

雲仙岳溶岩ドームの不飽和浸透流解析結果について

アジア航測株式会社 武石久佳, 岡野和行, ○新田寛野
株式会社オリエンタルコンサルタンツ 平川泰之, 矢渡岳
国土交通省 九州地方整備局 河川部 久保世紀
国土交通省 長崎河川国道事務所 砂防課 吉田信也, 岩田和宙

1. はじめに

長崎県島原半島の雲仙普賢岳山頂付近に位置する溶岩ドームは、1990年11月～1995年2月の噴火活動に伴い山頂の急斜面上に形成され不安定な状態で存在しており、崩落等の危険性が懸念されてきた。溶岩ドーム崩壊の予測・対策を推進する上で溶岩ドームの変動メカニズムの解明は重要であるが、その変動メカニズムは未解明な状態にある。溶岩ドームの挙動等を観測するために整備された光波測距の累積変化量では、1997年～2023年までの26年間で平均して5.5cm/年の速度で東向きの変位が観測されている¹⁾。

溶岩ドーム変動メカニズムの解明のために、これまで溶岩ドーム地表面変位の三次元分布解析や斜面変動と変動の一誘因と考えられる降雨量との関係に関する検討が重ねられてきた²⁾³⁾。既往研究では、溶岩ドームの斜面変動（光波測距による溶岩ドーム月当たりの変動量）と降雨（遅れ時間を考慮した観測雨量から算出される60日半減期の実効雨量）には相関があり、2016年の熊本地震前後で変動傾向の変化が把握された。特に2016年以前では降雨と2ヶ月後の斜面変動に高い相関がみられた。一方で、2017年以降は相関は低くなったものの、降雨と約7～8ヶ月後の斜面変動に相関がみられた（図1）。これは、熊本地震前後で溶岩ドームと下部の火砕流堆積物を浸透する降雨流出過程が変化したことが原因だと推察された。すなわち、浸透した降雨が平成噴火前の地山との境界で地下水面を形成しその地下水面が溶岩ドームの変動に関係すると考えたうえで、熊本地震で透水性が低下したため溶岩ドーム脚部付近に地下水面が形成されるまでの時間が長くなったと推察される（図2）。

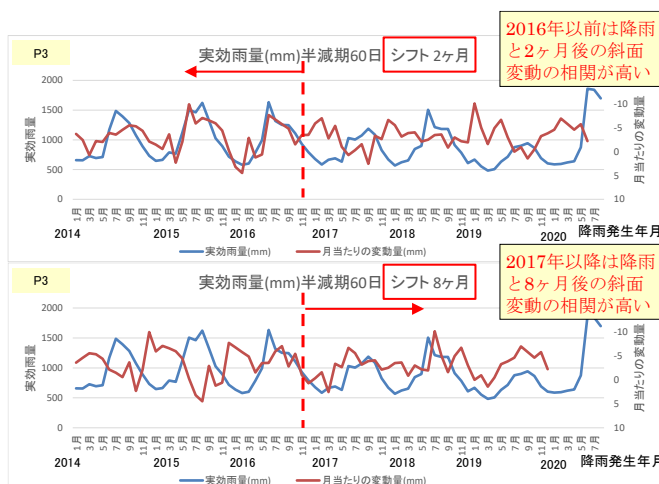


図1 実効雨量と地震前後の斜面変動の関係例(P3)

そこで不飽和浸透過程が、岩盤や火砕流堆積物が持つ透水係数の一般値で実現されうるかを確認するために、溶岩ドームへの雨水が地山上部の200mを不飽和浸透すると過程し、鉛直1次元不飽和浸透流解析を実施した。

さらに、側方浸透を考慮した地下水位の変化傾向を確認するために、溶岩ドーム周辺の断面的な構造を考慮した断面2次元不飽和浸透量解析を実施した。本稿ではその検討結果を報告する。

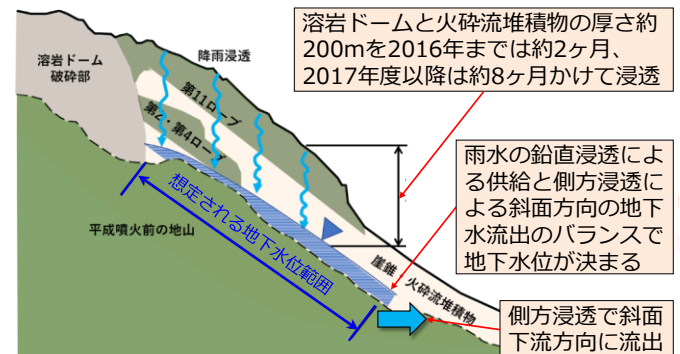


図2 溶岩ドームの変位量と実効雨量との関係の概念図

2. 方法

2.1. 鉛直1次元不飽和浸透流解析

鉛直1次元不飽和浸透流解析では、溶岩ドームへの降雨が地山の上部に形成される地下水面に到達するまでの時間を推定し、降雨に対する地表面変位の遅れ時間と比較することで、遅れ時間のオーダーが水理・水文学的に推定される地下水面への到達時間と整合しているかを確認した。

