

## 学位論文の要旨

論文題目 (和文) 地表流の影響を考慮した表層崩壊・土石流発生場の予測に関する研究  
(英文) Study on Prediction of the Occurrence Location of Slope Failures and Debris Flows considering Influence of Overland Flow

広島大学大学院総合科学研究科

総合科学専攻

学生番号 D145053

氏名 秦 雅之

### 論文の要旨

近年我が国では、豪雨による土砂災害が頻発している。これらの土砂災害を防止するためには、主な原因となっている山腹斜面の表層崩壊や土石流の発生場所を予測することが重要となる。

既往の研究で、表層崩壊の発生場所については、降雨による地中流の発生を考慮して山腹斜面の安定解析を行うことにより、ある程度の精度で予測できることが示されてきた。しかし、近年の豪雨では、従来の手法では予測できない山の稜線付近の緩勾配斜面や溪床部で多くの崩壊や土石流の発生が確認されている。このことは、近年の豪雨は従来以上に雨量強度が大きいものや総雨量の多くなるものが増えていることに起因すると思われる。

そこで、本研究では、豪雨の際にこれらの現地で地表流が発生している状況に着目した。その上で、地表流の影響を加味した新たな解析手法を提案し、この手法で解析を行うことにより表層崩壊や土石流の発生場所を従来の手法以上に精度良く予測できることを明らかにした。

本論文の各章の要点を以下に示す。

第1章では、近年の土砂災害発生件数の推移を整理し、記録的な豪雨が発生した年に、土砂災害発生件数が増えている傾向を示した。また、中国地方では平成11年6月、平成26年8月、平成30年7月などの豪雨により、数多くの崩壊・土石流が発生し、甚大な被害が生じている状況を整理した。

最新の気候変動監視レポートによると、近年全国的に記録的な短時間雨量、累積雨量の発生頻度が増加傾向にあり、その豪雨の増加に伴い、甚大な被害が生じる土砂災害の発生リスクが高まっている。

また、近年の豪雨によって崩壊・土石流が発生している現地周辺では、林床や斜面上を地表流が流れていた痕跡がしばしば認められている。しかし、既往の表層崩壊・土石流発生予測モデルでは、地中流のみを考慮しているためか緩勾配斜面において予

測精度が十分ではない。そこで、地表流の発生を加味して表層崩壊・土石流の発生場を予測する新たな手法を提案し、その有効性を明らかにすることが本研究の目的であることを示した。

第2章では、山地流域における豪雨時の地表流発生の実態について整理した。

豪雨に伴う表層崩壊や土石流の発生場を予測するにあたっては、山地流域に降った雨水の浸透・流出過程を適切にモデル化する必要がある。

平成30年7月豪雨等による崩壊・土石流の発生箇所周辺を詳細に調査すると、地表流が発生した明瞭な痕跡が確認でき、表土層が水で飽和した状態の飽和地表流が発生していた可能性が高いと考えられた。従来、山地流域の中でも集水面積が大きい0次谷等の緩勾配斜面では地下水面が地表面に達し、いわゆる飽和地表流が発生することが確認されてきているが、本調査では、それに加えて山地流域の中で最も集水面積が小さい山の稜線付近でも飽和地表流が発生した痕跡を確認した。

以上を踏まえ、本論文では、豪雨発生時に山の斜面や溪流部で飽和地表流が発生することを想定し、従来の表層崩壊予測モデルに飽和地表流発生の影響を加えて表層崩壊・土石流の発生場を予測する新たな手法を検討することとした。

第3章では、地表流の影響を考慮した新たな表層崩壊・土石流発生予測手法の開発について示した。

既存の表層崩壊発生場所の予測のための数値モデルの課題を整理すると、既存の数値モデルの多くは、地下水面が地表面に達せず地中内に存在する条件でのみ適用が可能であることが挙げられる。これらの数値モデルを用いた場合、比較的緩勾配の領域では、土層が完全に水で飽和しても崩壊が生じない「常に安定」な斜面として評価される。

