

120 パイプ流のモデル化と崩壊に与える影響の数値解析

京都大学農学研究科 ○小杉賢一朗・内田太郎・水山高久

1. はじめに

豪雨に伴う斜面の表層崩壊は、斜面土層内の水分移動と密接に関連している。これまで、ダルシー則やリチャーズ式に基づく飽和・不飽和浸透理論を用いて、降雨より土壌水分や地下水位の変動を推定し、斜面の崩壊危険度を予測するシミュレーションモデルの開発が試みられ一定の成果が納められた。その一方で、近年の山地流域における水文観測によって、パイプ流に代表される土層の不均質性が降雨流出に大きく寄与していることが明らかにされた。さらに、崩壊直後の斜面ではしばしばパイプからの水の吹き出しが観察されるため、パイプ流と表層崩壊の関連性も指摘されている。このようなことから、表層崩壊発生時刻や場所の予測精度を向上させるためには、パイプ流の適切なモデル化を避けて通ることはできないと考えられる。しかしながらこれまでのところ、パイプへの水の浸入過程、パイプ内の水の流下過程、(パイプが閉塞した場合の)パイプから土層への逆流過程等を如何にモデル化すべきかは、ほとんど検討されていない。ここでは、「パイプを飽和透水係数の大きな土壌とみなす」という単純な仮定を用いたモデルで、人工パイプを用いた室内実験結果の解析を行った。

2. 方法

幅 7.3 cm の水路に、図-1 のように豊浦標準砂を高さ 10 cm、長さが 70 cm になるように充填した。人工パイプとしてアクリル管 (直径 1 cm、内径 0.8 cm、長さ 30 cm) の側面に 2 cm おきに直径 0.2 cm の孔を 4 方向に空け、全体をさらしで覆ったものを埋設した。水路全体を 15° に傾け、さらしで仕切られた下端の水槽の水位を固定 (土層下端から斜面に垂直な方向に 3 cm の位置) した上で、同様にさらしで仕切られた上端の水槽に 0.5 cc/s の一定強度で給水し続けた。定常に至るまでの土層底面の間隙水圧変化を、7 点に設けたピエゾメータによって計測した。以下では、パイプを埋設しなかった場合 (No-pipe)、パイプ出口が下端の水槽につながっている場合 (Open-pipe)、パイプ出口が下端の水槽から 15 cm 上流側にある場合 (Close-pipe) について検討する。なおパイプは、中心が底面から 1 cm の位置になるように埋設した。実験の詳細は内田ら (1995) に記載されている。

2次元のリチャーズ式を有限要素法を用いた数値計算によって解き、実験で得られた定常時の間隙水圧分布の再現を試みた。標準砂の水分特性曲線のパラメータを実測値から特定した上で、No-pipe の間隙水圧分布を最も良く再現するように飽和透水係数 K_s の値を調節した。Open-pipe と Close-pipe については、No-pipe と同じ土壌パラメータを与え、パイプ埋設部が飽和した場合のみ透水係数が大きくなる処理をした。この透水係数の値を K_{sp} とし、Open-pipe と Close-pipe 両方の間隙水圧分布を最も良く再現するように、その値を調節した。