計算モデルは、堆積層内の浸透流解析の基礎方程式に不飽和浸透過程を考慮したRechardsの式を基本とし、谷⁴⁾による水分特性曲線推定式を用いた里深⁵⁾によるモデルを用いた。

計算パラメータは、雲仙普賢岳と類似した岩質を呈する焼岳の火山岩で同定された値とし、初期状態における圧力水頭は焼岳で採取された火砕流堆積物で作成された水分特性曲線を参考に、飽和透水係数は感度分析の結果同定された値の $3.3 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ を基準に前後させた値を使用した。

2.2. 断面2次元不飽和浸透流解析

断面2次元不飽和浸透流解析では、鉛直1次元不飽和浸透流解析結果を踏まえて、初期状態の圧力水頭と飽和透水係数を変化させた場合の感度分析を実施し、下部の地下水面の動きを確認した。すなわち、平成噴火以前の地盤（以下、地山とする）とそれ以外（溶岩ドーム及び火砕流堆積物）で透水性に関する条件を分け、後者の初期圧力水頭と透水係数を変化させ、全体の圧力水頭の変化と、溶岩ドームの下部（地表面変位が実効雨量と相関が高かった位置）の圧力水頭の時間変化を確認した。

計算パラメータは、鉛直1次元解析と同様に焼岳の火山岩で同定された値とし、初期圧力水頭と飽和透水係数は値を複数の条件で計算を実施した。対象降雨は近年で比較的年降水量の多かった、2020年6月1日を起点とした1年間の降雨量とした。

3. 結果

3.1. 鉛直1次元不飽和浸透流解析結果

飽和透水係数および、初期圧力水頭を変更しながら解析を実施した結果、透水係数が $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{cm/s}$ 程度の時、上端に与えた水が概ね数ヶ月～1年程度で下端に到達した(図3)。既往文献⁹⁾では、岩盤や火砕流堆積物の透水係数は $10^{-2} \sim 10^{-5}$ 程度と想定されていることから、溶岩ドームの表面に降った雨水が地山と火砕流堆積物との境界に到達するのに概ね数ヶ月～1年程度かかると考えた仮説と整合的であることが確認できた。

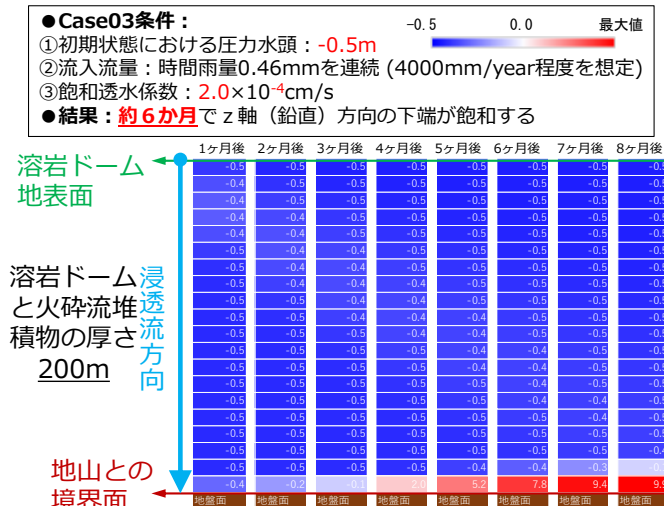


図3 鉛直1次元不飽和浸透流解析結果

3.2. 断面2次元不飽和浸透流解析結果

感度分析は単年での解析と、降雨期前の含水率を安定させるために2020年1月1日～12月31日の降雨を複数年与えた条件の2種類を実施した。複数年による解析では、概ね3年目頃から値が安定した(図4)。3年目～4年目の計算結果では、それまでの計算で圧力水頭は安定し、出水期前の地表面の値が低くなっている(図5)。出水期には、雨水が地表面から徐々に浸透し、数ヶ月かけて地山との境界部に到達していることが確認できる。

以上より、透水係数が $1.0 \times 10^{-3} \sim 3.3 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 程度の時、溶岩ドームに降った雨水が不飽和浸透し、概ね数ヶ月～1年程度で地山上部の地下水面に到達するとともに、60日半減期の実効雨量と地下水面の変化傾向が類似することが分かった(図6)。この透水係数は、先述の通り既往文献⁹⁾から岩盤や火砕流堆積物の透水係数として不整合のある値ではないことから、溶岩ドームの表面に降った雨水が地山境界に到達するのに数ヶ月～1年程度要し、それらに起因して形成される地下水位の変動が60日半減期の実効雨量と類似した時間変化を示すとした仮説が、水理・水文学的に起こり得ることが確認できた。

