

# 六甲山系における斜面崩壊に基岩内地下水が与える影響

京都大学大学院農学研究科

○小杉賢一朗, 藤本将光, 加藤弘之  
三道義己, 水山高久

国土交通省六甲砂防事務所

岡本敦, 星野久史, 白髭一磨

## 1. はじめに

豪雨に伴う表層崩壊の発生場所・時刻を予測するには、森林流域で実際に起きている水循環過程を正確に表現できる水文モデルの開発が不可欠である。これまで斜面スケールでの雨水流出過程は、一般的に「土壌に浸透した雨水が鉛直浸透過程を経て基岩面上に飽和帯を形成し、飽和側方流出により河川に流出する」と考えられてきた。しかしながら近年、基岩内に浸透する雨水成分が非常に多く、さらに一端基岩面に浸透した雨水が流域下部で土層に復帰することが観測され、基岩地下水が表層崩壊の発生に直接関与している可能性が指摘されている。

本研究は、六甲山系における基岩内部の水文過程を考慮した物理水文モデルを開発することにより、従来よりも精度の高い表層崩壊の予測を可能とする手法を構築することを目的とした。

## 2. 水文観測流域と観測方法

対象とした流域は、兵庫県六甲山系住吉川流域内の西おたふく山山頂西側に位置する森林流域（面積 2.1ha）である（図-1）。基岩地質は六甲花崗岩と呼ばれる黒雲母花崗岩であり、植生はコナラ、アカマツ、エゴ、リョウブ、ネジキ、アセビ等の繁茂する二次林で、林床はミヤコザサに覆われている。雨量、流量、土層内地下水（A～D点）の計測に加え、8地点で調査ボーリング（R1孔、R2孔、A1孔、A2孔、A3孔、A4孔、B1孔、B2孔）を実施し、基岩内部の地下水変動を計測した。

## 3. 有限要素法を用いた雨水流動シミュレーションと斜面安定解析

約 10 m 間隔で実施した簡易貫入試験のポイントを地表面の計算節点とし、各節点を結ぶ事で三角形要素を生成した。次に、各節点から土層厚に相当する長さの垂線を下ろすことによって三角柱を生成し、三次元の流域形状を再現した。この三次元領域内の飽和・不飽和雨水流動を、有限要素法を用いて計算した。

土層の下端（土層と基岩の境界面）は透水性を有すると仮定し、基岩内部への浸透を計算した。浸透量の推定に当たっては、水文観測結果に基づいて土層下端節点を図-2 左上パネルの様に分類した上で、上流浸透点、中流浸透点、下流浸透点において浸透した雨水は、それぞれ、上流地下水帯、中流地下水帯、下流地下水帯を涵養すると仮定した。基岩による雨水貯留はタンクモデルで表現し、最終的にタンクモデルからの流出量を、図-2 左上パネルに示した湧水点に、湧水量として与えた。タンクは、上流地下水帯、中流地下水帯、下流地下水帯のそれぞれを表すタンクに分類し、中流地下水帯については、基岩層の浅い部分を表現するために二段のタンクとした（図-2）。タンクモデルのパラメータは、ボーリング孔水位、土層内地下水位、流出量の再現性を考慮して試行錯誤で決定した。その値は、図-2 中に示した通りである。計算は、2007年12月1日から2009年12月31日まで連続して実施した。降雨には、西おたふく山で観測された時間データを用い、蒸発散量には、地質・植生が類似している滋賀県南部の桐生水文試験地で観測された値を用いた。

雨水流動の数値シミュレーションによって、流域内の各地点における圧力水頭（間隙水圧） $\phi$  と含水率  $\theta$  の鉛直分布が算定される。これらの値を、無限長斜面の安全率を計算する式に代入することで、各地点の表層崩壊発生に対する安全率  $F_s$  を算定した。

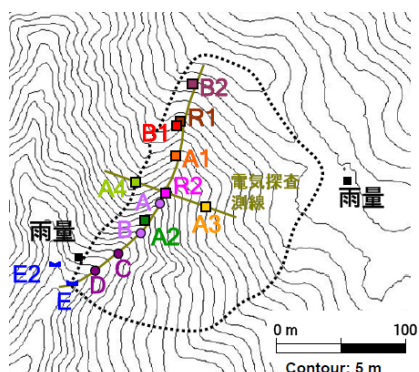
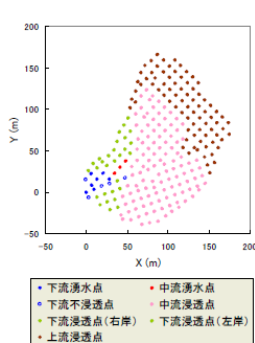