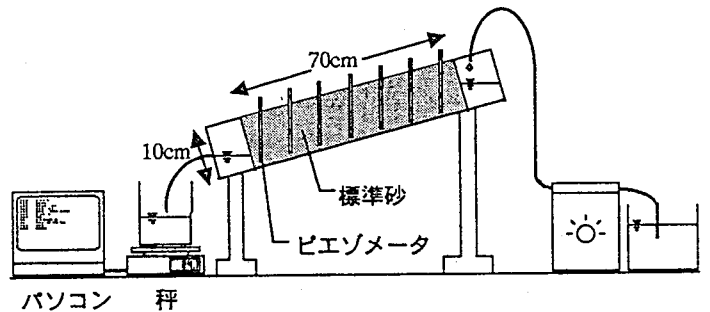


図-1 実験装置の概要

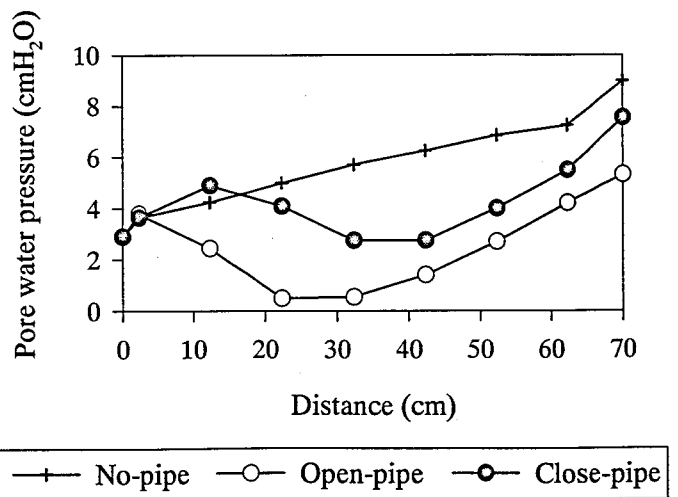


図-2 底面の間隙水圧分布の計測値

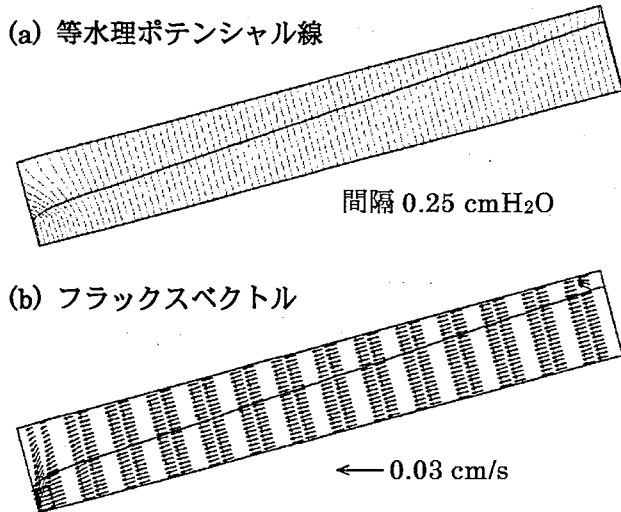


図-3 No-pipeの地下水位, 等ポテンシャル線, フラックスベクトルの計算値

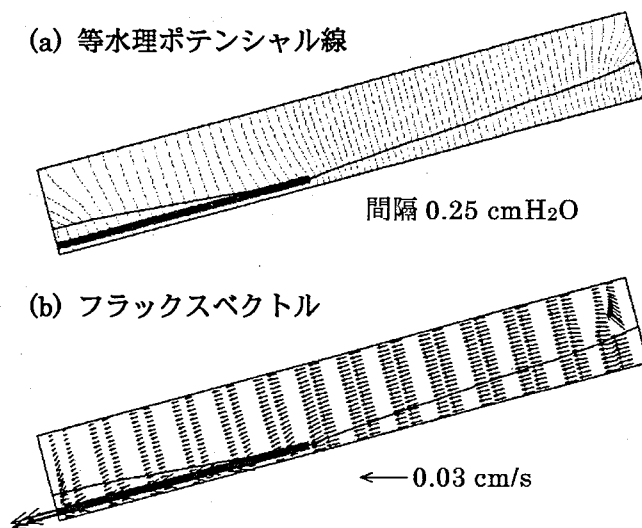


図-4 Open-pipeの地下水位, 等ポテンシャル線, フラックスベクトルの計算値

3. 結果

実験結果 (図-2) より, パイプ埋設部とその上流部で間隙水圧が低下することが判った。また Close-pipe では, パイプ出口の下流側で No-pipe よりも間隙水圧が高くなり, パイプの閉塞が大きな地下水位上昇をもたらす可能性が示唆された (内田ら, 1995)。

