

三宅島新規細粒火山灰堆積地における表面流発生モデル

(独)土木研究所 正会員 田方 智, 山越隆雄, 西本晴男
高知大学農学部 笹原克夫
八千代エンジニアリング(株) 若林栄一, 竹島秀大
国土交通省北陸地方整備局飯豊山系砂防事務所 石田哲也

1. はじめに

火山噴火に伴い、火山灰のような細粒火砕物が周辺の流域に降下・堆積すると、地表の浸透能が低下して降雨時の表面流出が増大し、その結果、泥流の頻発を招いたり、泥流発生時にはその規模が増大したりすることが考えられる。このような火山灰堆積地における雨水の浸透・流出過程を把握することは、火山地域での土砂災害対策を考える上で有用であると考えられる。

著者らは、2000年7月に噴火した三宅島雄山山腹の火山灰の堆積した小流域において、水文観測を実施するとともに、調査地より採取した不攪乱土壌サンプルについて、土壌水分特性試験を行った(竹島ら,2003)。その結果明らかになった土壌水分特性を用いて、表面流発生過程を物理的に説明可能なモデルを作成した(山越ら,2003)。

本研究では、そのモデルに斜面上の表面流流下過程を組み込んで斜面からの流出ハイドログラフを計算するモデルを新たに作成し、三宅島の火山灰堆積地での水文観測結果の再現性を検討した。

2. 現地観測の概要

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、表面からの深さ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. 表面流発生モデル

3.1 一次元不飽和浸透流解析モデル

ダルシー則を不飽和領域に拡張させた次式 (Richards, 1931) が基礎式となる不飽和浸透理論を用いる。

$$C \cdot \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left\{ K \cdot \left(\frac{\partial S}{\partial Z} - 1 \right) \right\} \cdots \cdots (1)$$

ここに、 S : 土壌水分吸引水頭(サクシヨン)(cm), t : 時間(sec), Z : 鉛直座標で下向きに正(cm) K : 不飽和

透水係数(cm/sec), C : 比水分容量 ($=d/dS$), θ : 体積含水率(cm/cm)

上式を岡・角屋(1979)に従って差分化し、数値解を求めた。この式を解くには体積含水率とサクシヨン S , そして不飽和透水係数 K と S の関係を知る必要があるが、これは不飽和試料の土壌水分特性の試験結果を、バンゲヌヒテン(van-Genuchten, 1978)式によりモデル化して使用した。

3.2 土壌水分特性

調査対象斜面において、表層の火山灰層を直径300mm×高さ300mmのサンプラーを用いて不攪乱の状態で採取し、直径50mm×高さ100mmの供試体を作成した。不飽和三軸圧縮試験装置を用いて、サクシヨンの載荷・除荷による間隙水の移動を測定し、含水率(θ)とサクシヨン値(ψ)の関係性を求めた。

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。飽和体積含水率 θ_s , 最小水分容量 θ_r も上記試験より求め、それぞれ0.491, 0.281とした。 n は杉井ら(1995)の提案するロジスティック曲線を応用した方法を用いて回帰分析により決定した。

3.3 土壌表面における境界条件

三宅島の新規火山灰堆積物のように、降雨強度が土の浸透能より大きく、Horton型表面流が発生する場合も多いと考えられる。よって、当モデルではこれを再現するために、一次元不飽和浸透流解析の地表面での境界条件の与え方に工夫をした。

図-1の最上段セルの上半分(斜線部分)を地表面の水分状態を表す層として考え、「地表面セル」と呼ぶ。地表面セルの浸透能を $q_{z=0.25}$ とする。表面流が発生する条件であるので、地表面セルは常に飽和していると考え、次式のようになる。

$$\psi_0 = 0 \cdots \cdots (2) \quad kr_{0.25} = ks \cdots \cdots (3)$$

$$q_{z=0.25} = -kr_{0.25} \left(\frac{\psi_{0.5} - \psi_0}{\Delta z/2} \right) + kr_{0.25} \\ = -ks \left(\frac{\psi_{0.5} - 0}{\Delta z/2} \right) + ks = -ks \left(\frac{2\psi_{0.5}}{\Delta z} - 1 \right) \cdots \cdots (4)$$

