

人工斜面土層内における選択流のモデル・シミュレーション

京都大学防災研究所 ○堤大三・藤田正治
 京都大学大学院工学研究科 宮寄俊彦

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 (Sidle et al., 2000; Tsukamoto et al, 1982)。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 (Pierson, 1983)。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 (Tsukamoto et al, 1982; 水山, 1994)。

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、パイプ流に代表される選択流を考慮した計算手法の開発が必要である。本研究では、パイプー周辺土壌間の水移動を評価し、パイプ内の水圧分布の変化を計算することで、パイプ流に関するモデル化を行い、汎用的な計算手法を構築した。この手法を用いて、パイプを含む人工斜面からの降雨流出と斜面安定性に関する実験 (宮寄ら, 2004) をシミュレートし、モデルの妥当性を検証した。

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 (図-1)、パイプー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。

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、 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。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ー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

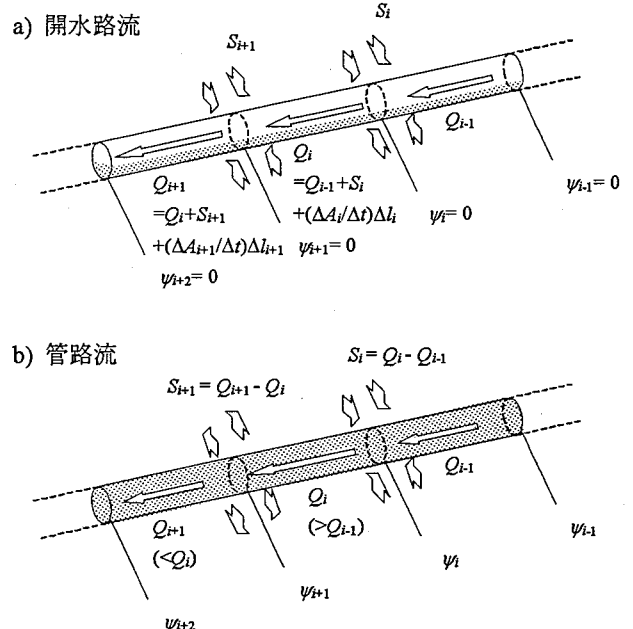


図-1 パイプ流の概念図: a) 開水路流, b) 管路流

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 ψ は初めの仮定から変化するため、新たな ψ を用いて流量計算を行った。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。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。

3. 結果

人工斜面を用いた実験(宮寄ら, 2004)において、3通りの条件 (Run 1:パイプなし, Run 2:斜面全長にわたりパイプ有り, Run 3:斜面下部 1m より上部にパイプ有り) で、パイプを設置した。

図-2 に、斜面下流端からの浸透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。パイプのない条件の Run 1 は、従来の浸透流計算であるため、実測値と計算値はよく一致している。一方、パイプ存在条件である Run 2, 3 においても、実測値と計算値は比較的良好に一致している。特に Run 2 において、パイプ流の発生とその流量変化は、数分の時間的遅れはあるものの、ほぼ正確に再現できている。ここには示さないが、土層底面での圧力水頭 ψ 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 断面圧力水頭 ψ 分布と、その結果より計算した斜面内の安全率 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は上昇せず、地下水面がちょうどパイプの位置で安定している。Run 3 では、パイプ下流端から土層への水の逆流により、局所的な圧力水頭の上昇が起きている。Run 1, 3 で、地下水面が地表面に達しており、実験において表面流が発生した観測結果と一致している。これと対応して 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-4 中の破線) とよい対応を示している。

4. おわりに

新たに開発した計算手法により、パイプ流に関する実験をシミュレートした結果、斜面土層からの流出特性・斜面安定性の両方について、よい再現結果を得られた。この計算手法を、パイプ構造の発達した実斜面での降雨を起因とする表層崩壊と、それに続く土石流の発生予測に活用できると考えられる。

引用文献

Sidele 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. 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. Pierson T.C.: Soil pipes and slope stability, Quaternary Journal of Engineering Geology, Vol. 16, pp. 1-11, 1983. 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. 宮寄俊彦, 堤大三, 藤田正治: パイプ構造をもつ人工斜面の降雨流出特性と土層安定性, 平成16年度砂防学会研究発表会概要集, 2004.

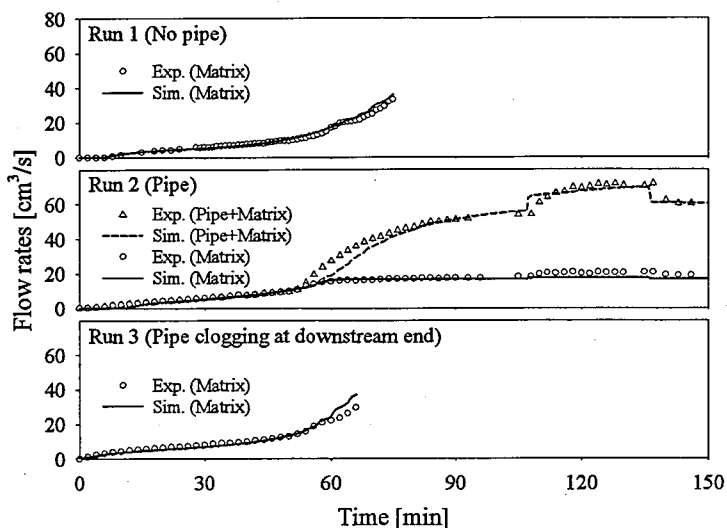


図-2 流量の実験結果とシミュレーション結果の比較

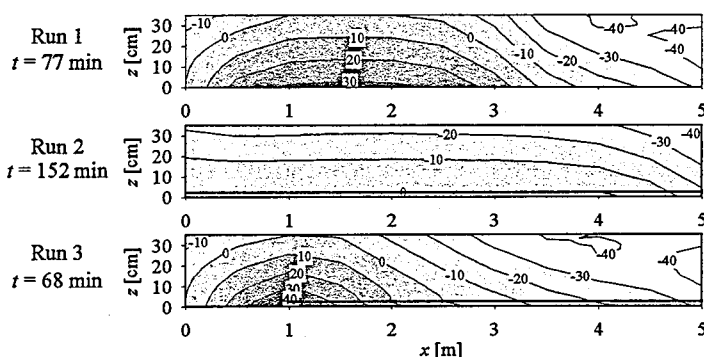


図-3 x - z 断面の圧力水頭 ψ [cm] 分布のシミュレーション結果

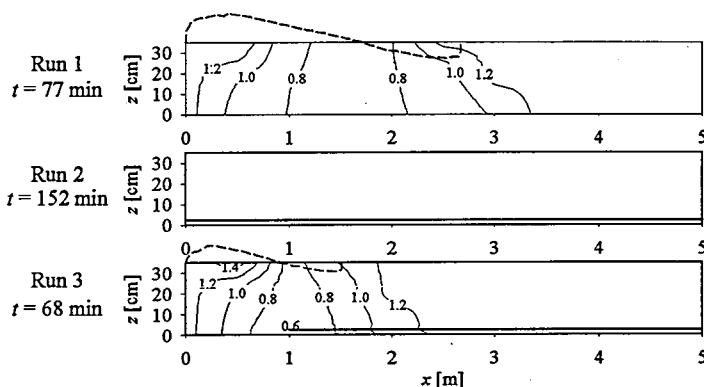


図-4 x - z 断面の安全率 F_s 分布のシミュレーション結果と流動後の最終斜面形状 (破線) の対比