

# 降灰を受けた斜面の降雨時安定性評価法

倉上 由貴\* 松丸 貴樹\* 杉山 健太\*  
川越 健\*\* 河村 祥一\*\*

Evaluation Method for Rainfall Stability of Natural Slope Deposited with Volcanic Ash

Yuki KURAKAMI Takaki MATSUMARU Kenta SUGIYAMA

Takeshi KAWAGOE Shoichi KAWAMURA

Volcanic ash deposited on slopes by volcanic eruption causes changes of rainfall seepage into the slope, the volcanic ash outflow, and increase of the risk of mud flow. In this study, rainfall seepage of the slope deposited with volcanic ash is evaluated by rainfall infiltration tests and we propose the numerical modelling of seepage characteristics of volcanic ash used for seepage analysis. Rainfall infiltration tests show that the rainfall seepage on the slope with volcanic ash depends on the size and thickness of deposited ash. On the basis of the results of rainfall infiltration tests, the modeling is proposed where permeability coefficient decreases according to the increase of water content. The model shows that changes in rainfall seepage on slopes deposited with volcanic ash can be well evaluated.

キーワード：火山灰，斜面，降雨浸透，不飽和浸透特性，火山灰粒径，飽和 - 不飽和浸透流解析

## 1. はじめに

我が国は世界有数の火山地帯に属する。活動が活発な活火山も多く存在し、21世紀に入ってから2004年浅間山、2011年新燃岳、2014年御岳山等で噴火が発生している。火山噴火時には火山灰が斜面へ降灰することで、図1に示すように斜面への降雨浸透が生じにくくなるとともに、表面流が増加することで泥流・土石流発生の危険性が高まることが知られている<sup>1)</sup>。降灰後の斜面において土石流が発生した事例として、1707年富士山宝永噴火、1914年桜島大正噴火、1977年有珠山噴火、1990年雲仙普賢岳噴火が挙げられる。例えば、富士山宝永噴火<sup>2)</sup>では、大量の降下火砕物が冬の強い季節風に乗って遠方にまで降り積もった。図2に当時の火山灰の堆積厚分布を示すが、降灰の影響は千葉県や埼玉県など関東地方にまで及んでおり、灰厚が10cm以上となった地域では土石流が繰り返し発生した。また、雲仙普賢岳の噴火では、大規模な土石流が発生し、火口より約7km離れた位置にある島原鉄道（水無川流域）が埋没した<sup>3)</sup>。このように火山の噴火に伴う降灰が発生した場合には、長期間・広範囲にわたって降雨に伴う影響が生じている。

これまで、火山灰が斜面に堆積したことによる土石流の発生メカニズムは上述の災害事例の調査も含めて考察がなされている。しかしながら、要因となる浸透能の低下に着目した検討は要素試験レベルの検討に留まるものが多く、斜面への降雨浸透の変化として捉えた研究は、ほとんど実施されていない。

\* 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室

\*\* 防災技術研究部 地質研究室

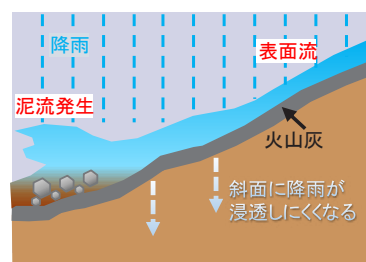


図1 火山灰が堆積した斜面における泥流

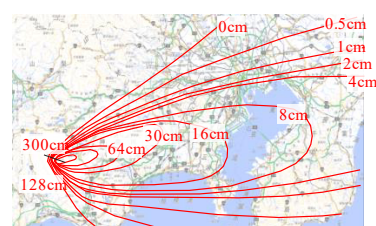


図2 富士山宝永噴火による降灰分布<sup>2)</sup>

出典：国土地理院ウェブサイト

そこで本研究では、降灰した火山灰で被覆された斜面の降雨浸透挙動を解明するとともに、降雨時の火山灰及び斜面表層地盤の安定性を評価することを試みた。まず、模型斜面に火山灰を散布した降雨散水実験により、降灰斜面における降雨浸透挙動の解明を行った。次に、実際の斜面に火山灰を散布し、長期の動態観測により斜面に堆積した火山灰が、実際の降雨において斜面内部への浸透に及ぼす影響を検討した。最後に、実験で得られた知見をもとに火山灰の浸透特性に関する解析モデルを提案し、飽和 - 不飽和浸透流解析を行うことでモデルの妥当性の検証を行うとともに、実斜面の降灰後の降雨に対する安定評価を試みた。

