

飽和-不飽和浸透流解析による火山灰堆積斜面の降雨浸透特性の評価

鉄道総合技術研究所 正会員 ○倉上 由貴 正会員 松丸 貴樹

1. はじめに 現地調査により火山灰の堆積が降雨浸透能を低下させ表面流や土石流発生の危険性を高めることが知られている^{例え1)}。要素試験規模では火山灰が浸透可能な降雨強度を低減させることが明らかとなっている²⁾。著者らは、火山灰で被覆された斜面の降雨浸透特性を把握するために粒度分布の異なる火山灰を異なる厚さで模型斜面に堆積させ、降雨散水実験により浸透特性の変化を検討している³⁾。本論文では降雨散水実験の再現計算を飽和-不飽和浸透流解析により行うが、地盤の透水係数の異方性や降雨の浸透率の時間変化に着目し、火山灰及び火山灰の粒径・堆積厚が降雨浸透特性に及ぼす影響を実験で得られた遮水率を基に降雨強度で評価した。

2. 模型実験で得られた知見 模型斜面を用いた降雨散水実験では、水平より 26 度傾斜させた長さ 1708mm の土槽内に、珪砂 6 号を用いて厚さ 120mm の斜面地盤を作製し、地盤表面に火山灰を散布した。模型実験の詳細は前報³⁾を参照されたい。実験ケース及び実験から得られた火山灰の遮水率を表-1に示す。実験で用いた火山灰は図-1に示す通り、2017～18 年の火山活動のあった新燃岳周辺で採取した細粒・粗粒な火山灰の 2 種類の火山灰を使用し、火山灰堆積厚さを変化させて実験を実施した。降雨強度は Case0 において 24mm/hr、その他ケースは 20mm/hr を目標とした一定降雨を設定した。実験により、粗粒な火山灰では灰厚が浸透能に殆ど影響を与えず、降雨の遮水率も一定値を示す。一方、細粒な火山灰では灰厚が厚くなるほど降雨遮水率が上昇し、降雨浸透が低下している。火山灰の堆積厚さに着目すると、降雨により火山灰の流出のみならず、火山灰の体積圧縮(密度増加)していることが示唆された。また、火山灰層が降雨水を保持している可能性も示された。

3. 浸透流解析概要 火山灰がもたらす浸透特性を把握するために飽和-不飽和浸透流解析を実施した。解析モデルは図-2に示す通り、模型実験と同寸法の斜面とし、実験土槽と同様に土層底面に設置された高さ 80mm の仕切り版を非排水境界としてモデル化した。実験土槽では土槽下面からの流出水を 100mm 間隔で集水するために各仕切り内に集水孔が設けられている。解析では浸出点境界を設定することで集水孔をモデル化し、各底面からの浸透量を求める。地盤材料として模型実験と同様に珪砂 6 号の物性値(飽和透水係数 0.425m/s)を与えた。不飽和浸透特性に関しては珪砂 6 号の保水性試験及び不飽和透水試験により得られた試験値を用いた。本解析では火山灰層を直接的に有限要素でモデル化するのではなく、火山灰の特性を実験で得られた遮水率を基に降雨強度で(降雨の浸透率)で考慮することとし、表-2のとおり実験で得られた概ねの浸透率毎に解析 Series を区分けした。また、飽和透水係数は、Y 方向の係数 k_y を 1.0 と固定し、X 方向の係数 k_x を実験で得られた底面からの浸透分布と整合が取れるように設定している(表-2)。降雨の与え方は下記のとおり 2 パターン設定した。①実験における浸透率より求

表-1 実験ケース及び結果のまとめ

実験 Case	火山灰種類	降雨強度 [mm/hr]	平均堆積厚さ [mm]		遮水率 [%]
			実験前	実験後	
0	-	24.8	-	-	6
1-1	細粒火山灰	21.6	3.0	2.0	23
1-2		20.1	5.1	4.2	55
1-3		21.7	6.3	5.2	80
2-1	粗粒火山灰	23.2	2.3	1.5	23
2-2		22.8	3.8	3.2	22
2-3		21.9	8.8	7.8	20

