

三宅島新規細粒火山灰堆積地における雨水浸透モデル

独立行政法人土木研究所 ○若林栄一, 山越隆雄, 笹原克夫, 西本晴男
国土交通省国土技術政策総合研究所 小山内信智
国土交通省北陸地方整備局神通川水系砂防事務所 石田哲也
八千代エンジニアリング株式会社 竹島秀大

1 はじめに

火山が噴火すると、火山灰等細粒火砕物が周辺の流域に降下・堆積することがある。火山灰の堆積により、流域の降雨流出に関わる条件は一変し、噴火以前のデータに基づく経験的な降雨流出モデルは使用できなくなる。また、モデルパラメータを物理的に解釈することが難しいタンクモデルや貯留関数法などの概念的モデルでは、噴火に伴って刻々と変化する火山灰の物性(粒径分布等)や堆積厚などをモデルに取り込んで、迅速に降雨流出を予測することは難しい。

本研究では、新たに火山灰が堆積した流域における土石流の発生を予測することを最終的な目標としている。その一環としてここでは、降雨流出過程を物理的に説明可能なモデルとして、現地斜面から採取した細粒火山灰土壌の水分特性を考慮した雨水浸透モデルを作成し、単位斜面レベルでの降雨流出過程の再現を試みた。図-1に本研究のワークフローを示す。

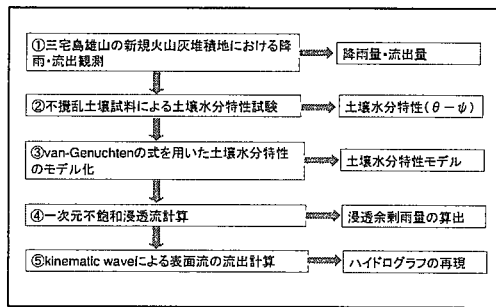


図-1 本研究のワークフロー

2 観測斜面の概要

三宅島雄山の東側斜面に、集水面積約 35m² の観測斜面を設け、三角堰により降雨時の表面流出を計測した。

観測斜面の近傍では表面から深さ 5cm および 20cm の位置に設置したテンシオメータによって、土壌水分状態の時間的変化を観測するとともに、転倒マス式雨量計によって雨量観測を行った。観測斜面は平均傾斜角 25° であり、2000 年の噴火によって平均して 46cm の厚さの火山灰で覆われている。堆積している火山灰の土粒子密度は 2.903g/cm³、粒度の構成は粗粒分 60.2% (砂分 56.8%, 礫分 3.4%), 細粒分 39.8% であった。

3 観測斜面における表面流発生状況

観測斜面は細粒火山灰が表層を覆っており、一般の山地斜面等に比較して、土壌の浸透能は大幅に低下している。図-2に示した降雨時の表面流の発生とテンシオメータの観測値の関係をみると、降雨開始とともに、まず 5cm の深度の土層のサクシオンが急激に低下し、次いで深い層(深度 20cm)のサクシオンが緩やかに低下した。

表面流発生のタイミングは 5cm のサクシオンが 0 にな

った時刻の直前であり、その時 20cm の層は飽和に達していない。すなわち、観測斜面における表面流の発生は、地下水面の上昇により発生する飽和地表流ではなく、ホートン型の地表流によるものであると考えられる。