## 2. 降灰斜面の降雨散水実験

### 2.1 降雨散水実験の概要

斜面模型の概要を図3に示す。実験土槽は、長さ1708mm、奥行395mmである。この土槽内に斜面となる地盤を構築し、表層に火山灰を散布した。地盤模型の作製後に実験土槽を水平より26度(1:1.2勾配)に傾けることで斜面への降雨散水を模擬した。実験土槽には、土槽底面に高さ80mmの仕切り板を長手方向に100mm間隔で設置し、各仕切り内に集水孔を設置することで土槽下面からの流出水が集水可能な構造とした。また、実験土槽の左端は開口しており、開口部に多孔質版を設置することで、斜面内を浸透し土槽左端から排出される側方排水量の測定が可能な構造とした。また、土槽左端では、火山灰を含む表面水量も計測できる形とした。

表1に実験条件として、火山灰の有無と種類、火山灰の厚さ(灰厚)、与えた降雨強度を示す。斜面地盤は、透水性の高い地盤として珪砂6号( $\rho_d=1.43g/cm^3, w=12\%$ )と、

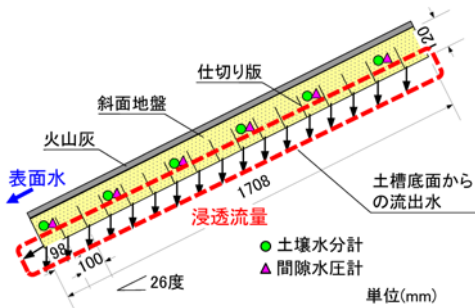
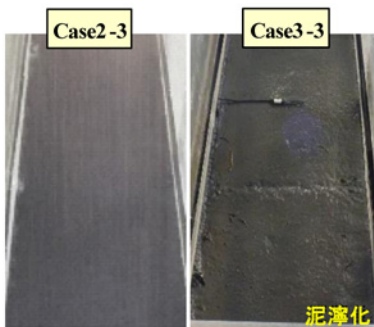


図3 実験模型の概要

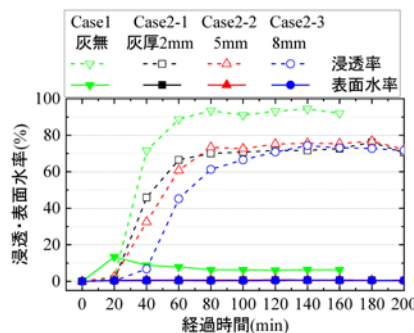
表1 実験条件

ケース番号	地盤	火山灰種類	灰厚(mm)	降雨強度(mm/hr)
1	Case1	なし	-	24
2	Case2-1 Case2-2 Case2-3	珪砂6号 透水性高い	桜島 (粗粒)	2
				5
				8
3	Case3-1 Case3-2 Case3-3	新燃岳 (細粒)	2	
			5	
			8	
4	Case4-1 Case4-2	稲城砂 透水性低い	なし	
			桜島 (粗粒)	5
				20→40
				20→40

