流についても (I) パイプ流なし, (II) 開水路流, (III) 管路流, に分類し, 計算を行なった。

(I) パイプ流の無い領域

パイプ流が無い場合, パイプと周辺土層間の水移動を考慮する必要はない。

(II) 開水路流領域

先に示したように開水路流領域では, パイプ内の圧力水頭を与えて, 周辺土層からパイプへの浸透流量を計算する。よって, 上流部からの浸透流量を積算することで, パイプ流量を求めることができる (式 (1))。パイプ線分 k での流量 $Q_{p,k}$ は, 式 (1) を以下のように変形して求めることができる。

$$Q_{p,k} = \sum_{i=0}^k S_{p,i} \quad (4)$$

$S_{p,i}$ [m^3/s] は, パイプ線分 i の上流末端の節点における浸透流 (もしくは逆流) 量である。分割されたパイプ線分での開水路流モデルを, Fig. 3a に示す。

(III) 管路流領域

数少ないパイプの水理特性に関する研究として, 北原 (1989) は, パイプを含む土塊を現地から採取し, 実験によって管路流状態でのパイプ流を検証した。その結果, 北原 (1989) は, パイプ流が Manning 式で計算でき, 実在のパイプの粗度係数が 0.036 から 1.364 の値をとることを示した。この結果に従い, 本モデル

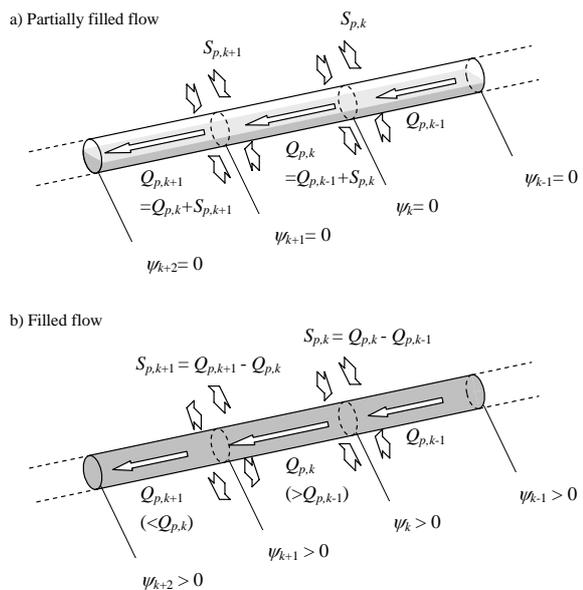


Fig. 3 Concept of the pipeflow within the divided segment: a) partially filled flow; b) filled flow

ではパイプ流を以下に示す Manning 式で計算する。

$$Q_p = \frac{1}{n_m} R^{2/3} \left(\frac{d\phi}{dl} \right)^{1/2} A \quad (5)$$

ここで, n_m [m^{-1/3}s] は Manning の粗度係数, R [m] は径深, $\phi (= \psi + z)$ [m] は水力水頭, A [m²] はパイプの断面積である。数値計算では, パイプ線分 k の流量 $Q_{p,k}$ は, 以下の式で計算され,

$$Q_{p,k} = \frac{1}{n_m} R^{2/3} \left(\frac{\phi_{p,k+1} - \phi_{p,k}}{l_{p,k}} \right)^{1/2} A \quad (6)$$

式 (3) に式 (6) を代入し, パイプ線分の接続点における浸透流量 $S_{p,k}$ を求めることができる。ここで, パイプ中の流量が下流に向かって増加する場合 ($Q_{p,k} > Q_{p,k-1}$), $S_{p,k}$ は正となり, 土層浸透流計算において吸水項として働く (土層からパイプへの浸透)。逆に, 流量が下流に向かって減少する場合 ($Q_{p,k} < Q_{p,k-1}$), $S_{p,k}$ は負となり, 土層浸透流計算において湧水項として働く (パイプから土層への逆流)。分割されたパイプ線分での管路流モデルを, Fig. 3b に示す。