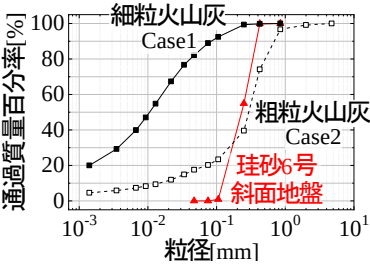


図-1 粒度分布

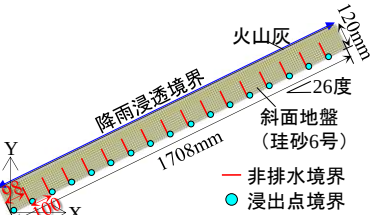


図-2 解析モデル図

表-2 実験ケース及び結果のまとめ

解析 Series	遮水率 [%]	浸透率 [%]	降雨強度 [mm/hr]		実験 Case	k_x
			一定	段階的		
A	6	100	24	-	0	0.24
B	23	約 80	16	20→16	1-1	0.05
	23				2-1	
	22				2-2	
	20				2-3	
C	55	約 50	10	20→10	1-2	
D	80	約 20	4	20→4	1-3	

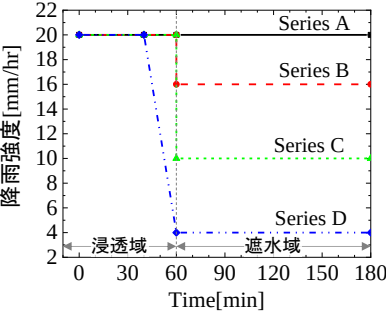


図-3 段階的降雨における降雨強度の設定

キーワード 火山灰, 浸透, 斜面, 降雨散水実験, 飽和-不飽和浸透流解析
連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 TEL 042-573-7261

めた一定降雨と、②図-3 に示すように降雨強度を段階的に低下させた段階的降雨である。段階的降雨のパターンでは図-3 に示す通り、地盤内が飽和状態に達するまでの浸透域では 20mm/hr とし、その後、遮水域とし降雨強度を段階的に低下させた。

4. 浸透流解析の結果及び考察

(1) 定常時の浸透流分布 (k_x の設定について) : 水平方向の透水係数 k_x を設定するために定常時における土槽底面からの流出量分布を実験値と解析値と比較検討をした。図-4 には Series A (解析値) と Case0 (実験値) の定常時における土槽底面からの流出量分布を示す。ここで、 k_x は k_y と同等の 1.0 を設定すると土槽下端部では実験時の 2 倍程度流出しており、流出量分布が偏っていることがわかる。本解析では $k_x=0.24$ と設定することにより、実験結果を概ね再現できた。 k_x が総浸透流量に影響を及ぼさないこと及び適切な k_x の設定によりモデルの妥当性が確認された。火山灰を散布した例として、Series B の流出量分布を図-5 に示す。火山灰なしの Series A で設定した $k_x=0.24$ とすると、Series A と同様に、土槽下端部からの流出量が倍増した。そのため、火山灰を散布した Series B, C, D では実験値と整合が取れた $k_x=0.05$ を設定した。これより、火山灰により斜面地盤内部の透水性の異方性に影響を及ぼす可能性が示唆された。

(2) 降雨強度による火山灰浸透特性の評価 : 模型実験では一定降雨量を与えているが火山灰により浸透特性は異なった。一定降雨強度を与えた場合の総浸透流量の時間変化を図-6 に示す。火山灰なしの Series A では実験結果を概ね再現できている。一方、火山灰ありの Series B, C, D は定常時における浸透流量は概ね一致しているが、解析結果では実験結果よりも遅れが生じていることが分かる。これより、火山灰の浸透能の低下は不飽和状態である初期段階から発生していないことが示唆された。そこで、図-3 に示す通り、地盤内が飽和状態に達するまでは実際の降雨強度 20mm/hr を設定し、概ね飽和状態に達してから降雨強度を段階的に低下させる。総浸透流量の結果を図-7 に示す。このように降雨強度を段階的に下げることにより概ね整合が取れた。粗粒火山灰では、堆積厚さによらず一定の遮水量を示したが、細粒火山灰では、堆積厚さが増すに従って遮水量も増加した。Series D (細粒火山灰厚 6.3mm) では浸透可能な降雨強度が 20mm/hr から 4mm/hr まで低減した。このように斜面に堆積された火山灰は浸透特性が降雨途中で変化することが確認された。火山灰の含水に伴う体積圧縮が生じていることや、火山灰層が水を保持していることに起因すると考える。