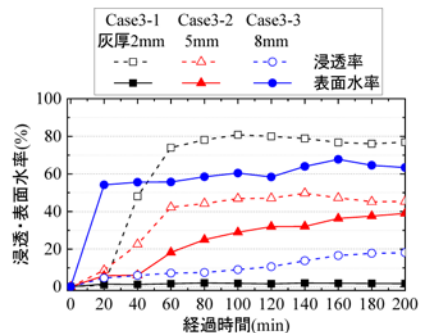


(a) Case2-3 (b) Case3-3

図4 20mm/hr降雨の様子



(a) Case1, Case2



(b) Case3

図5 浸透率及び表面水率の時刻歴

透水性の低い地盤として稲城砂 ( $\rho_d=1.65g/cm^3, w=16\%$ ) の2種類を用いた。火山灰は、桜島と新燃岳の火山噴火時に周辺にて採取した火山灰を用いた。桜島の火山灰よりも新燃岳の火山灰の方が粒径が細かいため、本論文では、桜島で採取した火山灰を粗粒火山灰、新燃岳で採取した火山灰を細粒火山灰と表記する。Case1～Case3は透水性の高い地盤を対象とし、Case1では火山灰なしの地盤のみとし、Case2, Case3ではそれぞれ粗粒・細粒の火山灰を散布した。火山灰を散布したCase2, Case3では、表1に示すように火山灰の厚さ(灰厚)を増加しながら計3試番の降雨散水を実施した。Case4では透水性の低い地盤を対象とし、Case4-1は火山灰なしの地盤のみとし、Case4-2では粗粒火山灰を散布した。

降雨散水は、緩慢な降雨の浸透を再現するため降雨強度を20mm/hとし、各ケース・試番で定常状態が得られるまで散水を継続した。ただし、透水性の低い地盤を対象としたCase4-1, 4-2では、20mm/hの降雨で定常状態となった後に、降雨強度を40mm/hとした。降雨散水実験中には、表面水量及び土槽底面から排出される浸透流量を15～20分間隔で計測した。また、各試番の実験前後でレーザー変位計により火山灰の灰厚を計測した。

### 2.2 実験結果および考察

#### 2.2.1 火山灰の粒径と灰厚の影響

Case1～Case3の実験結果をもとに、火山灰の粒径及び灰厚が降雨浸透特性に及ぼす影響を考察する。図4に、Case2-3, Case3-3のときの降雨実験時の斜面表層の状況を示す。火山灰の流出は多少生じているものの、侵食等は発生していないことが確認できる。ただし、Case3-3の細粒火山灰を用いたときには、侵食は発生していないものの、図4(b)のように火山灰層がモルタル状に凝固・泥濘化している様子が見られた。火山噴火時に採取した火山灰の化学成分を調べると、少量ではあるがセメントの主成分である酸化カルシウム(CaO)が含まれている。このため、火山灰が降雨を受けるとモルタル状に凝固することが、浸透率が低下する一因として考えられる。

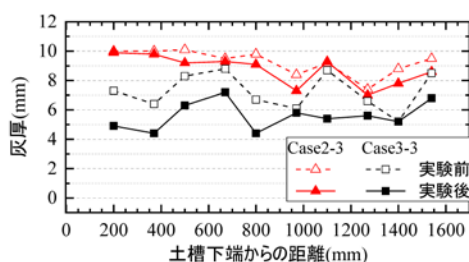


図6 実験前後の灰厚分布 (Case2-3,3-3)

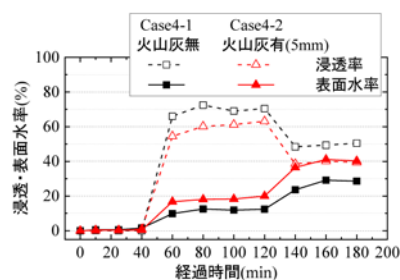


図7 浸透率及び表面水率の時刻歴

図5に浸透率・表面水率の時刻歴を示す。ここでの浸透率は、流入量 (= 降雨強度×土槽面積) に対する浸透流量の割合であり、浸透流量は、土槽の各底面及び土槽の左端より得られた排水量の総和とした。表面水率も同様に流入量に対する表面水量の割合としている。斜面地盤のみの Case1 では、表面水がほとんど発生せず、降雨の約95%が斜面内に浸透する状況であった。粗粒火山灰を散布した Case2 では、灰厚によらず浸透率は約80%とほぼ一定の値となっており、表面水は殆ど生じていなかった。細粒火山灰を散布した Case3 では、灰厚の小さい Case3-1 では80%近い浸透率を示していたが、試番2・3と灰厚が大きくなるに従って浸透率が低下し、表面水率が増加していることがわかる。