円筒状のパイプを仮定していることから, パイプ断面積 A と径深 R は,

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (7)$$

$$R = \frac{\frac{\pi}{4} D^2}{\pi D} = \frac{D}{4} \quad (8)$$

ここで, D [m] はパイプの直径である。 A と R をパイプの断面形状によって変化させれば, 円筒以外の形状のパイプにも, このモデルを適用することができる。

2.4 計算の手順

初期条件等のデータを入力後, パイプ流タイプ $T_k^{(0)}$ (I; $T_k=1$, II; $T_k=2$, III; $T_k=3$) と $S_{p,k}^{(0)}$ の初期仮定のもと, 土層浸透流 (圧力水頭分布 $\psi^{(1)}$) を計算する (Fig. 4)。次に, 土層浸透流計算の結果に基づきパイプ流 $Q_{p,k}^{(1)}$ を計算する。サブルーチン「パイプ流の分類」 (Fig. 5) により, パイプ流タイプ $T_k^{(1)}$ を決定する。ここで新たに決定された $T_k^{(1)}$ が仮定された $T_k^{(0)}$ と異なる場合, 新たな $T_k^{(1)}$ を用いて, 再度 Fig. 4 に示す計算過程を行なう。パイプ線分 k がタイプ III (管路流) に分類された場合, $S_{p,k}^{(0)}$ が正しく仮定されていれば, 式 (3) により得られる $S_{p,k}^{(1)}$ は, $S_{p,k}^{(0)}$ と等しくなるが, 仮定値 $S_{p,k}^{(0)}$ が適切でない場合, 得られる $S_{p,k}^{(1)}$ は $S_{p,k}^{(0)}$ と異なる。正しい S_p , Q_p および ψ に収束させるため, $S_{p,k}$ を,

$$S_{p,k}^{(n)} = (1 - \lambda) S_{p,k}^{(n-1)} + \lambda S_{p,k}^{(n)} \quad (9)$$

