

令和 5 年 5 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02392

研究課題名（和文）基岩層を介した水移動を組み込んだ新たな表層崩壊予測モデルの開発

研究課題名（英文）Development of a new shallow landslide prediction model incorporating the effect of water flow through bedrock layers

研究代表者

桂 真也（KATSURA, Shin'ya）

北海道大学・農学研究院・助教

研究者番号：40504220

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：現在広く用いられている表層崩壊予測モデルは、基岩層を介した水移動の影響を考慮できていない。本研究では、山地小流域における詳細な現地観測により、基岩層から土層への復帰が土層内の地下水位の時空間変動に与える影響を明らかにした。また、土層・基岩層内の水移動を特徴づける水分特性を計測し、基岩層も含めた浸透流解析と斜面安定解析を組み合わせることで、基岩層を介した水移動を組み込んだ新たな表層崩壊予測モデルを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、基岩層内の地下水が土層に流出し、土層内の地下水位の時空間変動に影響を与えていることが明らかとなり、基岩層を介した水移動を組み込んだ新たな表層崩壊予測モデルを開発することができた。本モデルの精度を向上させるためには、基岩層内に存在する亀裂の影響を明らかにし、モデルに組み込んでいく必要があることが分かった。こうした点をクリアできれば、表層崩壊の発生場所やタイミングをより精度よく予測し、警戒避難等の適切な対策を実施することで被害を防止・軽減することが可能となる。

研究成果の概要（英文）：The currently widely used shallow landslide prediction models do not take into account the effect of water flow through bedrock layers. In this study, detailed field observations in a small mountain basin clarified the effect of runoff of bedrock groundwater on the spatiotemporal variation of the groundwater level in the soil layers. In addition, by measuring the hydraulic properties characterizing water movement in soil and bedrock layers, and by combining seepage flow analysis including bedrock layers and slope stability analysis, a new shallow landslide prediction model that incorporates water movement through bedrock layers was developed.

研究分野：砂防学

キーワード：基岩層 水移動 表層崩壊

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

毎年甚大な人的・物的被害をもたらしている表層崩壊の発生場所とタイミングを精度よく予測することは社会的に強い要請である。既往の表層崩壊予測モデルでは土層内の水移動のみを考慮してきたが、近年の研究によりいったん土層から基岩層へ浸透した水が土層へ復帰し、土層内の地下水位に影響を与えていることが明らかになってきた。表層崩壊の予測精度のさらなる向上のためには、基岩層を介した水移動を組み込んだ新たなモデルを開発する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、山地小流域において詳細な地下水位、水温、水質観測を実施し、基岩層から土層への復帰が土層内の地下水位の時空間的変動に与える影響を明らかにする。また、土層・基岩層内の水移動を特徴付ける水分特性を計測し、基岩層も含めた浸透流解析と斜面安定解析を組み合わせることで、基岩層を介した水移動を組み込んだ新たな表層崩壊予測モデルを開発する。開発したモデルを過去の表層崩壊発生斜面に適用し、実際の発生場所やタイミングと比較することで、モデルの妥当性を評価する。さらに、既往のモデルを適用した場合との比較を行うことで、基岩層が表層崩壊に与える影響を定量的・多角的に評価する。

3. 研究の方法

研究開始当初に構想していた本研究の方法は以下の 11 ステップから成る。

- (1) 観測対象斜面の選定
- (2) 土層の層構造の調査と水分特性の計測
- (3) 土層内の地下水位、水温、水質の計測
- (4) 基岩層の層構造の調査と水分特性の計測
- (5) 基岩層内の地下水位、水温、水質の計測
- (6) 計測結果の解析
- (7) 浸透流解析による斜面内部の水の流れの再現
- (8) 土層の土質強度の計測
- (9) 新たな表層崩壊予測モデルの開発
- (10) 本モデルの妥当性の評価
- (11) 基岩層を介した水移動が表層崩壊に与える影響の評価

4. 研究成果

(1) 観測対象斜面の選定

北海道上川管内幌加内町に位置する北海道大学雨龍研究林母子里試験流域内の家内流域 (3.3ha) を対象斜面に選定した。

(2) 土層の層構造の調査と水分特性の計測

流域内の 1 地点でトレンチを掘削し、土層構造を調査した。対象流域の土層は地表面から順に表土層 (OSLs)、基岩の風化物が形成した粘土層 (CMLs) から成り、土層厚は約 4m であった。表土層から 4 個、粘土層から 3 個、サンプルを不攪乱採取し、室内試験により水分特性 (飽和透水係数および水分特性曲線) を計測した。

