

山腹斜面におけるパイプ - マトリクス流連成モデルの開発

京都大学大学院	学生員	安 賢旭
京都大学大学院	正員	市川 温
京都大学大学院	正員	堀 智晴
京都大学大学院	正員	椎葉充晴

1 はじめに これまでに行われた観測により、山腹斜面土層内において、鉛直及び地表面とほぼ平行に、パイプと呼ばれる連続した空洞が存在することが多く報告されている。このパイプは斜面からの雨水流出、表土層安定性に影響し、斜面の崩壊、地形発達などの要因の一つとして考えられている。しかし、土壌部（マトリクス部）とパイプ部の流れを連成して計算する手法は、いまだ十分には開発されておらず、パイプの部分を透水係数が大きい土層とみなし計算をするもの、パイプ部の流量を Manning 式で求めたものなどのいくつかの簡略的な計算手法が提案されているにとどまっている。本研究では、パイプ部の流れを計算するスロットモデルとマトリクス部の流れを計算する飽和不飽和流モデルを結合し、山腹斜面土層内の流れを詳細に解析しうるモデルを開発することを目的とした。

2 モデルの構成

2.1 モデルの基本的な考え方 パイプ部とマトリクス部の流れを個別の系とみなし、パイプ部はスロットモデル、マトリクス部は飽和不飽和流モデルで計算する。ただし、両者は次のようにしてお互いに影響を与えながら計算を進めていく。

- (i) パイプ部の水理水頭を境界条件として、飽和不飽和流モデルでマトリクス部の流れを計算する。
- (ii) 計算結果から、パイプ部とマトリクス部間の流出入量を計算する。
- (iii) (ii) で求めた流出入量を側方境界条件としてスロットモデルでパイプ部の流れを計算する。
- (iv) 次の時間に、(iii) で求めたパイプ部の水理水頭を境界条件として、再び (i) の計算をする。

2.2 飽和不飽和流モデル 土壌中の飽和不飽和流れは、(1) 式に示す Richards 式で記述される。本来こ

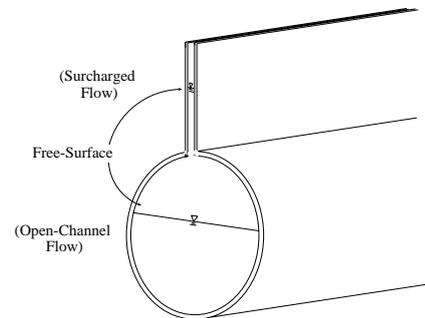


図 1 スロットモデル

の式は 3 次元的に書かれるべきものであるが、本研究では簡易的に鉛直 2 次元で取扱うことにする。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} + \sin \omega \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + \cos \omega \right) \right] \quad (1)$$

ただし、 θ : 体積含水率、 ψ : 圧力水頭、 K : 飽和透水係数、 ω : x 軸と水平面との角度である。

修正 Picard 法によって (1) 式を差分化し、飽和不飽和流モデルの計算を行う。

2.3 スロットモデル 本研究では、パイプを流れる水の解析を統一して取り扱うためにスロットモデルを用いた。スロットモデルは、みかけ上のスロットを管の上部に付け加えることにより、水が満管の時でも開水路として扱うことができるモデルである (図 1 参照)。スロットモデルではスロット断面は排水管と一体の流水断面として作用して、スロット断面は流れに対して摩擦抵抗を及ぼさないと仮定する。したがって、スロットモデルの基礎式は、次のような一般的な開水路の運動方程式及び連続式である。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} - gAS_0 + gAS_f - \frac{1}{2} \frac{Q}{A} q = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0 \quad (3)$$

ただし、 g : 重力加速度、 Q : 流量、 A : 通水断面積、 S_0 : 水路勾配、 S_f : 摩擦勾配、 q : 横流入量である。

キーワード：山腹斜面、パイプ流

住所：〒 606-8501 京都市左京区吉田本町、電話：075-753-5096、ファックス：075-753-4907

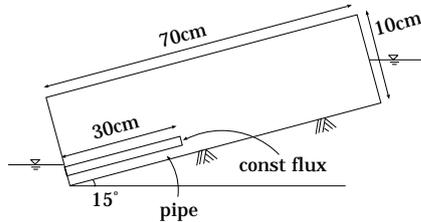


図2 パイプを埋設したモデルの概略図

(2) 式左辺の第6項と(3)式左辺の第3項は、マトリクス部からパイプ部に水が垂直に流入することを想定した横流入項である。この(2)、(3)式を差分化してパイプ部の計算を行う。