と置き換える。ここで, λ は $S_{p,k}^{(n)}$ と $S_{p,k}^{(n-1)}$ への寄与の

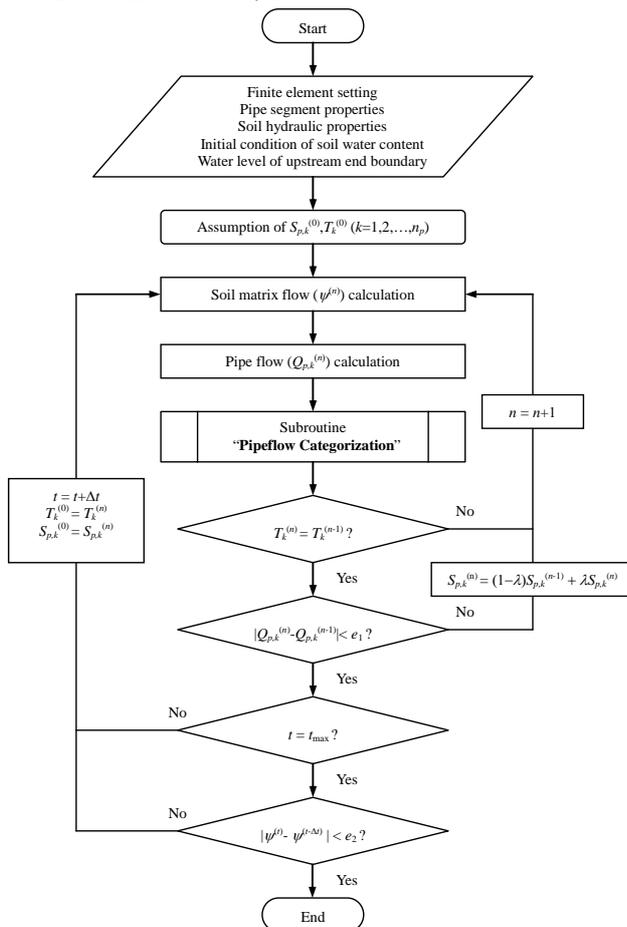


Fig. 4 Flowchart of the overall calculation procedure

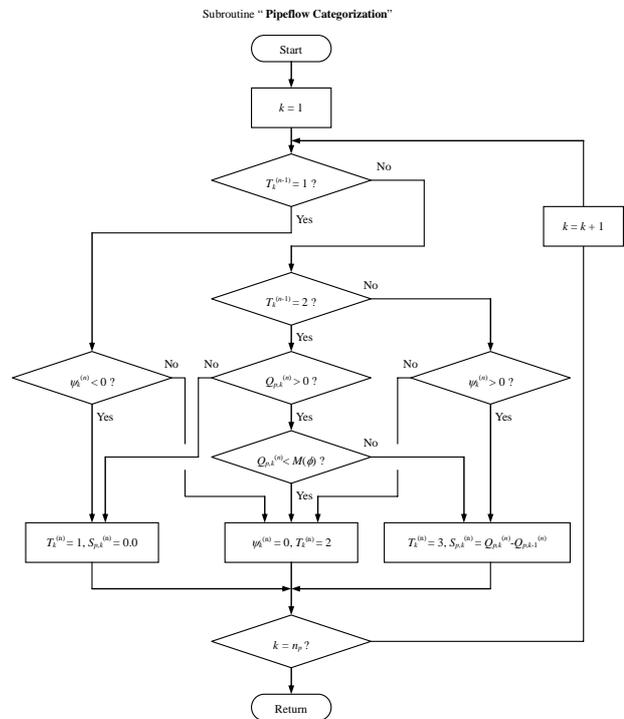


Fig. 5 Flowchart of subroutine "Pipeflow Categorization"

割合, n は繰り返し回数である。この収束計算は $|S_{p,k}^{(n)} - S_{p,k}^{(n-1)}| < e_1$ (許容誤差, m^3/s)となるまで繰り返される。全体の計算は, ψ 分布が定常状態になるまで ($|\psi^{(n)} - \psi^{(n-1)}| < e_2$; e_2 [m]は ψ の許容誤差)。本稿でのモデル計算では, $\lambda = 0.001$, $e_1 = 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$, and $e_2 = 10^{-5} \text{ m}$ を用いた。

3. 既往の実験

Sidle et al. (1995b) は, 砂質土を充填した小規模な傾斜水路(長さ 1.0 m, 幅 0.6 m, 深さ 0.4 m, 勾配 12.8°) を用いて, パイプ流が水理現象に及ぼす影響を調べる実験を行なっている (Fig. 6)。塩化ビニル製の円管(外形 18 mm, 内径 13 mm, 長さ 0.2 m) に, $3400 \text{ holes m}^{-2}$ の密度で直径 4 mm の穴を開け, ポリエステル製の不織布をまいた人工パイプを 5 本作製している。人工パイプの内面に, ガラスビーズ(平均直径 2 mm) を接着し, その量を変化させることでパイプの粗度係数を調整している。各パイプの粗度係数 (n_m 値) は, 水理実験によって測定されている。パイプ 1 から 5 の粗度係数はそれぞれ, $n_1 = 0.158$, $n_2 = 0.049$, $n_3 = 0.042$, $n_4 = 0.044$, $n_5 = 0.325$ である。それぞれ異なる粗度係数を持つ 5 本のパイプ(長さ 0.2 m) は, 一本のパイプ(1.0 m) に接続され, 斜面横断方向の中心, 土層底面から 0.05 m の位置に埋設された (Fig. 6)。土層の上流端に一定水位を与え, 水を供給し, 下流端からの土層浸透流量, パイプ流量が測定されている。土層上下流端には, 土の侵食を防ぐため, ポリエステル製の不織布が添付されている。6 本のマノメータが斜面縦断方向の 0.0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 m の位置に設置されており (Fig. 6), 2 次元的な圧力水頭分布の測定が