また、図6に Case2-3, Case3-3 の降雨散水前後における灰厚の斜面方向の分布を示す。両ケース共に実験終了時に灰厚が薄くなっており、特に細粒火山灰を用いた Case3-3 では、灰厚が降雨散水開始前に対して2~3mmの減少が見られた。また、降雨散水前後で火山灰層の乾燥密度を測定したところ、Case2では降雨散水前後で0.56g/cm<sup>3</sup>から1.00g/cm<sup>3</sup>に、Case3では0.12g/cm<sup>3</sup>から0.90g/cm<sup>3</sup>まで密度が増加しており、火山灰層が降雨を受けて体積圧縮したものと考えられる。

### 2.2.2 斜面地盤の透水性の影響

Case4の実験結果をもとに、透水性の低い斜面地盤での降雨浸透に対する火山灰の影響を考察する。図7に Case4-1, Case4-2 の実験で得られた浸透率・表面水率の時刻歴を示す。稲城砂地盤のみの Case4-1 では、20mm/hr の降雨の浸透率は約70%であり、40mm/hr の降雨では浸透率が約50%に低下した。一方、粗粒火山灰が堆積

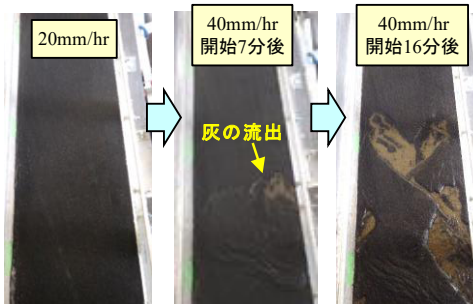


図8 Case4-2の様子

した Case4-2 では、20mm/hr での浸透率が60%程度、40mm/hr では40%となっており、Case4-1と比較して火山灰によって浸透率が減少し、表面水率が増加していることが分かる。また、図8に、Case4-2で20mm/hrおよび40mm/hr降雨実験時の斜面表層の状況を示す。Case4-2では、40mm/hr降雨時に火山灰の流出が発生していた。斜面のみの Case4-1では、40mm/hrの降雨においても斜面は安定していたことから、斜面に火山灰が堆積することで火山灰を含む斜面表層地盤の降雨に対する安定性が低下することがわかった。

### 2.2.3 火山灰堆積斜面における降雨浸透のまとめ

各ケース・試番の試験で与えた降雨強度と、得られた浸透能の時刻歴を図9に示す。ここで、浸透能は総浸透流量を斜面面積で除することにより算出している。透水性の高い地盤のみ (Case1) の定常状態における浸透能は、与えた降雨強度にほぼ等しかったが、粗粒火山灰を用いた Case2 では、灰厚の大きさによらずに定常状態における浸透能は18mm/hr程度にとどまった。一方、細粒火山灰を用いた Case3 では、灰厚が厚くなるにつれて浸透能が減少し、灰厚8mm (Case3-3) の定常状態における

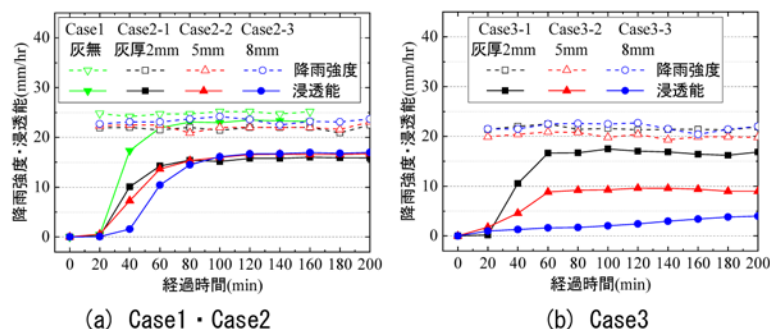


図9 浸透能の時刻歴

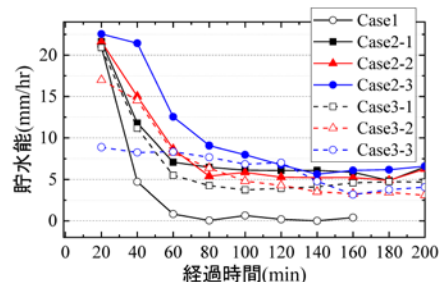


図10 貯水能の時刻歴

浸透能は4mm/hrにとどまった。

以上のように、斜面上に緩く堆積した火山灰は降雨に伴う含水によって体積圧縮を生じること、モルタル状に凝固することから浸透能が低下することが降雨散水実験より明らかとなった。