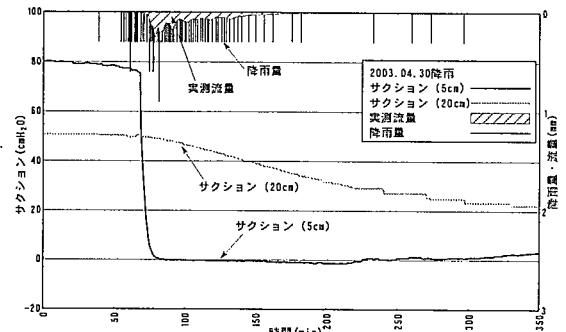


図-2 表面流の発生とサクシオンの変化

4 土壌水分特性

観測斜面の近傍において、表層の火山灰層を不攪乱の状態で採取し、水分特性試験を行い、含水率(θ)とサクシオン値(ψ)の関係を求めた。試験の結果より、van-Genuchten のモデルを用いて土壌水分特性曲線のモデル化を行った。van-Genuchten モデルのパラメータ決定に際しては、恣意性なるべく排除するために、杉井らの提案するロジスティック曲線を応用した方法¹⁾を用いた。その結果、排水過程では $\alpha=0.1827$, $n=1.43$ 、吸水過程では $\alpha=0.1835$, $n=1.6$ の値を得た。また、飽和体積含水率 θ_s 、最小水分容量 θ_r は試験より求め、それぞれ 0.491, 0.281 とした。図-3に、このようにして推定した水分特性曲線を示す。

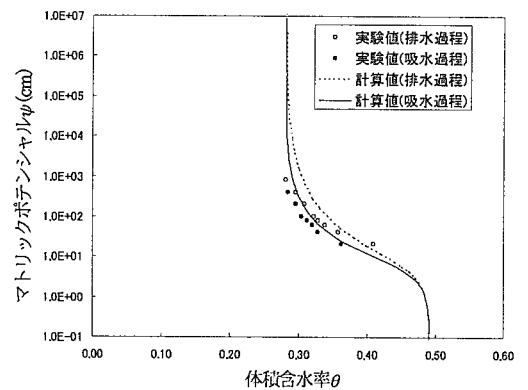


図-3 土壌水分特性曲線($\theta-\psi$)

5 一次元不飽和浸透モデル

5.1 浸透モデルの概要

求めた水分特性曲線モデルを用いて、Richards の式を基礎方程式とする一次元不飽和浸透モデルを作成し、計算を行った。当モデルでは、ある時刻の降雨量から、算出された当該時刻の土壌表面での浸透量を差し引き、土壌に浸透できなかった水量を浸透余剰量として算出した。

モデルの概念図を図-4に示す。モデルは、深さ Δz のセルが直列に配置されており、各セルのパラメータは kr ：不飽和透水係数、 θ ：体積含水率、 ψ ：サクション値、 q ：鉛直下向の水分フラックス、である。計算は地中水の連続式およびDarcyの式を差分化したものを用い、各セル境界における q を逐一求めている。

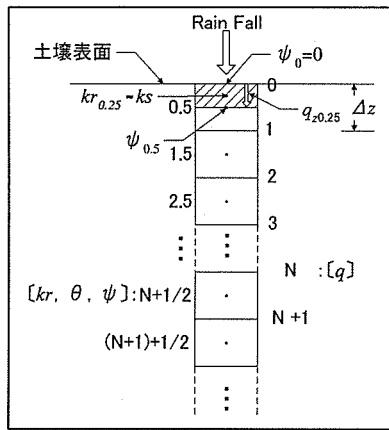


図-4 浸透モデル概念図

5.2 初期条件

モデルに与える各土層のサクションの初期値は、計算開始時刻における、深さ5cmおよび20cmのテンシオメータの観測値を直線的に内挿、外挿計算して与えた。

5.3 土壌表面における境界条件

一般的な一次元浸透計算では、第1層目のセルに降雨量を与え、出発点として計算を行うが、当モデルでは土壌表面における浸透余剰量を計算するため、境界条件の与え方を工夫した。

今、雨量強度より土壌表面の浸透能が大きい場合、従来と同様に土壌表面からの浸透強度は雨量強度に等しいとした。土壌表面の浸透能を超える雨量強度がある場合、土壌表面からの浸透強度は土壌表面の浸透能に等しいとした。この時、図-4に示す最上段セルの上半分（以下、土壌表面層と呼ぶ）に対してDarcy則を適用する。土壌表面層は常に飽和していると考え、土壌表面のサクションを0とし、土壌表面層の透水係数は飽和透水係数に等しいと考えた。

$$q_{z0.25} = -kr_{0.25} \left(\frac{\psi_{0.5} - \psi_0}{\Delta z/2} \right) + kr_{0.25} \quad \dots \text{式 [1]}$$

$$= -ks \left(\frac{\psi_{0.5} - 0}{\Delta z/2} \right) + ks = -ks \left(\frac{2\psi_{0.5}}{\Delta z} - 1 \right)$$