5. まとめ 火山灰分布により斜面地盤内部の浸透状況にも影響を及ぼす可能性が示唆された。また、実験・解析結果より、火山灰の堆積圧縮や含水状態に伴い浸透特性が変化することが確認された。解析結果より、火山灰の影響を透水係数の異方性の設定と、浸透率の変化だけで火山灰被覆斜面の降雨浸透を再現できることが示された。今後、不飽和浸透特性等の火山灰層のモデル化も含めて検討する予定である。

参考文献 1) 池谷浩：雲仙・水無川の土石流発生機構について，砂防学会誌（新砂防），Vol.47, No.2, pp.15-21, 1993. 2) 野村ら：三宅島・有珠山・桜島の火山灰の物理特性の比較検討，砂防学会誌，Vol.55, No.6, pp.3-12, 2003. 3) 松丸ら：灰厚および粒度分布に着目した火山灰被覆斜面の降雨散水実験，地盤工学研究発表会，Vol.54, 2019（印刷中）。

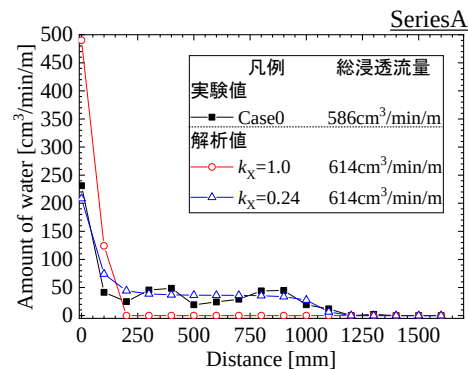


図-4 定常時の土槽底面からの流出量 (Series A)

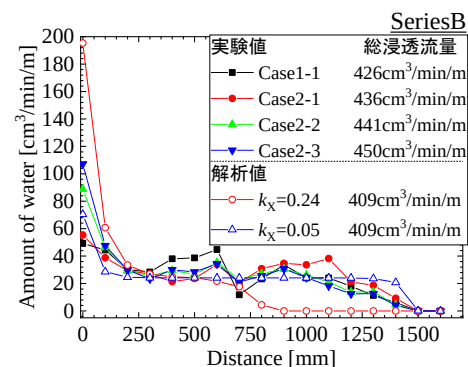


図-5 定常時の土槽底面からの流出量 (Series B)

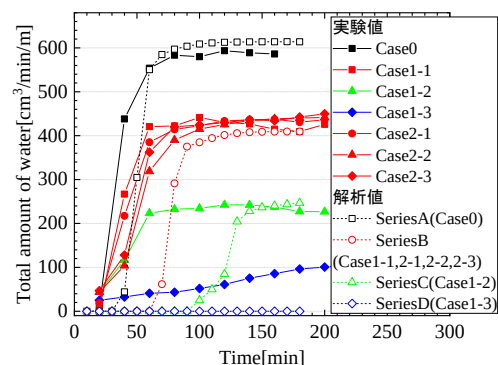


図-6 総浸透流量の時間変化 (一定降雨)

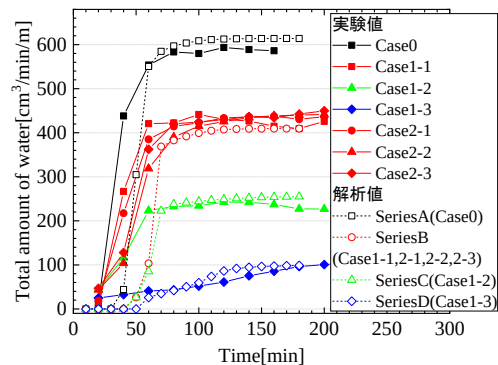


図-7 総浸透流量の時間変化 (段階的降雨)