図10はCase1～3の貯水能の時刻歴を示す。貯水能は、浸透量と表面水量の和を流入量から引いた値を土槽の面積で除した値として算出し、時刻歴として整理したものである。Case1ではゼロに近い値となり、降雨散水された全量が斜面側では表面水と浸透水になっている。ところが、他のケースではいずれの場合も4～5mm/hrの貯水能が存在しており、火山灰層自体あるいは火山灰層とその下部で水が保持されている可能性が考えられる。

### 3. 実斜面を対象とした長期計測

#### 3.1 計測概要および計測条件

試験を実施した斜面は鉄道総研の盛土試験場内に構築した試験盛土（高さ3.0m、のり面勾配は1：1.5）ののり面である。



図11 火山灰散布領域及び土壌水分計の埋設位置



図12 のり面表層の火山灰の状況

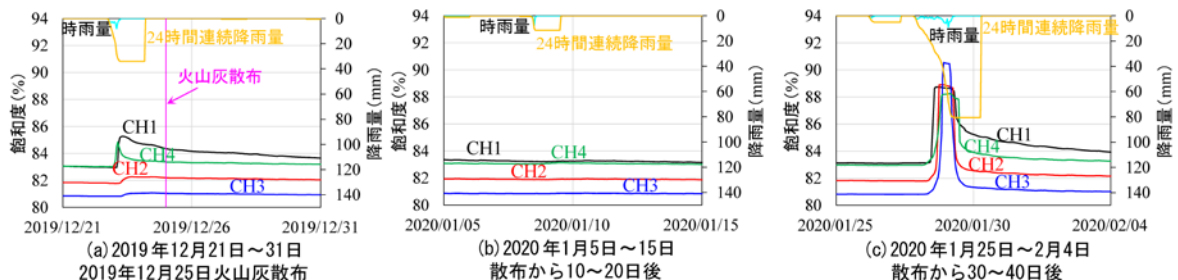


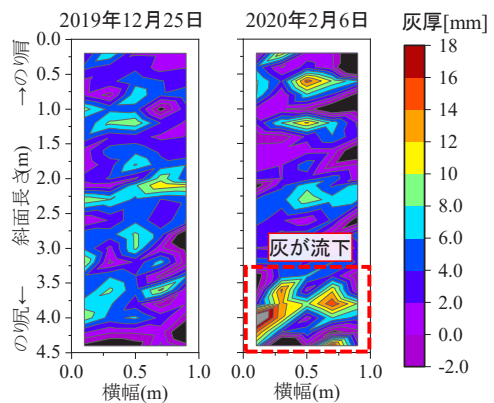
図14 盛土内部における飽和度の時刻歴

り面である。図11に火山灰の散布領域および土壌水分計の埋設位置を示す。火山灰は前述した粗粒火山灰を使用し、目標灰厚が50mmとなるように盛土のり面（図中のハッチング領域：長さ4.5m×幅1.2m）に散布した。なお、盛土材料には細粒分質礫質砂を用いて、締固め密度比が $D_c=90\%$ 程度となるように構築されており、飽和透水係数は $k=1.17 \times 10^{-4}m/s$ である。

火山灰散布前後で、図11に示した4か所の土壌水分計の長期計測を行った。土壌水分計はいずれも表層から0.5mの深度に埋設している。また、火山灰を散布後にレーザー距離計を用いて定期的に火山灰の灰厚を測定した。