(3) 土層内の地下水位、水温、水質の計測

流域内の 4 地点 (T1~T4 地点)、計 7 深度の土層内にテンシオメーターを設置し、圧力水頭を計測した (図 1)。また、3 地点 (T2~T4 地点) で土層内に井戸を掘削し、土層内の地下水位・水温を計測するとともに、現地調査時に井戸内の水を採取して水質 (Al^{3+} , Ba^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Li^+ , Mg^{2+} , Na^+) を計測した。

(4) 基岩層の層構造の調査と水分特性の計測

流域内の 2 地点 (MB1, MB2) で調査ボーリングを実施し (図 1; 掘削深度はそれぞれ 35m と 25m)、基岩層の層構造を調査した。対象流域の基岩層は表層から順に強風化層 (D 級) (層厚は 0.7~4.5m)、中風化層 (CL 級) (3.4~4.2m) から成り、それ以深は弱風化層 (CM

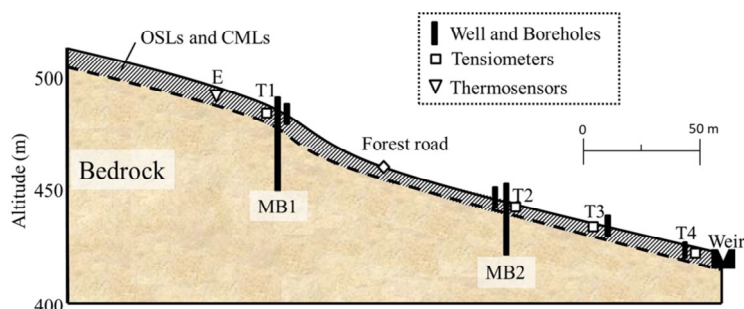


図 1 観測体制

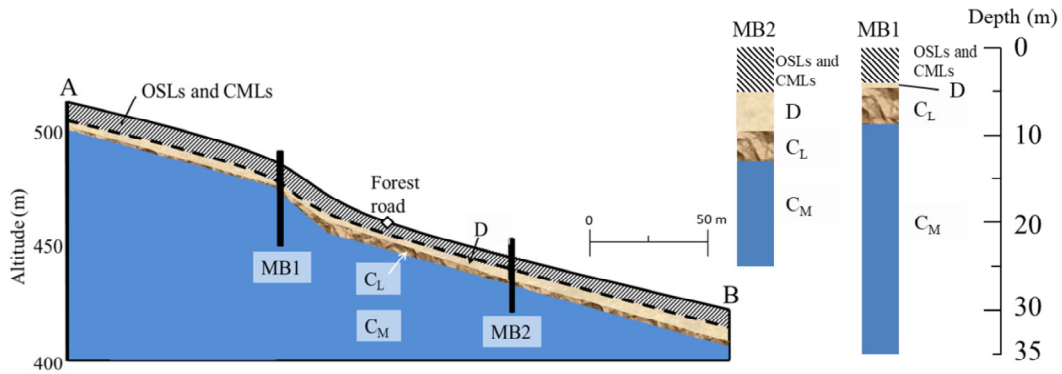


図2 基岩層構造

級) から成ることが分かった (図2)。

ボーリングコアから風化区分ごとに亀裂を含まないように基岩層サンプルを作成し、室内試験により水分特性を計測した。飽和透水係数については、亀裂の影響を評価するため、ボーリング孔を利用して現場透水係数も計測した。図3に風化区分ごとの平均的な水分特性曲線を示す。強風化層では圧力水頭 $> -200\text{cm}$ の領域で体積含水率が変化した。飽和透水係数は $1.0 \times 10^{-6} \sim 3.1 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ であった。中風化層では、体積含水率は圧力水頭 $> -50\text{cm}$ の領域でわずかに変化する、それ以下ではほぼ変化しなかった。飽和透水係数は $2.5 \times 10^{-8} \sim 6.9 \times 10^{-7}\text{cm/s}$ と小さく、マトリクス部における水の流動はごくわずかであると考えられる。一方、中風化層の現場透水係数は $1.0 \times 10^{-6}\text{cm/s}$ で、マトリクス部の飽和透水係数より大きかったことから、中風化層では地下水流動に亀裂が寄与していると推測される。弱風化層では中風化層と似た特徴を持つ水分特性曲線が得られた。飽和透水係数は $6.7 \times 10^{-9} \sim 4.0 \times 10^{-8}\text{cm/s}$ と非常に小さかった一方で現場透水係数は $2.9 \times 10^{-5}\text{cm/s}$ であり、中風化層以上に地下水流動に亀裂が寄与していると考えられた。