3 モデルの適用と結果 本研究では、内田ら^[1]の人工パイプを用いた実験データを利用してシミュレーションを行った。内田らの実験条件をまとめると、以下のようなものである(図2参照)。

長さ70cm、幅7.3cm、勾配15度の水路に、10cmの深さで標準砂を充填した。パイプはアクリルパイプ(外径10mm、内径8mm、長さ30cm)の側面に穴(直径2mm)を2cm間隔で4方向にあげたものに、さらしをまいたものを利用した。斜面上流端に接しているタンクに定量(0.5g/sec)の水をポンプで加えて、下流端では一定の水深(3cm)を保つようにし、上流から下流に水が流れるようにした。斜面底面からパイプの中心までの高さは1cmになるようにした。

本研究では上記の実験条件を再現するようにモデルを適用した。格子の大きさ($\Delta x, \Delta z$)は5mmとし、 x 軸の方向は斜面と平行にして、 z 軸に方向は斜面と垂直にした。また、 z 方向の格子二つ分でパイプを表わすようにした。

シミュレーションはパイプありの場合とパイプなしの場合の二通り行った。ただし、スロットモデルは水深が0になる部分があると計算ができなくなるため、パイプの上流端から一定の流量を流した。その量は最初は 1.0×10^{-8} (m^3/s)とし、10分経過後は 1.0×10^{-9} (m^3/s)とした。行ったシミュレーションは3時間分であったが、3時間後のパイプの下流端での流量は 4.9×10^{-8} (m^3/s)なので、この流量が及ぼす影響は約2%程度である。

シミュレーションと実験の結果を図3と図4に示している。左側がシミュレーション結果であり、右側が実験の結果である。シミュレーション結果は黒くなっている部分が水面であり、実験とシミュレーションの

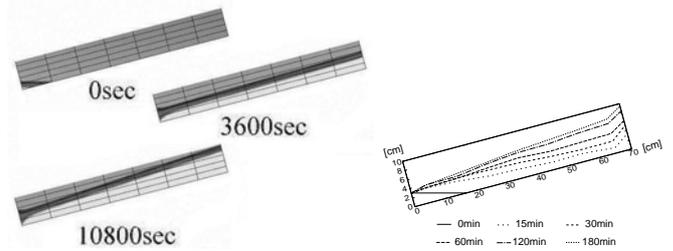


図3 パイプなしの場合の水面形

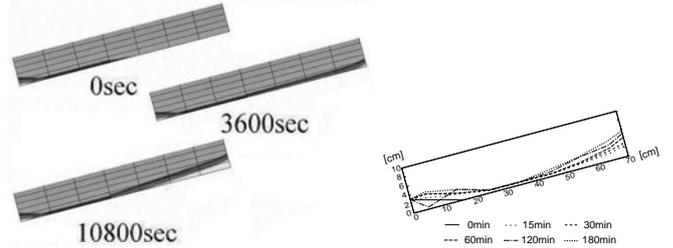


図4 パイプありの場合の水面形

結果がおおむねに一致していることが確認できる。ただし、パイプありの場合のシミュレーションと実験の水面形を比較してみると、中・上流側は一致しているが、下流側の水面を見ると、シミュレーション結果の方が少し低くなっている。その理由は現在ではまだ不明であって今後の検討課題である。

4 おわりに 本研究ではスロットモデルと飽和不飽和流モデルを結合することによって、山腹斜面の土層内の流れ、特にパイプ流とマトリクス部の流れの相互作用を解析できるモデルの構築を目指してきた。この方法の利点は、パイプ部の流れを開水路状態・管水路状態の区別をすることなく計算できるところにある。飽和不飽和流モデルは、現時点は鉛直2次元となっているが、3次元のモデルに拡張しても同様にしてスロットモデルとの結合が可能である。両モデルを連成したモデルを実験水路に適用し、実験結果とシミュレーション結果を比較したところ、シミュレーションと実験データから得られた水面形はだいたい一致した。ただし、パイプがある場合の下流端の水面形が少し異っておりその理由は、今後検討の余地がある。今後の課題としてスロットモデルを水深が0の時も対応できるように改良することと飽和不飽和流モデルを3次元で構築すること、マトリクス部とパイプ部の水の出入りのメカニズムの検証などが考えられる。

参考文献

- [1] 内田 太郎・小杉 賢一朗・大手 信人・水山 高久: 斜面土層内のパイプが地下水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, 1995.