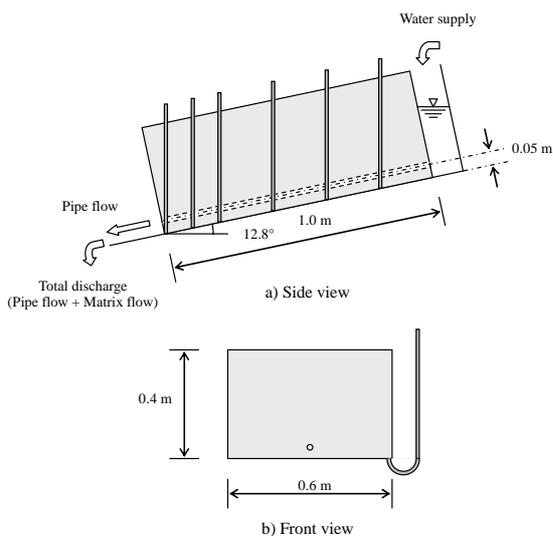


Fig. 6 Schematic of the bench-scale experiment: a) side view and b) front view (after Sidle et al., 1995)

行なわれた。

土層上流端の水位を低から高水位まで変化させ, 定常状態における, 圧力水頭分布, パイプ流量, 土層下流端からの浸透流量が, 測定されている。

モデルシミュレーションの対象として 2 種類のパイプ配列について行なわれた実験を選択した(それぞれ, Run 1, 2)。Run 1 では, パイプ 1 から 5 は上流から, 1-2-3-4-5 の順で配列され, 最大の粗度係数を持つパイプ 5 ($n_5 = 0.325$) は, 最下流端 (0.0-0.2 m) に位置する。Run 2 では, 1-5-2-3-4 の順に配列され, パイプ 5 は最上流端の次 (0.6-0.8 m) に位置する。実験結果の詳細 (Run 1, 2) は, シミュレーション結果とともに「結果と考察」で示す。

4. 結果と考察

圧力水頭値の斜面長さ方向の分布についての実験結果 (Sidle et al., 1995b) とシミュレーション結果を Fig. 7 に示す。実験結果について Run 1 と 2 を比較すると, 最大の粗度係数を持つパイプ 5 の位置が, 圧力水頭分布に大きく影響していることが明確に現れている。パイプ 5 が下流側に位置している場合, 圧力水頭は全体的に高く分布し (Run 1; Fig. 7a), 逆にパイプ 5 が上流側に位置している場合, 圧力水頭分布が低くなり, パイプによる効果的な排水が行なわれている。(Run 2; Fig. 7b)。シミュレーション結果は, このパイプ配列の違いによって現れる圧力水頭分布の傾向を明確に再現しており, 実験によって示されているパイプ内壁

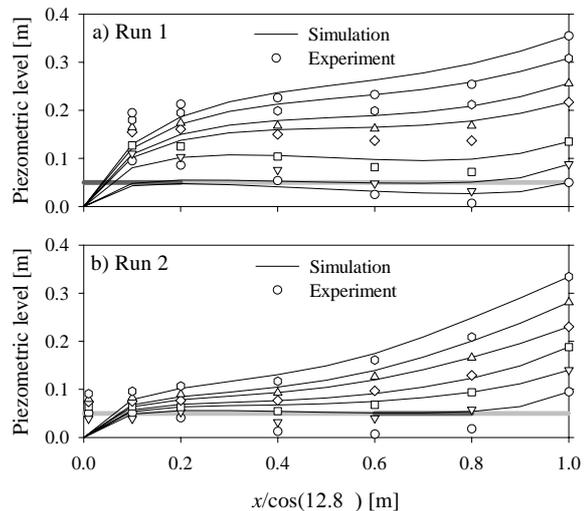


Fig. 7 Profile of the piezometric level in the sloping box with a pipe. Pipe is indicated by a gray line; the dark gray segment indicates portion of the pipe with the highest roughness coefficient $n_5=0.325$. The simulated results (each of the lines shown is for a different upslope specified pressure head) are compared to the experimental results (symbols).