#### 3.2 計測結果および考察

図12は、火山灰を散布したのり面の時間経過に伴う状況の写真である。火山灰は2019年12月25日に散布し、2020年1月10日の写真が示すように、散布後しばらくの期間は火山灰が斜面上に堆積していた。その後、降雨や風などの気象の影響を受け、36日を経過した2020年1月30日時点ではのり面上部の火山灰は下方に流出し、のり面下部ではリル（表層が削られてできた細い溝）が形成されていた。なお、火山灰散布後から約1ヶ月間での最大の降雨量は時間雨量9mm/hr、積算雨量は110.5mmであった。図13に火山灰の灰厚のコンター図を示す。コンター図の縦軸はのり肩を原点としている。火山灰散布直後のはのり面に一様に火山灰が堆積していたが、火山灰散布から43日経過した2020年2月6日には、



(a) 火山灰散布直後 (b) 散布から43日後

図13 火山灰の厚さ

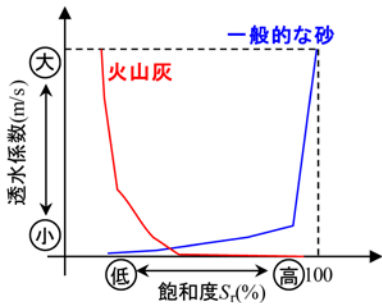


図 15 火山灰層モデル化の概念図

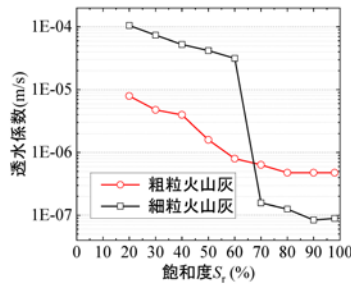


図 16 火山灰の透水係数と飽和度の関係

灰厚が斜面上部で減少し、斜面下部で増加していた。灰厚の変化からも火山灰がのり面上部から下部に流出したことが確認された。

図 14 の (a), (b), (c) ではそれぞれ、火山灰散布時、散布から 10～20 日後、散布から 30～40 日後の地盤中の飽和度と降雨量を示す。火山灰散布前は (a) に示すように少量の降雨でも飽和度が上昇していたが、(b) の火山灰散布 16 日後では (a) 期間と同等の降雨では飽和度の上昇は生じなかった。この期間は斜面が火山灰で被覆されることで降雨浸透が抑制されていた。ところが、(c) の期間においては再び飽和度の上昇が観測されている。これは上述したように、火山灰の流出やリルが生じることで降雨が再び地盤内に浸透しやすくなったことが要因であると考えられる。

#### 4. 浸透流解析による降灰斜面の浸透挙動

##### 4.1 火山灰の浸透特性のモデル化の提案

これまでの検討から、火山灰は降雨に伴う含水によって体積圧縮を生じること、モルタル状に凝固することから浸透能が低下することが明らかとなった。この浸透能の低下を飽和 - 不飽和浸透流解析によって表現するために、飽和度と透水係数の関係としてモデル化することを提案する。図 15 にモデル化を行った火山灰の飽和度と透水係数の概念図を示す。一般的な土は、飽和度が高くなるにつれて透水係数も大きくなり、水が浸透しやすい状況となる。一方、噴火後、降灰により緩く降り積もった火山灰は、乾燥状態から降雨を吸水することで、火山灰の浸透能が低下していた。そのため、浸透に伴う火山灰の凝固や体積圧縮の影響による透水性の変化について、図 15 に示すように一般的な土とは反対に、透水係数が飽和度の上昇に伴って低下する形状でモデル化することとする。なお、本モデルでは火山灰のモルタル化や体積圧縮の影響を、飽和度の上昇に伴う透水係数の低下により表現しているため、降雨が止んだ後の挙動や、火山灰の流出に伴う透水性の回復を考慮していない。