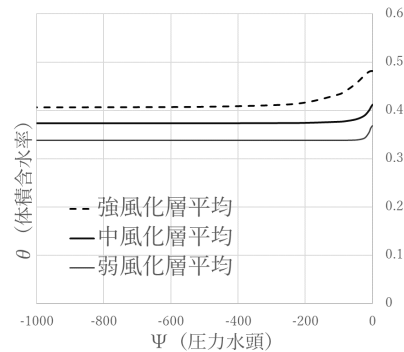


図3 基岩層の平均的な水分特性曲線

(5) 基岩層内の地下水位、水温、水質の計測

調査ボーリングで掘削されたボーリング孔を利用して、基岩層内の地下水位・水温を計測した。また、現地調査時にボーリング孔内の水を採取して水質を計測した。

(6) 計測結果の解析

(3), (5)の計測結果を総合的に解析し、対象流域における斜面内部の水の流れを解明した (図4)。地下水位・圧力水頭の観測結果から、表土層・粘土層・基岩層内に別個の地下水帯が形成されており、それぞれ降雨に反応して拡大・収縮していた。このことから、粘土層が基盤面として働く一方で、水が粘土層を通過して基岩層へも浸透していると考えられた。圧力水頭の解析から、降雨時・無降雨時に関わらず、表土層から粘土層への鉛直下向きの流れが生じていた一方、斜面末端部の粘土層内地下水帯では恒常的に鉛直上向きの流れが生じていた。各地下水帯のラグタイム (降雨開始から地下水位・圧力水頭の上昇開始までに要する時間)、各地下水帯の拡大・収縮、そして水質・水温の観測結果から、流域末端部に形成される表土層内地下水帯の起源は粘土層内地下水であると考えられた。基岩層内地下水位は恒常的に高く、降雨時にはたびたび粘土層-基岩層境界より高い位置まで上昇していた。これらの結果から、対象流域では、粘土層が基岩層内地下水の流出を阻害している傾向がうかがえるものの、基岩層から土層への復帰が土層内の地下水位の時空間的変動に影響を与えていることが分かった。

(7) 浸透流解析による斜面内部の水の流れの再現

対象斜面を模した斜面モデルを作成し、(2), (4)で計測した水分特性を用いて浸透流解析を実施することで、斜面内部の水の流れの再現を試みた。土層各層の水分特性は、(2)で計測した層ごとの平均的な値を用いた。基岩各層の水分特性は(4)で計測した平均的な値を用いたが、中風化層 (CL級)・弱風化層 (CM級)の飽和透水係数は亀裂の影響を考慮するために現場透水係数を用いた。境界条件は、斜面下端は自由排水条件、地表面は大気圧開放条件、斜面上端と基岩底面は不透水条件とした。入力降雨は2021年9月16日0時~10月14日23時に雨龍研究林で観測された降水量で、初期条件は9月16日に観測された土層内の圧力水頭および基岩内の地下水位を参考に与えた。計算領域を4308個のメッシュに分割し、全2280節点における圧力水頭を