の粗度の違いとそれによるパイプ内の流れの状態の違いが周辺土層の浸透流に大きく影響することが確認された。先に示した、既往のモデルは、このようなパイプ内壁の粗度の影響を考慮していないため、Run 1 と 2 で現れる異なる結果をシミュレートすることはできないものと思われる。ただし、本モデルでのシミュレーション結果においても、中流から上流にかけての圧力水頭値を過大評価、下流端部の圧力水頭値を過小評価しており、(Run 1 と 2 での実験と計算結果の平均誤差はそれぞれ、0.030 と 0.018 m)、この差が何によるものかは、明らかではない。

次に、実験では測定されていない傾斜土層内の 3 次元な地下水面形のシミュレーション結果を、Run 1 と 2 それぞれについて Fig. 8 に示す。Run 1 において、土層上流端の水面設定値の上昇にしたがって、地下水面形も上昇している (Fig. 8a-d)。土層上流端水面の設定値が最低位 (Fig. 8a) の場合以外、地下水位はパイプ位置よりも高く、この場合のパイプ流は、管路流に分類されていることがシミュレーション過程で確認されている。また、パイプから周辺土層への水の逆流も

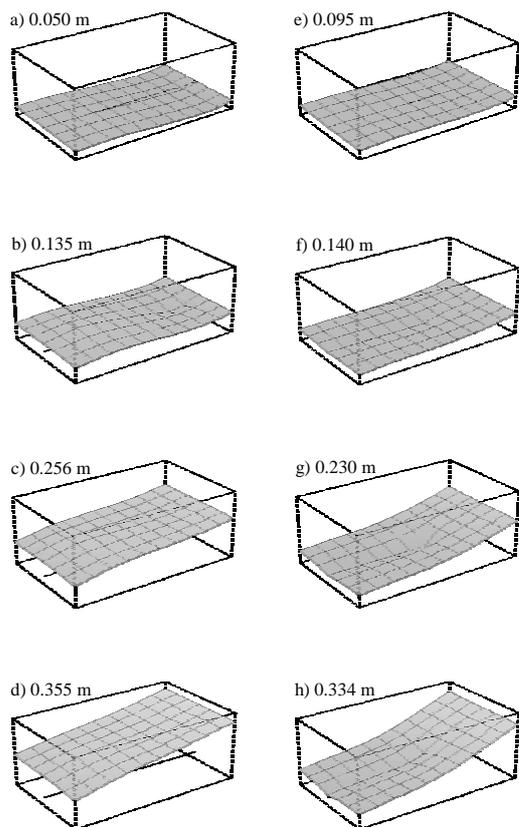


Fig. 8 Simulated three-dimensional groundwater table within the sloping soil domain for Runs 1 (a-d) and 2 (e-h) for various water levels fixed at the upslope end (values indicated in each figure)

シミュレーション過程で確認されており、これによる地下水面形への影響 (下流部における上に凸型の水面形) が Fig. 8b によく現れている。一方 Run 2 において、土層上流端の水面設定値が上昇しても、上流部の地下水面形のみが上昇し、中流から下流にかけての水面形は比較的低いままに保たれている (Fig. 8e-h)。また、中流部から下流端にかけての水面形が下に凸の形状を示しており (Fig. 8f-h)、土層からパイプへの活発な浸透が起こっていることを示している。上流部 (0.8-1.0 m) を除く全ての部分で、パイプ流が開水路流に分類されていることが、シミュレーションの過程で確認されている。また、パイプから周辺土層への逆流が起こっていないことも、シミュレーションの過程から確認されている。これら Run 1 と 2 の地下水面形のシミュレーション結果の比較は、Run 1 のパイプ流と土層浸透流が、高い粗度を持つパイプが下流端部に配置されることによって起こる管路流に大きく影響を受けているとした実験からの知見 (Sidle et al., 1995b) を裏付けている。この水輸送能力の低いパイプによって、それよりも上流部のパイプが排水経路としての効果を発揮できていないといえる。また、Run 2 では中流から下流部にかけての土層からパイプへの浸透がパイプ流を決定しており、上流部に位置する粗度の大きなパイプが水面形状にはさほど大きな影響を及ぼしていないといえる。

