

降灰厚が最終浸透能に与える影響

○高山翔揮¹⁾, 平田有星²⁾, 藤本将光²⁾, 林祐妃³⁾, 福山泰治郎⁴⁾, 中谷加奈¹⁾

1)京都大学防災研究所

2)立命館大学理工学部, 3)立命館大学衣笠総合研究機構

4)信州大学農学部

1. はじめに

火山灰被覆斜面を対象とした現地浸透能試験、室内実験、降雨流出解析の結果は、降灰厚の増加に伴い最終浸透能が低下することを示唆するが(例えば、近藤ら, 2017; 平岡ら, 2022; 菅原・権田, 2025)、そのメカニズムは十分に明らかになっていない。本研究では、火山灰と土壌からなる二層の鉛直浸透シミュレーションにより、降灰厚が最終浸透能に与える影響を定量的に評価するとともに、そのメカニズムの解明を試みる。さらに、降灰厚に応じた最終浸透能を低計算コストで安定的に算定可能な近似解法を提案する。

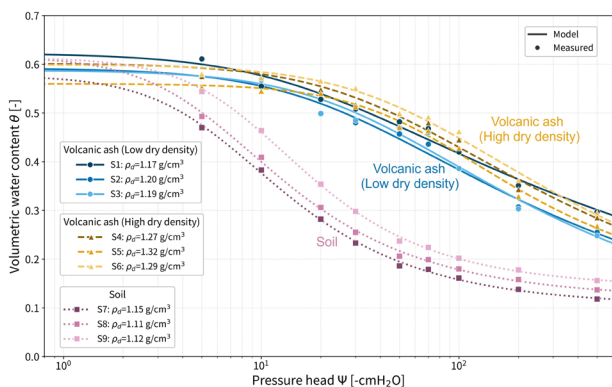


図-1 水分特性曲線 (点: 試験値、線: van Genuchten モデルのフィッティング結果)

表-1 van-Genuchten モデルでフィッティングされたパラメータの値

Sample type/name	θ_s	θ_r	α (1/cm)	n	
Volcanic ash (low dry density)	S1	0.62	0.00	0.061	1.21
	S2	0.59	0.00	0.044	1.27
	S3	0.59	0.00	0.033	1.31
Volcanic ash (high dry density)	S4	0.60	0.00	0.027	1.29
	S5	0.56	0.12	0.017	1.52
	S6	0.60	0.00	0.019	1.32
Soil	S7	0.58	0.10	0.171	1.77
	S8	0.62	0.12	0.186	1.73
	S9	0.61	0.14	0.119	1.84

2. 土質試験

2014年9月27日御嶽山噴火により噴出して同年11月27日に採取された火山灰試料と、焼岳・足洗谷流域で採取した土壌試料を対象として、保水性試験(加圧板法)および変水位透水試験を実施した。火山灰試料は、100 ccのサンプラーに乾燥状態の火山灰を自由落下させて作製した低乾燥密度の試料を3つ、締めながら作製した高乾燥密度の試料を3つ準備した。また、土壌試料も3つ用意した。

火山灰試料の水分特性曲線は土壌試料と比較して、圧力水頭が0 ~ -50 cmH₂Oの範囲では体積含水率の傾きは緩やかで保水性は小さい(図-1、表-1)。圧力水頭が-50 ~ -500 cmH₂Oの範囲では体積含水率の傾きが急で保水性は大きい。また、火山灰試料は土壌試料よりも飽和透水係数が2~3オーダー小さい(表-2)。火山灰試料の乾燥密度の違いが保水性、飽和透水係数に与える影響は小さい。

3. 鉛直浸透シミュレーション

多孔質媒体内の水分、熱、溶質の移動に関する1次元数値解析ソフトウェアHYDRUS-1Dを用いて、火山灰(上層)と土壌(下層)からなる二層の鉛直浸透シミュレーションを行った(図2)。火山灰および土壌の飽和透水係数と保水性パラメータは本研究の土質試験の結果(表-1、表-2)を使用した。上端の境界条件は、"Atmospheric BC with Surface

表-2 変水位透水試験の結果

Sample type/name	ρ_d (g/cm ³)	K_s (mm/hr)	Average (mm/hr)	
Volcanic ash (low dry density)	S1	1.17	1.6	27.2
	S2	1.20	79.2	
	S3	1.19	0.9	
Volcanic ash (high dry density)	S4	1.27	4.9	27.6
	S5	1.32	68.2	
	S6	1.29	9.9	
Soil	S7	1.15	3316.5	3468.4
	S8	1.11	4926.0	
	S9	1.12	2162.6	

ρ_d : 乾燥密度, K_s : 飽和透水係数

Run Off”に設定し、上端部の圧力水頭が負圧の時は降雨強度のフラックス境界となり、上端部の圧力水頭が飽和に達すると、表流水は瞬時に流出すると仮定して、圧力水頭ゼロの圧力境界条件に切り替わる。下端の境界条件は、”Free Drainage”に設定し、圧力勾配ゼロの条件を与える。初期条件は、 $-100 \text{ cmH}_2\text{O}$ の圧力水頭を空間的に均一に与えた。

図-2には、全長 500 mm の二層土層を対象に、火山灰厚 L_1 を 10.25 mm と設定し、降雨強度 300 mm/hr の一定降雨を与えた場合の、地表面からの浸透速度の時間変化を示す。初期に降雨の全量 (300 mm/hr) が地表面から浸透するが、その後、浸透速度は急激に低下し、一定値に収束する。本研究はこの定常状態の浸透速度を最終浸透能と定義した。

