P34

数値解析による斜面土層間隙水圧の稠密観測結果の説明と豪雨時の再現シミュレーション
Numerical Analysis of Soil Pore-Pressure Observed by Dense Hydrological Monitoring for Simulating the Response to Heavy Rainfall

○近藤有史・松四雄騎
○Arihito KONDO・Yuki MATSUSHI

Rainfall-induced landslides frequently cause disasters in hillslope environments. The occurrence of shallow landslides is often associated with the development of positive pressure between at a hydrologic discontinuity. However, previous models have not fully incorporated the effect of shallow subsurface structures. This study uses HYDRUS-2D to simulate an extreme precipitation with hillslope model reflecting field conditions. The result of a typhoon passage experiment shows that the positive pressure area rises from the lower bottom of the soil toward the ground surface on the hillslope underlain by granite, and that generated at the upper and lower soil boundary on the granodiorite (99 words).

1. 導入

降雨に伴う表層崩壊は、丘陵地域で頻繁に土砂災害を引き起こす。斜面不安定化に関連する水分移動、貯留、圧力上昇過程といった水文学的プロセスを理解することは、表層崩壊の発生場所や時期を説明し、土砂災害を軽減するための警報システムを確立する上で重要なステップとなる。表層崩壊の発生と斜面水文現象の関連性は、従来散水実験によって明らかにされてきたが、このような実験は降雨や植生、地形の変化といった自然な状態を想定した環境で行われないため、現実斜面で発生する表層崩壊の実態を解明することは難しい。また、表層崩壊を誘発する雨水の動きを説明するために、これまでに多くのモデルが考案されてきたが、これらモデルは、歳月を重ねた岩盤の風化によって形成された地下構造を十分に反映しているとは言えない。そこで本研究では、土層の薄い花崗岩斜面と土層の厚い花崗閃緑岩斜面を比較対照として、天然の浅部地下構造と稠密水文観測結果を反映した数値シミュレーションモデルを作成し、豪雨による圧力上昇過程を検討する。

2. 対象地域と研究方法

現地調査は、阿武隈山地北部の急峻な斜面地域に分布する花崗岩と花崗閃緑岩を基盤とする斜面を対象として実施された。2019 年の 10 月 10 日から 13 日にかけての台風ハギビス通過に伴い、対象地域は、最大積算雨量 621 mm と降水イベント後半に最大 1 時間雨量 77 mm を記録した。花崗岩類を基盤とする地域に集中した斜面崩壊は、この豪雨イベントを引き金として発生したものである。花崗岩と花崗閃緑岩を基盤とする 2 つの斜面はともに、表層崩壊跡地を有する典型的な 0 次谷に位置する。しかし、花崗岩斜面は土層岩盤境界に、花崗閃緑岩斜面は土層内にすべり面が形成された痕跡を持っている。花崗岩の斜面は比較的粗く薄い（<1 m）土層被覆を持つが、花崗閃緑岩はきめ細かく厚い（>1 m）土層を持ち、上部は柔らかく下部は硬いものに分類できる。各土層の平均的な飽和透水係数は、花崗岩土層で 4.52×10^{-2} cm/s、花崗閃緑岩の上部土層で 2.96×10^{-2} cm/s、下部土層で 2.02×10^{-3} cm/s という値を示す。降水浸透に伴う圧力水頭の時間変動は、花崗岩および花崗閃緑岩ともに、崩壊跡地近傍に斜距離で約 150 cm、鉛直距離で 18-35 cm の間隔で高密度に埋設されたテンシオメーターを用いて、2021 年に観測された。

3. 結果

各山腹斜面で観測された圧力水頭は、典型的に岩盤特有の斜面浅部構造に規定されて時間変化する傾向にある。花崗岩斜面では、降水量によらず地表付近から順に圧力水頭が急速に上昇し、その後岩盤上面で圧力が最大となるが、降水開始前に土層が湿潤な状態に置かれている時に限り圧力水頭は穏やかに上昇する傾向にある。花崗閃緑岩斜面は、降水量が少ない場合には地表付近でのみ圧力水頭を増加させるが、降水量が多い場合には上部土層と下部土層との間にタイムラグをもって圧力水頭を増加させる。これらの特性は、降水強度、累積降水量、降水パターンの異なる様々な降水イベントで生じることが確認されている。

4. 議論

圧力水頭の観測結果は、シミュレーション結果と比較することにより検証された。ここで用いたモデルは、Richards 方程式、Mualem モデル、Van Genuchten モデルを実装した HYDRUS-2D である。花崗岩斜面と花崗閃緑岩斜面を想定した 2 つの斜

面モデルは、観測地点近傍の斜面形態と地下構造を強く反映している。再現対象とした降水イベントは、2021 年 10 月 12 日から 14 日までに観測されたものである。再現は、各斜面モデルに対して同様のハイエトグラフを入力し、Mualem モデルに含まれる間隙結合係数 1 の値を 0.1 ステップで変化させることで試みた。この結果によれば、花崗岩斜面モデルにおいては、l=－1.0、花崗閃緑岩斜面においては、上部土層 l=－0.8、下部土層 l=－3.2 が観測波形の特徴をよく説明した。

