

斜面土層内のパイプ流のモデル化

堤大三・Roy C. Sidle

1. はじめに

これまでの研究により、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、斜面の雨水流出機構に大きな影響を及ぼす事が明らかにされてきた。また、パイプによる選択流 (パイプ流) が崩壊発生に関与している可能性も指摘されている。これらの現象を解明するためには、パイプの存在を考慮した浸透流の解析手法が必要となる。本研究では、従来の浸透流理論と管路内の水流に関する理論を組み合わせ、モデルを構築した。また、室内実験との対比により、このモデルの検証を行った。

2. 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。パイプ上の節点が飽和状態 ($\psi \geq 0$) 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、計算を行った。

1) 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、

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

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、 Δl は節点 i から $i+1$ 間のパイプ長、 Δt 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。

2) 管路流

Manning 式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 とし、

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

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。各節点の圧力水頭 ψ は初めの仮定から変化するため、新たな ψ を用いて再び流量計算を行った。この計算を全節点の ψ が一定値に収束するまで繰り返した。

3. 結果と考察

既往の室内実験 (Sidle et al., 1995) では、水路 ($l = 1.0$, $w = 0.6$, $h = 0.4$ m, $\theta = 12.8^\circ$) に砂質土が充填され、水路底面から 5 cm の位置に人工的に製作されたパイプ状の空隙 (上流端閉鎖、下流端開放) が設置された。このパイプを含む土層の上流端に定水位が与えられ、定常状態における下流端土層からの流出量、パイプからの流出量、土層底面の圧力水頭分布が計測されている。この実験を上記のモデルにて再現計算したところ、土層およびパイプからの流出量、土層底面における圧力水頭分布ともに良好な再現結果が得られた。特に、粗度係数の異なるパイプの配置による計測値への影響に関しては、その特徴が明確に再現されており、モデル計算においてパイプ内の水流を理論的に取り扱う事の重要性が確認された。

現在、比較的大規模な人工斜面 ($l = 5.0$, $w = 0.5$, $h = 0.35$ m, $\theta = 20^\circ$) に人工降雨を与え、降雨流出と斜面安定性に対するパイプ流の影響を調査する実験を行っており、その結果についてもモデル計算を実施している。これらの結果、モデルの有効性が確認されれば、実際の山地における斜面安定解析に、本モデルを適用できると考えられる。

参考文献

Sidle R.C. et al. Experimental studies on the effects of pipeflow on throughflow partitioning. J. Hydro. 165, 207-219, 1995