上流端水位の各設定値での、下流端からのパイプ流量、土層浸透流量および総流量の実験値と計算値を Fig. 9 に示す (実験値: 黒丸, 計算値: 白丸)。総流量に関しては、Run 1, 2 共に、実験値と計算値がほぼ一致している (平均誤差は、Run 1 と 2 でそれぞれ、2.96 と 2.04 cm^3/s)。Run 1 ではパイプ流と土層からの浸透流に関しても、実験値と計算値がよく一致している (それぞれ、3.41 と 1.80 cm^3/s)。ところが、Run 2 では、パイプ流と土層からの浸透流の計算結果が、実験値と比較してそれぞれ過小評価と過大評価している (流量の平均誤差はそれぞれ、7.87 と 5.99 cm^3/s)。この違いの原因として、(1)土層下流端に添付した不織布による抵抗、(2)土層からパイプへの浸透において、単節点法を用いたことによる計算上の誤差、の二つが考えられる。原因(1)は、実験において大気開放条件である下流端の圧力水頭が正の値を示していることから (Fig. 7)、その可能性を指摘することができる。そこで、下流端に仮想的な抵抗を設けた計算を行なった結果、流量に関しては改善が得られたが (パイプ流量と浸透流量それぞれの平均誤差は、Run 1 で 2.25 と 1.94 cm^3/s 、Run 2 で 0.95 と 1.94 cm^3/s)、そのときの圧力水頭分布の再現性については、改善されないもしくは、逆に悪化した (平均誤差は Run 1 と 2 でそれぞれ、0.024 と 0.031 m)。こ

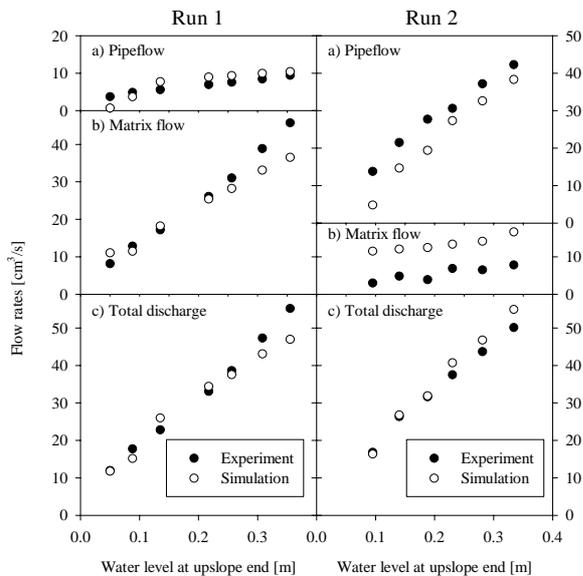


Fig. 9 Comparison of flow rates between experimental and simulated results. ● indicates experimental results, ○ indicates simulated results

のため、流量の実験値と計算値の違いは、下流端における不織布の抵抗だけでは説明できず、土層からパイプへの浸透の計算方法による誤差があるものと考えられる。Fipps et al. (1986) は、圧力指定型の単節点法を用いた場合、周辺土層からパイプへの浸透量の計算において過小評価する恐れがあることを示しており、実験値と計算値の差に影響しているものと思われる。よって、高精度の計算結果を要求される場合は、Vimoke et al. (1963) が提案している「equivalent drain technique」を用いる必要がある。

5. おわりに

本稿において示した3次元選択流計算モデルでは、パイプ流と土層浸透流を個別に扱い、それぞれの支配方程式 (Richards 式と Manning 式) を用いて計算をなし行なった。また、パイプ流は3状態に分類され (I; パイプ流なし, II; 開水路流, III; 管路流), 計算されている。このため、既往のモデルでは、扱われていない管路流とそれに伴うパイプ内での水圧分布の発生、周辺土層からパイプへの浸透だけでなくパイプから周辺土層への逆流についても、このモデルは扱うことが可能である。このモデルを用いて、既往の実験 (Sidle et al., 1995b) をシミュレートし、比較的良好な再現結果を得た。特に、粗度係数の高いパイプの配置が土層内の水圧分布と下流端からの流量に影響を及ぼすことがモデル計算から確認され、本モデルの有効性が証明された。