No-pipe の解析の結果得られた K_s は 0.0217 cm/s で, これまで報告されている値に一致した。シミュレーションでは, 比較的均質な水理ポテンシャルとフラックスの分布が得られた (図-3)。 $K_{sp} = 0.18 \text{ cm/s}$ とした場合の Open-pipe と Close-pipe の結果が, 図-4, 5 である。Open-pipe では, パイプの上流部で等ポテンシャル線が密なこと, パイプ上端部の地下水位が最低となっていること, パイプ内部のフラックスが非常に大きいことが判る (図-4)。Close-pipe では, パイプの上・下流部で等ポテンシャル線が密なこと, パイプ出口付近で地下水位が最高となっていることがわかる。また上端部でパイプに集められた水が, 下端部で土層に戻っている様子が, フラックスベクトルからよく判る (図-5)。

定常時の間隙水圧分布の計算値 (図-6) は, 実測値とよい対応を示した。詳細な部分では若干の違いがあるものの, Open-pipe で水圧が最低となる点, Close-pipe の出口付近で水圧が大きくなる点などの特徴が良好に再現されている。このように, パイプを「飽和時に透水係数が急増する土壌」とみなすことで, パイプ流を良好にモデル化できることが示された。

引用文献

内田太郎・小杉賢一朗・大手信人・水山高久 (1995) 日本林学会論文集 106, 505-508.

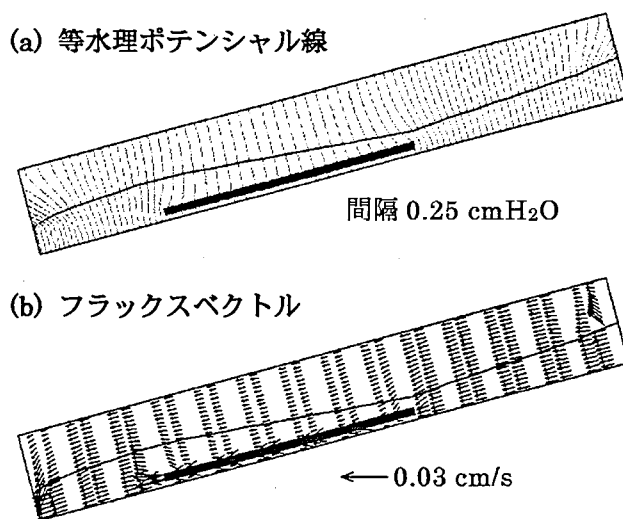


図-5 Close-pipeの地下水位, 等ポテンシャル線, フラックスベクトルの計算値

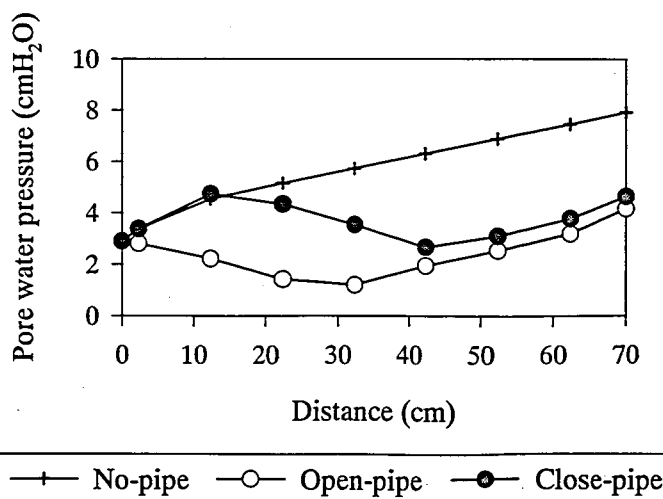


図-6 底面の間隙水圧分布の計算値