豪雨を想定したシミュレーションは、斜面浅部構造特有の深度で正圧が発生することを示した。数値実験に使用するすべてのパラメータは、現実の斜面浅部構造を反映する値となっている。豪雨の入力パターンは、4 つの観測降水イベントを合成して作成されたものであり、台風ハイエトグラフの特徴を時空間的に代表したものとなっている。豪雨を想定したシミュレーション結果に基づくと、花崗岩を想定した斜面では、風化した岩盤表面が雨水の鉛直浸透を妨げることで、土層の底部に一時的な地下水面が形成される。降雨強度が時間とともにさらに増加すると、水位は下流から上流へ急激に拡大し、最終的には地表面に達する。一方、花崗閃緑岩を想定した斜面では、上部土層と下部土層の境界に一時的な地下水面が発生する。この境界部では、雨水の急激な供給により正圧領域が同時に発生する。表層崩壊の発生は、多くの場合、水文学的不連続面における正圧の発生と関連するとされている。 したがって、岩盤特有の浅部地下構造に規定されて、豪雨に伴い表層崩壊のすべり面が形成されることが予想された。

5. 謝辞

京都大学防災研究所の佐山先生には hydrus を使用させていただき、また同研究室の菅原先生には数値計算環境の構築方法に関してしばしば相談に乗っていただいた。本研究は JSPS 科研費 JP1226414 の助成を受けたものである。

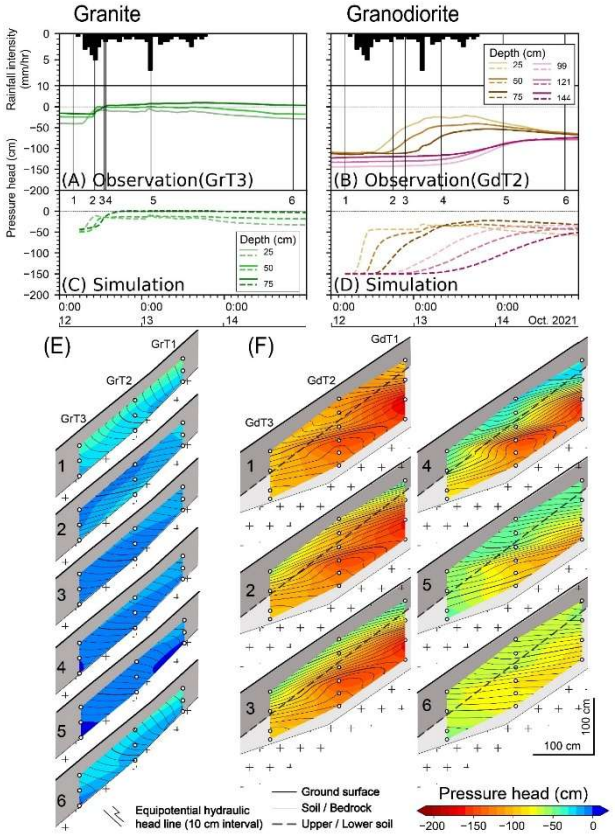

図 1. 花崗岩斜面と花崗閃緑岩斜面における圧力水頭の時空間変化。 (A)は、2021 年 10 月 12 日から 14 日までの GrT3 における降水浸透に対する圧力水頭の時空間変化である。(B)は、同時期の GdT2 のものである。(C)および(D)は(A)と(B)の観測波形を再現対象としたシミュレーション結果である。(E)および(F)は，特徴的な観測圧力水頭の空間分布を，数回に分けて示したものである。

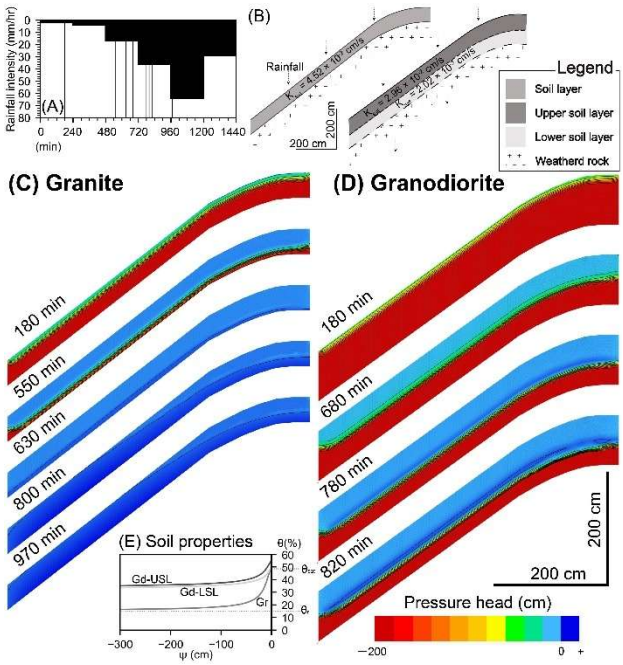

図 2. HYDRUS-2D による豪雨時のシミュレーション結果。入力降水パターン(A)は、2019 年に観測された 4 つのハイエトグラフの平均特性を反映したものである。斜面モデル（B）は、観測地点近傍の斜面浅部構造及び斜面形態を反映している。(C および D)が、豪雨時のシミュレーション結果である。(E)に、各土層の水分保持曲線を示した。