##### 4.2 降雨散水実験の再現解析条件及び再現解析結果

火山灰の浸透特性のモデル化の妥当性を検証するために、飽和 - 不飽和浸透流解析により降雨散水実験の再現解析を実施した。実験土槽には高さ 80mm の仕切り版が設けられているが、解析モデルではこの範囲に非排水境界を設定することで表現した。また、実験土槽に設けられた集水孔は、解析では浸出点境界を設定することでモデル化した。解析対象ケースは、斜面地盤に排水性の高い珪砂 6 号を用いた Case1～3 とし、飽和透水係数は室内透水試験の結果から  $k=3.94 \times 10^{-4}$  m/s とした。火山灰の飽和度 - 透水係数については粗粒火山灰・細粒火山灰それぞれに対して図 16 に示す飽和度 - 透水係数関係を設定した。一般的には粒径が小さいほど透水性が低下するが、2.2.1 項で求めたように、降雨散水前の乾燥密度は、粗粒火山灰よりも細粒火山灰の方が小さい。これより、細粒火山灰では粗粒火山灰と比べて緩く堆積していることから、細粒火山灰の透水係数は粗粒火山灰の透水係数よりも大きく設定している。一方で、降雨散水後の乾燥密度は、粗粒・細粒火山灰で概ね同等の値を示したことから、粗粒火山灰と比べて細粒火山灰の方が降雨散水による凝固やより大きな体積圧縮が生じていることがわかる。そのため、飽和時の透水係数は、粒径が小さいほど透水性が低下するという一般的な概念に基づき、細粒火山灰の方が粗粒火山灰よりも小さくなるように設定している。その結果、粗粒火山灰と比べて細粒火山灰の方が、飽和度の上昇に対する透水係数の低下が大きく設定されている。水分特性曲線については、粗粒・細粒火山灰を対象とした保水性試験結果より設定した。なお、試番毎の灰厚の違いは有限要素のメッシュの大きさを変えることで考慮している。

図 17 に実験および解析で得られた降雨強度と浸透能の関係を示す。黒線は実験値の結果を、赤線は解析値の結果を示している。Case1, Case3-2 では解析で得られた浸透能は実験と同程度であり、浸透能の上昇過程や定常状態となった時の値を概ね再現できている。また、

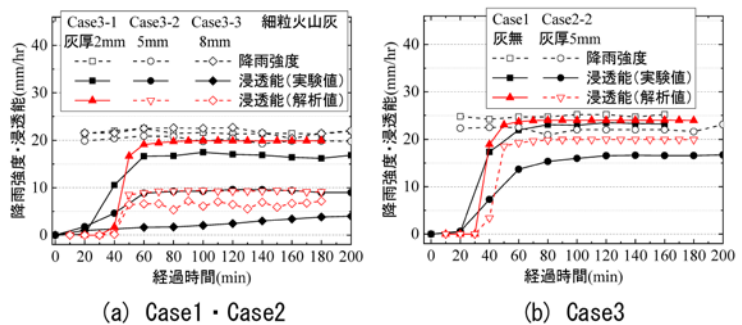


図 17 再現解析による浸透能時刻歴

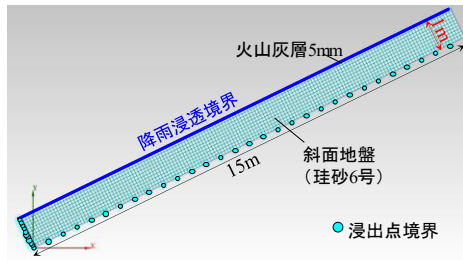


図 18 実斜面を想定した解析モデル

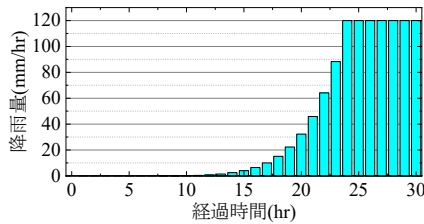


図 19 与えた降雨作用

Case2-2, Case3-1, Case3-3 においては最終浸透能に達するまでの経過時間が完全に一致していないものの、最終的な浸透能は概ね再現できている。火山灰が斜面を被覆することによる降雨浸透の変化を、図 15 に示したような飽和度の上昇とともに透水係数が低下する関係でモデル化することにより適切に評価できているものと考えられる。