キーワード: 細粒火山灰, 土壌水分特性, 浸透モデル, 三宅島

連絡先: 茨城県つくば市南原 1-6 TEL: 029-879-6785 FAX: 029-879-6729

ここに、 ψ_0 ：地表面のサクシオン値、 $kr_{0.25}$ ：地表面セルにおける透水係数、 ks ：飽和透水係数である。

以上より、降雨量から同じ時刻の浸透流量を差し引いた余剰量が Horton 型の表面流としてみなせると考え、以下のように表すことができる。

$$q_{out} = r(t) - q_{zin} \quad \dots (5)$$

ここに、 q_{out} ：表面流量、 $r(t)$ ：降雨量、 q_{zin} ：地表面への浸透量

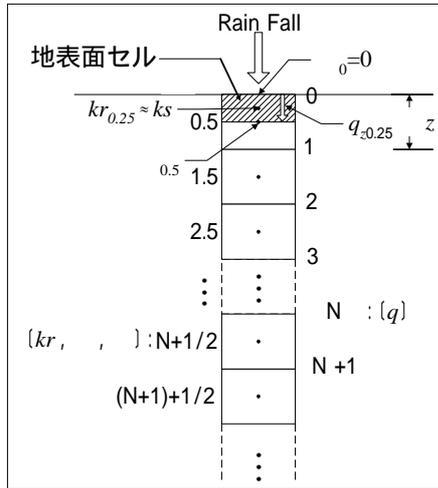


図 - 1 浸透モデル概念図

4. 流出モデルの適用

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。流出計算は観測斜面を対象とした。表面流は Manning 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。表面流流出過程の基礎方程式を下記に示す。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = r(t) - q_{zin} \quad \dots (6)$$

$$q_s = \alpha A^{5/3} \quad \dots (7) \quad \alpha = \frac{1}{n} \cdot i^{1/2} \quad \dots (8)$$

ここに、 A ：単位幅あたりの流水断面積、 q_s ：単位幅あたりの流量、 n ：粗度係数、 i ：斜面勾配 である。

図 - 2 に観測された降雨をそのまま入力した場合の計算結果を、図 - 3 に次元不飽和浸透計算により求めた

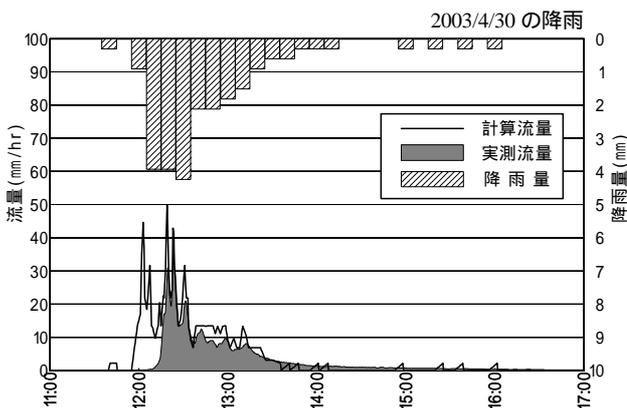


図 - 2 流出モデル適用結果（降雨を直接入力）

表面流量を入力した場合の計算結果を示す。

前者(図 - 2)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(図 - 3)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。

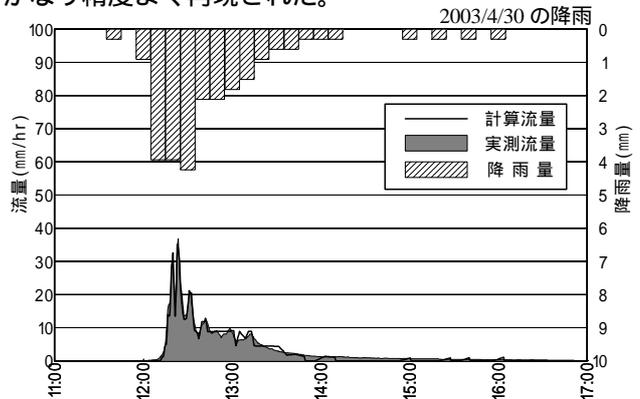


図 - 3 流出モデル適用結果
(表面流発生モデルによる結果を入力)

5. まとめ

これまで、火山灰堆積斜面で発生するホートン流を実測し、物理的な意味付けの明瞭な浸透モデルによって高精度に実測流量を再現した事例は報告されていない。ここで提案した表面流流下過程を組み込んだモデルは、雨水の土層内での浸潤に伴う浸透能の時間変化をよく再現し、斜面からの流出ハイドログラフも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、斜面レベルの降雨流出現象を再現することができた。

参考文献

竹島秀大, 石田哲也, 山越隆雄, 渡正昭(2003)：2000年に噴出した三宅島での堆積火山灰の土壌水分特性, 平成15年度砂防学会研究発表会概要集, p.232-233
 山越隆雄, 石田哲也, 竹島秀大(2003)：三宅島の新規細粒火山灰堆積物における雨水浸透過程モデル化の試み, 土木学会第58回年次学術講演会概要集, p.353-354
 Richards, L.A. (1931)：Capillary conduction of liquids through porous mediums, Physics, Vol.1, pp.318~333
 岡太郎・角屋睦(1979)：裸地斜面における雨水の侵入と地下水流出(2) 流出モデルへのアプローチ, 京都大学防災研究所年報, 第17号B, pp.523-533
 van Genuchten, R(1978)：Calculating the Unsaturated Hydraulic Conductivity with a New Closed-form Analytical Model, Res. Rep., Princeton Univ., Princeton, 1978
 杉井俊夫・宇野尚雄(1995)：新しい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.130-131