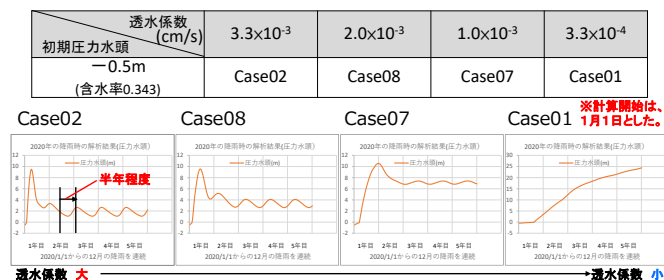


図4 溶岩ドーム流末・地山付近における圧力水頭の推移

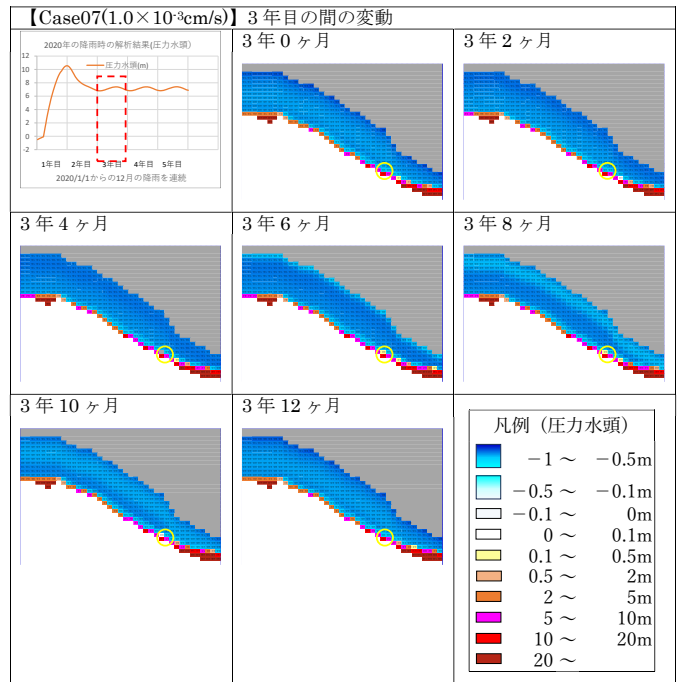


図5 断面2次元不飽和浸透流解析結果(3年目の例)

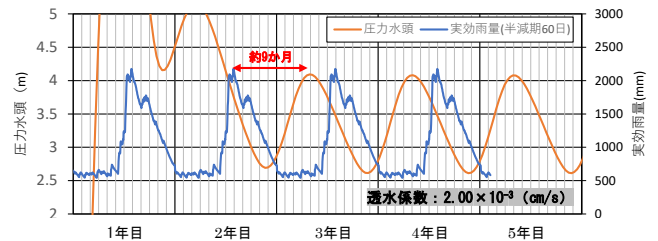


図6 2020年降雨時の圧力水頭と実行雨量の関係

4. おわりに

本稿では、鉛直1次元・断面2次元不飽和浸透流解析を実施することで、雨量と溶岩ドームの変動傾向に基づく仮説は、既往研究等から得られる透水係数を用いた不飽和浸透流解析と調和的であり、実現象の物理過程として起こりうるものであることが示唆された。

今後、溶岩ドームの変位速度と実行雨量を定量的に関係づけ、溶岩ドームの変位速度を雨量から推定することが可能になれば、溶岩ドームの挙動と関連付けられた雨量の監視基準を検討することが可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 雲仙砂防管理センター: 令和5年度溶岩ドーム崩壊危険度判定分科会, 2024.3
- 2) 新田ら: 航空レーザ測量成果を活用した平成28年熊本地震前後における雲仙岳溶岩ドームの地表面変位, 砂防学会研究発表会概要集, P14-363~364, 2024
- 3) 武石ら: 雲仙岳溶岩ドームの挙動と降雨量との関係について, 砂防学会研究発表会概要集, P9-353~354, 2024
- 4) 谷: 一次元鉛直不飽和浸透によって生じる水面上昇の特性, 日林誌, P409-418, 1982
- 5) 里深好文・水山高久: 渓床堆積物の不飽和浸透過程を考慮した石礫型土石流の発生・発達に関する数値計算, 水工学論文集, 第52巻, P697-702, 2008
- 6) 佐藤ら: 断層のトンネル湧水に与える影響, 埼玉大学工学部地盤水理実験施設年報, Vol.4, P60-80, 1978