図-1 西おたふく山流域の地形と観測点の位置



| 変数名 | 値        | 単位              |
|-----|----------|-----------------|
| K2u | 2.34E-03 | h <sup>-1</sup> |
| K1m | 9.68E-04 | h <sup>-1</sup> |
| K2m | 2.50E-04 | h <sup>-1</sup> |
| KC  | 1.50E-04 | h <sup>-1</sup> |
| HC  | 4.00E+09 | cm <sup>3</sup> |
| KB  | 1.60E-04 | h <sup>-1</sup> |
| HB  | 6.30E+09 | cm <sup>3</sup> |
| K2d | 5.50E-03 | h <sup>-1</sup> |

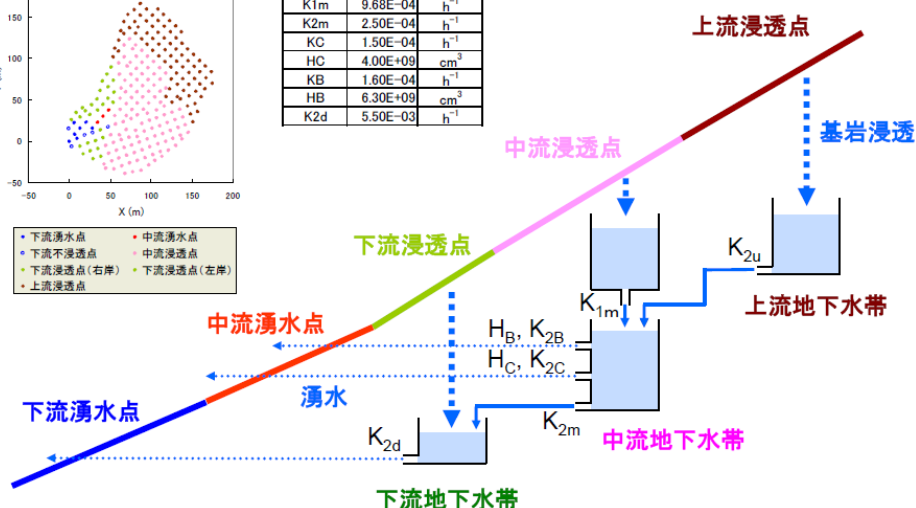


図-2 基岩を介した水文過程を考慮した雨水流動シミュレーションの模式図

#### 4. 結果と考察

図-3は、各ボーリング孔の水位を、標高で示したものである。基岩層内の地下水位変化の傾向は、標高ごとに明瞭に異なり、上流地下水帯、中流地下水帯、下流地下水帯の3つに分類できることがわかる。この図にはモデル計算結果も示した。計算初期から2008年の終わりまでは、初期条件の影響が現れてしまっているが、2009年の観測結果に対しては、良好な再現計算が行われたことがわかる。

Fsの計算は、2009年7月31日～8月2日に発生した降雨イベント（積算雨量162mm、最大時間雨量51.7mm）を対象に行った。図-4、5は、算定された間隙水圧 $\phi$ と安全率Fsの空間分布を示したものである。

大規模降雨イベントのピーク時（図-4）には、B点よりも下流部の谷筋に飽和地下水帯が存在し、C点より下流側では安全率の値が低くなった。また、A点西側の土層厚が薄い部分で飽和地下水帯が発生し、安全率が低下を示した。地点Nの周辺の安全率も小さくなっているが、これは、斜面勾配が大きいことを反映した結果である。流域の中部のFsは1.5～2.0を示し、流域上部の安全率は2.5以上の大きな値となった。

降雨終了後22時間を経過した時点（図-5）になると、飽和帯がより大きく拡大し、安全率の低下エリアも拡大した。安全率が特に低いエリアは、基岩面上の間隙水圧が40cm以上となるエリアとよい対応を示した。

安全率の低下傾向は、降雨終了後52時間後も維持された（図は省略）。降雨終了後80時間が経過すると安全率は回復を見せたが、谷筋を中心に地下水帯が存在し続け、このエリアでは、安全率が依然低いままであった（図は省略）。