#### 4.3 実降雨・実斜面を想定した解析条件及び解析結果

実斜面を対象に、降灰後に降雨を受ける状況を想定した解析を実施した。解析に用いる有限要素モデルを図 18 に示す。斜面は延長 15m、厚さを 1m の斜面とした。斜面地盤には降雨散水実験で使用した珪砂 6 号の透水係数や水分特性曲線を用いた。火山灰は粗粒火山灰が灰厚 5mm で堆積しているものとした。また、本解析で与えた降雨は、鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物）<sup>4)</sup> に示されている短期型降雨作用 I とした。設定した降雨作用の時刻歴を図 19 に示す。なお、設計標準では降雨を与える時間を 24 時間としているが、本検討では 24 時間終了時点以降の挙動も把握するために 24 時間時点の降雨量を継続して、さらに 6 時間与えることとした。

図 20 に、降雨開始 28hr 経過後における斜面地盤内の飽和度分布を示す。なお、図は斜面の中腹を拡大している。(a) の火山灰がない斜面地盤のみの場合は、降雨が斜面表層から内部へと浸透しており、斜面地盤内の飽和度は 65% 程度を維持していた。(b) の火山灰がある場合は斜面内部の飽和度は 55~60% であるが、火山灰層では飽和度が 100% に達し、火山灰層直下の斜面地盤表層においても飽和度が 80~90% まで上昇していた。火山灰層及び斜面表層地盤は、飽和度の上昇に伴って強度・剛性が低下し、斜面が不安定化しやすい状態となっているものと考えられる。解析結果より、火山灰層の浸透能が低下し、表面流も火山灰なしと比較して増加する。さらに、飽和度上昇によって斜面表層地盤の強度が低下し、

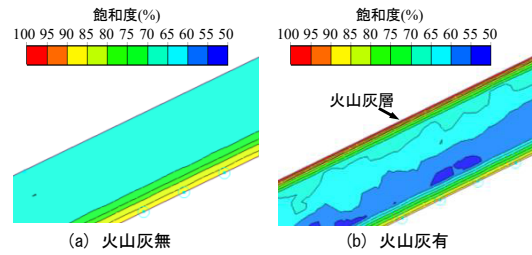


図 20 28hr 経過後の飽和度コンター図

火山灰や斜面表層地盤の流下が生じる可能性が高まることを示唆しているといえる。

#### 5. まとめ

本研究では、降灰による斜面への降雨浸透挙動及び降雨時の火山灰及び斜面表層地盤の安定性を明らかにするために、火山灰を散布した斜面模型の降雨散水実験や火山灰散布を行った実斜面の長期挙動の計測を行った。さらに、実験やフィールドでの計測をもとに火山灰の浸透特性のモデルを提案するとともに、構築した火山灰モデルの妥当性の検証と実斜面の安定性評価への適用を試みた。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 降雨散水実験により、火山灰の粒径や灰厚により降雨が浸透しにくくなること、斜面地盤の透水性の影響で火山灰が流出しやすくなることが確認された。また、火山灰は含水によって浸透能が低下し、表面流が多くなることが明らかとなった。
- (2) 火山灰を散布した実斜面での計測により、斜面に火山灰が堆積した状態では降雨浸透が抑制されることが確認された。また、降雨を繰返し受けることで、火山灰の流出やリルが生じ、再び降雨が地盤内に浸透しやすくなることが確認された。
- (3) 実験で得られた挙動をもとに火山灰の浸透特性を表現できるモデルを提案した。提案したモデルを用いた飽和 - 不飽和浸透流解析により、実験で得られた火山灰の降雨浸透挙動を再現できることを確認した。さらに実際の降灰斜面を想定した解析から、降灰斜面が降雨によって不安定となることを表現できることを確認した。

#### 文 献

- 1) 池谷浩：有珠山周辺に発生した泥流災害について、砂防学会誌（新砂防）、Vol.31, No.3, p.31-33, 1979
- 2) 角谷ひとみ、井上公夫、小山真人、富田陽子：富士山宝永噴火（1707）後の土砂災害、歴史地震、Vol.18, pp.133-147, 2003
- 3) 池谷浩、石川芳治：1992年8月雲仙普賢岳に発生した土石流、新砂防、Vol.45, No.3, pp.52-56, 1992
- 4) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物、平成 25 年改訂）、丸善、2007