火山灰の厚さ L_1 を 0~500 mm の間で変化させた条件下のシミュレーションにより、火山灰厚 L_1 の増加に伴い、最終浸透能は土壌の飽和透水係数から火山灰の飽和透水係数へと急激に低下することが示された (図-3)。火山灰が十分に厚い場合、火山灰層上部に飽和帯が形成され、圧力勾配がゼロとなるため (図-4a)、最終浸透能は火山灰の飽和透水係数に一致する。一方、火山灰が薄い場合、火山灰層上部に飽和帯が形成されず圧力勾配が生じるため (図-4b)、最終浸透能は火山灰の飽和透水係数より大きな値をとる。この現象は、圧力水

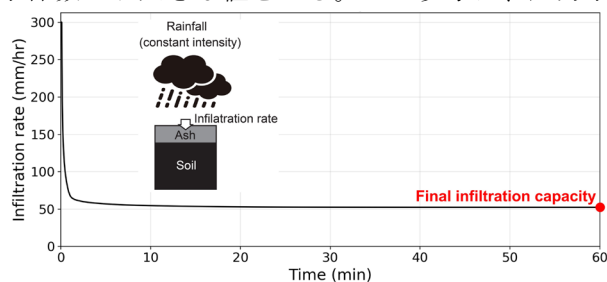


図-2 鉛直浸透シミュレーションの概要図

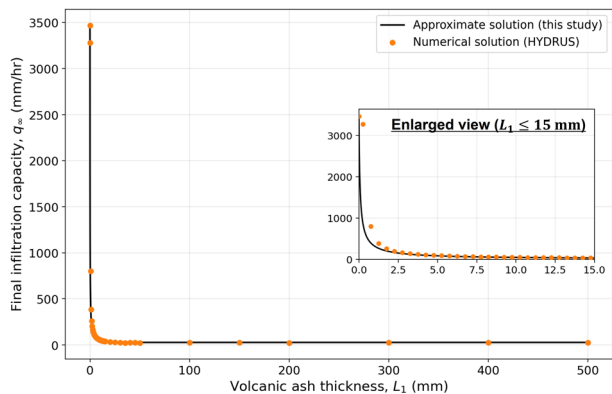


図-3 降灰厚と最終浸透能との関係の計算結果

頭が火山灰と土壌の境界で連続的に減少するため、遷移に必要な厚さより火山灰層が薄い場合には層上部が飽和に達しないことに起因する。

4. 最終浸透能の近似解法

遷移帯における圧力水頭分布を線形近似すると (図-5)、飽和帯、遷移帯、土壌における定常状態の浸透速度 q_∞ は次式で表される。

$$q_\infty = K_{s1} \quad (\text{Saturation zone})$$

$$q_\infty = \frac{\int_{L_s}^{L_t} K_1(\psi(z)) dz}{L_t} \left(1 - \frac{\psi(L_1)}{L_t} \right) \quad (\text{Transition zone})$$

$$q_\infty = K_2(\psi(L_1)) \quad (\text{Soil})$$

ここに、 K_{s1} は火山灰の飽和透水係数、 $\psi(z)$ は地表面からの深さ z の圧力水頭、 $K_1(\psi(z)) \cdot K_2(\psi(z))$ は火山灰・土壌の不飽和透水係数、 $L_s \cdot L_t \cdot L_1$ は飽和帯・遷移帯・火山灰の厚さである。上式の未知数は q_∞ 、 $\psi(L_1)$ 、 L_t の 3 つであり、式の数も 3 つであるため数値的に解ける。定積分に Gauss-Legendre 求積を使用し、反復計算は二分法を適用した。

本近似解法による最終浸透能は、HYDRUS-1D に比べて火山灰厚 1 mm 以下では 100 mm/hr 以上過小評価する一方、5 mm 以上では差は 10 mm/hr 以下となり、火山灰厚の増加に伴い差は減少した (図-3)。参考文献：近藤ら, 2017, 平成 29 年度砂防学会概要集, Pa-96; 平岡ら, 2022, 令和 4 年度砂防学会概要集, R5-10; 菅原・榎田, 2025, 令和 7 年度砂防学会概要集, P-018

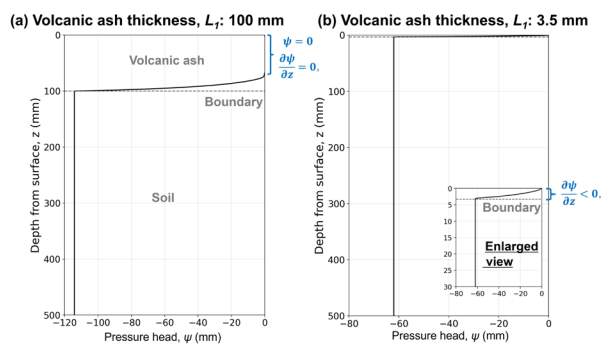


図-4 定常状態の圧力水頭分布に関する数値解。

(a) 降灰厚 100 mm. (b) 降灰厚 3.5 mm

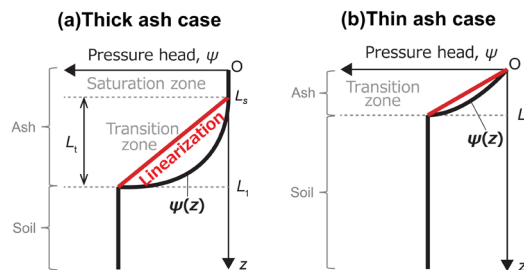


図-5 遷移帯の圧力水頭分布の線形近似