以上の様に、本研究で開発した手法によって、実際の水文プロセスをより忠実に再現した精度の高い崩壊予測が可能となった。

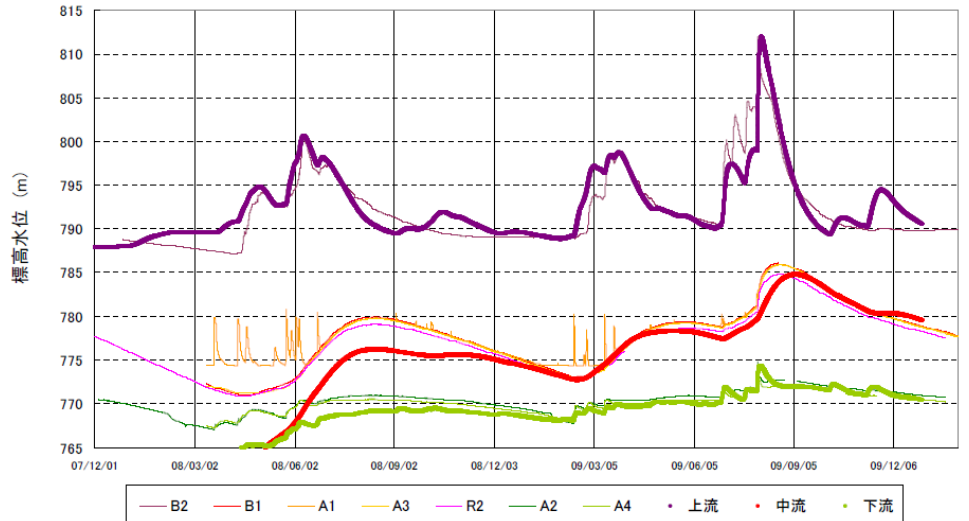


図-3 基岩地下水の計測結果（細線）と計算結果（○印）

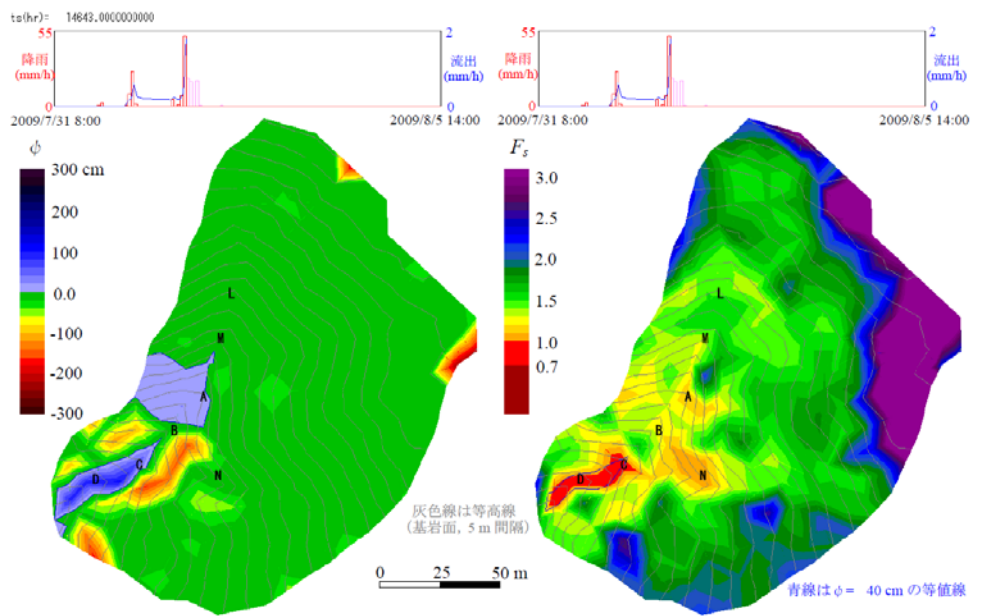


図-4 基岩面上の間隙水圧と安全率の計算結果（降雨ピーク時）

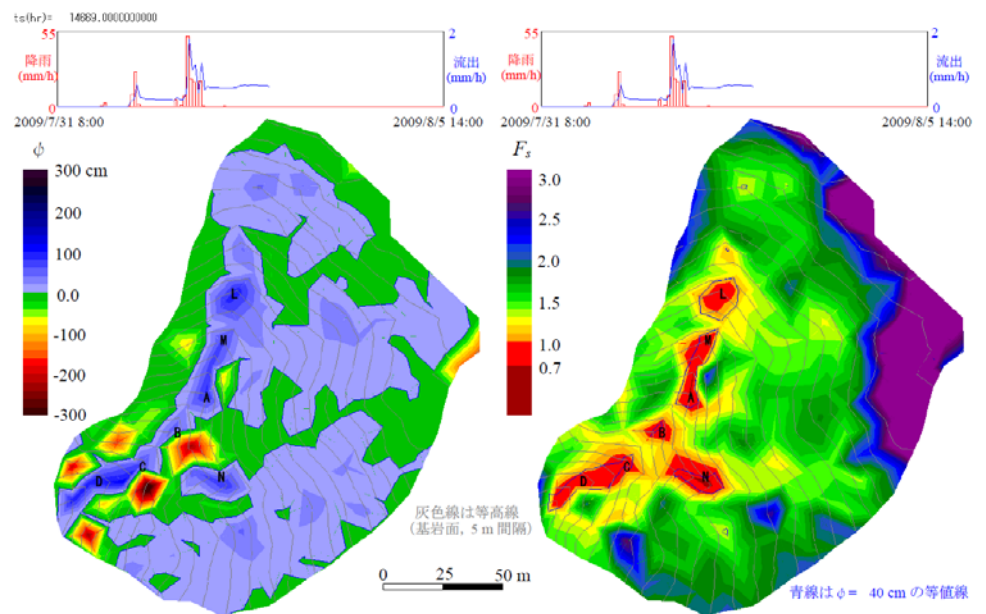


図-5 基岩面上の間隙水圧と安全率の計算結果（降雨終了から22時間後）