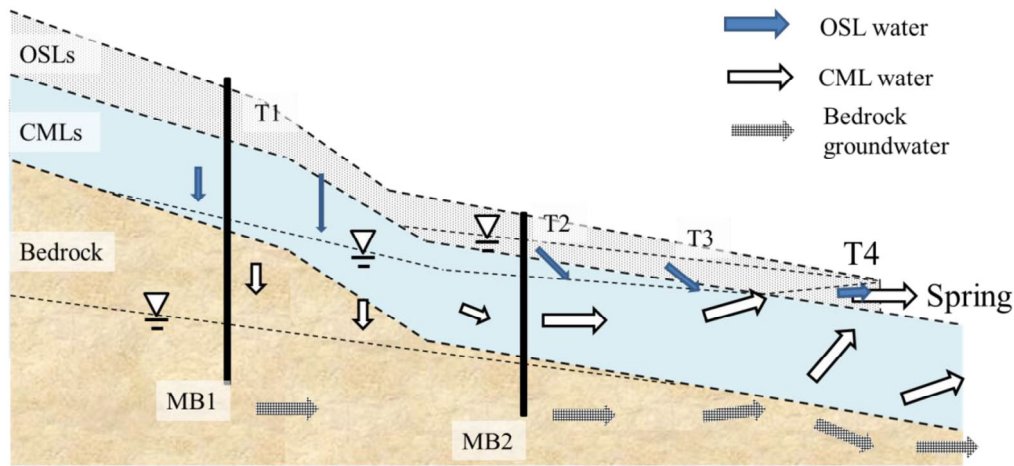


図4 対象流域における水の流れの模式図

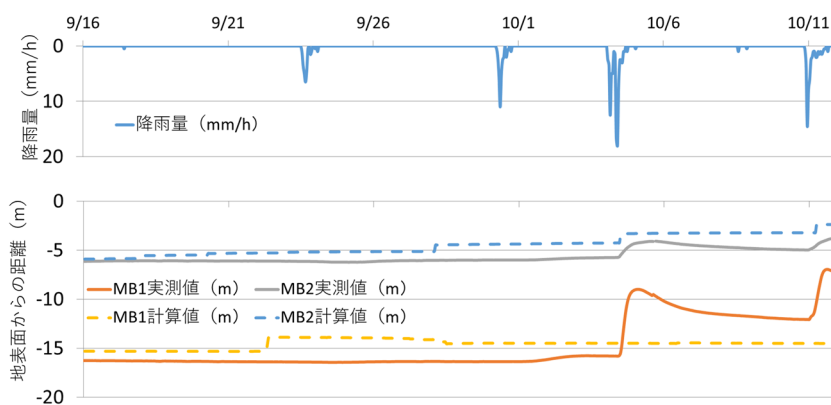


図5 基岩層内地下水位の実測値と計算値

Hydrus 3.03 を用いて計算した。

MB1 と MB2 の地下水位の計測値と計算値を図5に示す。10月4日の24時間総降雨量84 mm、最大降雨強度18 mm/hの降雨イベントにより、特にMB1で顕著に実測地下水位が上昇した。MB2では、計算値は計算対象期間の実測値の変動傾向をある程度再現できた一方、MB1では計算値は変動が小さく、実測値に見られる鋭敏な上昇を再現できなかった。すなわち、基岩層の水分特性から説明可能な以上に素早く雨水が基岩層内に浸透していることが示唆された。

(8) 土層の土質強度の計測

土層の土質強度に関するデータを収集した。

(9) 新たな表層崩壊予測モデルの開発

(7)で得られた圧力水圧の分布を斜面安定解析に導入し、(8)の土質強度を用いて安全率を評価することで、新たな表層崩壊予測モデルを開発した。しかし、上述の通り、(7)で得られた解析結果は、(3)、(5)で得られた計測結果を十分に再現できておらず、当初計画していた(10)本モデルの妥当性の評価、および(11)基岩層を介した水移動が表層崩壊に与える影響の評価を実施するのは困難であった。これは、基岩層内に存在する亀裂の影響を十分に考慮できていないためと考えられ、本研究のさらなる発展のためには亀裂のサイズや連続性、分布等を把握し、それらが水移動に及ぼす影響を組み込む必要があることが分かった。今後は、水分特性の与え方のほか、初期条件や境界条件等も見直ししながら、さらに浸透流解析を実施し、山地源流域の基岩層内の水移動プロセスを明らかにするとともに、表層崩壊予測モデルに組み込んでいく必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 松永一慶・桂真也・吉野孝彦・松永隆正 | 4. 巻 76(1) |
| 2. 論文標題 花崗岩山地小流域における基岩湧水の湧出特性とモデル化 | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 砂防学会誌 | 6. 最初と最後の頁 34-41 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 吉野孝彦, 桂真也 |
| 2. 発表標題 凝灰角礫岩山地源流域の厚い粘土層が水文プロセスに与える影響 |
| 3. 学会等名 2023年度砂防学会研究発表会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 鈴木優子, 桂真也, 吉野孝彦 |
| 2. 発表標題 凝灰角礫岩山地源流域における風化基岩層の透水性・保水性の計測 |
| 3. 学会等名 2022年度砂防学会研究発表会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 吉野孝彦, 桂真也, 鈴木優子 |
| 2. 発表標題 実測した基岩の水分特性を用いた浸透流解析による凝灰角礫岩山地源流域の地下水流動プロセスの再現 |
| 3. 学会等名 2022年度砂防学会研究発表会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 松永一慶, 柱真也, 吉野孝彦, 松永隆正 |
| 2. 発表標題 花崗岩山地小流域における基岩湧水の流出特性と実効雨量に基づく関数モデルの適用 |
| 3. 学会等名 2022年度砂防学会研究発表会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名 松永一慶, 柱真也 |
| 2. 発表標題 花崗岩山地小流域での基岩湧水の流出特性 |
| 3. 学会等名 2021年度砂防学会研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 吉野孝彦, 柱真也 |
| 2. 発表標題 多雪地域の凝灰角礫岩山地源流域における基岩内地下水位の変化 |
| 3. 学会等名 2021年度砂防学会研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

| | | | |
|---------|---------------------------|-----------------------|----|
| 6. 研究組織 | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|