ここに、 $q_{z0.25}$ ：土壌表面の浸透能、 $kr_{0.25}$ ：土壌表面層の透水係数、 ψ_0 ：土壌表面のサクション値、 ks ：飽和透水係数である。ただし、これは厳密には地表面からの深さ $\Delta z/4$ における浸透量を求めていることになる。ここでは、この値を近似的に地表面での浸透量であると考えた。

5.4 計算結果

上記のモデルに三宅島の観測斜面で得られた、2003年4月30日の降雨を適用した結果を図-5に示す。

なお、飽和透水係数の値は $0.5 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ とした。計算結果は、降雨初期には全量が浸透するが、途中から浸透余剰雨量が発生していることがわかる。

6 流出モデルの適用

次に、表面流の流下過程を表現するため kinematic wave

法による流出計算を行った。表面流はマンニング則に従うものとして、等価粗度は0.1とした場合に良好な結果が得られたのでそれを用いた。

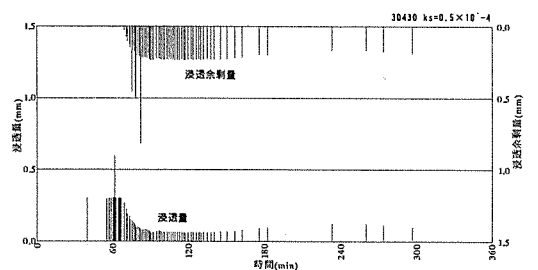


図-5 一次元不飽和浸透流計算結果

図-6に、観測された降雨をそのまま入力した場合と、一次元不飽和浸透計算により求めた浸透余剰雨量を入力した場合の計算結果を示す。

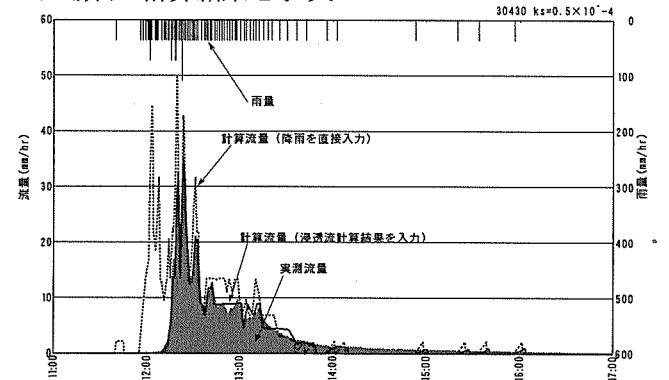


図-6 流出モデル適用結果

前者の計算流出波形は、降雨と同時に立ち上がり、初期損失の部分が表現できていない。また、ピークや低減部についても実測に比べて大きなものとなっている。後者の波形では、流出初期の立ち上がり部分は、かなり精度よく再現された。

7 まとめ

検討の結果、飽和透水係数の値が流出量を大きく左右していることがわかった。別途行った試験により求められた当土壌の飽和透水係数の値は $2.33 \sim 6.69 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ であったが、モデルは $0.5 \sim 1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ を与えた場合に再現性が高かった。これは、採取した試料が現場の表層の状態を代表していないことも考えられるため、採取方法を含めて検討する必要がある。

一方、ここで提案した浸透モデルは、土層の浸潤に伴う浸透能の時間変化をよく再現でき、その結果、斜面からの流出ハイドログラフをよく再現することができた。

以上のように、新規火山灰堆積地のような比較的、場の状態が均一な場合には、土層レベルでの浸透特性から、物理的・客観的な方法を用いて、斜面レベルの流出現象を再現することが可能であることが示された。今後は、ここで得られた斜面レベルの流出予測手法を流域レベルへ拡張すること、および、より少量で攪乱した試料からのモデルの作成などを検討していく予定である。

参考文献

- 1) 杉井俊夫, 宇野尚雄：新しい土壌水分特性曲線のモデル化について, 土木学会第50回年次学術講演会, pp.131-132, 1995.