本モデルは、有限要素法の計算グリッドの設定にお

いて、過剰な計算時間と労力を省くように設計されている。このため、より複雑な選択流経路を持つ土層におけるモデル計算への拡張が容易に行なえるという長所を持っている。複雑な選択流経路を含む水文地形的降雨流出モデル (Sidle et al., 2000, 2001) と組み合わせることで、斜面スケールもしくは小流域スケールへの適用が可能と考えられる。また、それらの結果などから、選択流経路による迅速な降雨応答機構の解明や、パイプ流が土層の間隙水圧上昇に影響を及ぼすことによる斜面安定性の変化についての解析を行なうことが可能である。

謝辞

研究の遂行にあたり、京都大学大学院農学研究科の水山高久教授、信州大学農学部の北原曜教授、国土交通省国土技術政策総合研究所の内田太郎研究員に御指導を頂いた。この場において謝意を表す。

参考文献

- 内田太郎・小杉賢一朗・大手信人・水山高久 (1995) 斜面土層内のパイプが地下水面形に及ぼす影響に関する実験的研究, 日本林学会論文集, 106, pp.505-508
- 太田猛彦・塚本良則・野口晴彦 (1981): パイプフローと山崩れについての一考察, 昭和56年度砂防学会研究発表会概要集, pp.92 - 93
- 北原曜 (1989): 林地緩斜面土層中のパイプフローの特性 (II) パイプの水理特性, 日本林学会誌, 71(8), pp.317-322
- 北原曜・寺島智巳・中井裕一郎 (1994): 側方浸透流量に占めるパイプ流量の割合, 日本林学会誌, 76, pp.10-17
- Barcelo, M. D. and Nieber, J. L. (1981): Simulation of the Hydrology of Natural Pipes in a Soil Profile, Paper No. 81-2028, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, 23
- Barcelo, M. D. and Nieber, J. L. (1982): Influence of a Soil Pipe Network on Catchment Hydrology, Paper No. 82-2027, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, 27
- Beven, K. J. and Germann, P. F. (1982): Macropores and water flow in soils, Water Resources Research, 18, pp. 1311-1325
- Bryan, R. B. and Jones, J. A. A. (1997): The significance of soil piping process: inventory and prospect, Geomorphology, 20, pp. 209-218
- Fipps, G., Skaggs, R. W., Nieber, J. L. (1986): Drains as a

- boundary condition in finite elements, *Water Resources Research*, 22, pp. 1613-1621
- Gilman, K. and Newson, M. D. (1980): *Soil Pipes and Pipeflow – A Hydrological Study in Upland Wales*, British Geomorphological Research Group Monograph, No. 1, GeoBooks, Norwich, United Kingdom, 114
- Istok, J. (1989): *Groundwater Modeling by the Finite Element Method*, American Geophysical Union, Washington DC, 495
- Jones, J. A. A. (1987): The effects of soil piping on contributing area and erosion pattern, *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, pp. 229-248
- Jones, J. A. A. and Connelly, L. J. (2002): A semi-distributed simulation model for natural pipeflow, *Journal of Hydrology*, 262, pp. 28-49
- Kosugi, K. (1996): Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, *Water Resources Research*, 32, 2697-2703
- McCaig, M. (1983): Contributions to storm quickflow in a small headwater catchment – the role of natural pipes and soil macropores, *Earth Surface Processes and Landforms*, 8, pp. 239-252.
- Mosely, M. P. (1982): Subsurface flow velocities through selected forest soils, South Island, New Zealand, *Journal of Hydrology*, 55, pp. 65-92.
- Nieber, J. L. and Warner, G. S. (1991): Soil pipe contribution to steady subsurface stormflow, *Hydrological Processes*, 5, 329-344.
- Noguchi, S., Tsuboyama, Y., Sidle, R. C., Hosoda, I. (1997): Spatially distributed morphological characteristics of macropores in forest soils of Hitachi Ohta experimental watershed, Japan, *Journal of Forest Research*, 2, pp. 207-215.
- Onda, Y. (1994): Seepage erosion and its implication to the formation of amphitheatre valley head: a case study at Obara, Japan, *Earth Surface Processes and Landforms*, 19, pp. 627-640.
- Pierson, T. C. (1983): Soil pipes and slope stability, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 16, pp. 1-11.
- Sidle, R. C., Tsuboyama, Y., Noguchi, S., Hosoda, I., Fujieda, M., Shimizu, T. (1995a): Seasonal hydrologic response at various spatial scales in a small forested catchment, Hitachi Ohta, Japan, *Journal of Hydrology*, 168, pp. 227-250.
- Sidle, R. C., Kitahara, H., Terajima, T., Nakai, Y. (1995b): Experimental studies on the effects of pipeflow on throughflow partitioning, *Journal of Hydrology*, 165, pp. 207-219.
- Sidle, R. C., Noguchi, S., Tsuboyama, Y., Laursen, K. (2001): A conceptual model of preferential flow system in forested hillslopes: evidence of self-organization, *Hydrological Processes*, 15, pp. 1675-1692.
- Sidle, R. C., Tsuboyama, Y., Noguchi, S., Hosoda, I., Fujieda, M., Shimizu, T. (2000): Stormflow generation in steep forested headwaters: a linked hydrogeomorphic paradigm, *Hydrological Processes*, 14, pp. 369-385.
- Terajima, T., Sakamoto, T., Nakai, Y., Kitamura, K. (1997): Suspended Sediment discharge in subsurface flow from the head hollow of a small forested watershed, northern Japan, *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, pp. 987-1000.
- Tsuboyama, Y., Sidle, R. C., Noguchi, S., Hosoda, I. (1994): Flow and solute transport through the soil matrix and macropores of a hillslope segment, *Water Resources Research*, 30, pp. 879-890.
- Tsukamoto, Y. and Ohta, T. (1988): Runoff processes on a steep forested slope, *Journal of Hydrology*, 102, pp. 165-178, 1988.
- Uchida, T., Kosugi, K., Mizuyama, T. (1999): Runoff characteristics of pipeflow and effects of pipeflow on rainfall-runoff phenomena in a mountainous watershed, *Journal of Hydrology*, 222, pp. 18-36.
- Vimoke, B. S., Yura, T. D., Thiel, T. J., Taylor, G. S. (1963): Improvements in construction and use of resistance networks for studying drainage problems, *Soil Science Society of America Journal*, 26, pp. 203-207.
- Zienkiewicz, O. C. (1971): *The finite element method in engineering science*, McGraw-Hill, Berkshire, England.

Modeling of Lateral Preferential Flow through Soil Pipes in Hillslope

Daizo TSUTSUMI , Roy C. SIDLE , Masaharu FUJITA , Ken'ichiro KOSUGI*

* Graduate School of Agriculture , Kyoto University

Synopsis

A general modeling method describing the three-dimensional lateral preferential water flow in a hillslope with soil pipes was developed. Matrix flow and pipe flow were regarded as the separated flow systems , and calculated by their respective governing equations (Richards' and Manning's equations , respectively) considering the interaction between these two flow systems. The model accommodates both partially and filled pipeflow ,and seepage into the pipe as well as backflow from the pipe to the surrounding soil matrix. Simulations were conducted for conditions outlined in an earlier bench-scale experiment. Both groundwater levels and preferential flow that were influenced by the location of a high roughness element within the soil pipe were accurately simulated; other models have not simulated such conditions.

Keywords: soil pipes , pipeflow , matrix flow , Richards' equation , Manning's equation