一方、既往研究による土石流発生条件からは、溪流内の流路勾配  $15^\circ$  程度以上の区間では土石流が発生し得ることが示されており、これをもとに、我が国の砂防計画の指針である砂防基本計画策定指針では、溪流内の流路勾配  $15^\circ$  以上の区間が主な土石流の発生域とされている。ここで、既往の土石流発生条件式は、溪床の表土層が完全に飽和して表面流が発生する条件、いわゆる飽和地表流が発生している状況を想定し導かれたものである。

そこで、本章では、既存の表層崩壊発生予測モデル（斜面における地中流発生時の土層の安定性評価）と土石流発生条件式（溪床堆積土層の地表流発生時の土層の安定性評価）を統合し、従来の表層崩壊予測モデルでは考慮されてきていない、飽和地表流発生に伴う土層の不安定化を評価するための新たな解析モデルを構築し、その評価手順を示した。

第4章では、第3章で構築した新たな解析モデルが物理的に妥当であることを確認した。

斜面の最も基本的な特性である斜面勾配と土層厚に着目し、解析パラメータの条件を変えた場合の土層の不安定化領域(斜面勾配と土層厚の組合せ)の変化を試算した。その結果、本モデルの解析結果は、各パラメータの変動に応じて物理的に妥当に変化することを確認した。また、感度分析の結果から、本モデルのパラメータのうち、土層の粘着力の設定が土層の不安定化領域の予測に非常に強く影響していることを確認した。

実際の流域を考えると、斜面と溪流の間隔的な性質を有する0次谷の下部や溪床付近には、地中流・地表流の発生に伴い不安定化する領域が混在している可能性がある。このため、本研究で提案した手法のように、土層の粘着力の有無、地表流の発生状況に応じて、シームレスに表層崩壊・土石流を予測するモデルを用いることが有効であることを示した。

第5章では、地表流の影響を考慮した新たな表層崩壊・土石流発生予測モデルを実流域に適用するにあたって生じる課題を整理し、その課題への対応方法を示した。

解析モデルの主要なパラメータである土層の粘着力と強い相関があると考えられる山地の表層に着目すると、斜面では、土層は原位置での風化により形成・発達するとされている。一方で、溪流では、上流域から流出してきた土砂が移動可能な土砂として堆積している。さらに、山地流域には0次谷や hollow (谷頭部で下流方向以外の三方を傾斜部で囲まれた比較的緩勾配の凹型地形) と呼ばれる斜面と溪流の間隔的な特徴を有する箇所が存在する。このため、山地流域全体の土砂移動予測にあたっては、0次谷のような場での土砂移動を予測することが重要である。しかしながら、従来の土砂移動予測モデルは、斜面における現象と溪流における現象に分類して構築されていることもあり、この間隔的な場での土砂移動現象を十分に表現できていない。

そこで、本章では、この斜面と溪流の間隔的な場の土砂移動について取り扱い、特に粘着力の設定が解析モデルを実流域に適用するときの重要な課題であると考え、この課題を検討して解決することを本章の目的とした。

平成21年7月豪雨における崩壊・土石流の集中発生地域である山口県防府市の佐波川の右支川剣川流域内の右支溪を対象に、地表流発生の影響を考慮した新たな表層崩壊・土石流発生予測モデルを適用し、地表流の発生を考慮しない従来の表層崩壊予測モデルと比べて、0次谷等の斜面と溪流の間隔的な場での予測精度が有意に向上することを示した。また、地形条件(斜面勾配と集水面積の関係)から簡易に土層の形成プロセスを推定し、斜面部と溪床部の粘着力を2区分して設定する方法を試行し、その設定方法の有効性を示した。

第6章では、平成11年6月豪雨災害の発生した荒谷地区、平成26年8月豪雨災害の発生した八木・緑井地区を対象に、地表流の発生を考慮した新たな解析モデルを適用し、その有効性を確認した。

その結果、地表流の発生を考慮した新たな手法を用いることにより、集水面積の比較的大きい溪床部を中心に従来評価できなかった土層の不安定化を評価できるようになり、従来の地中流の発生のみを考慮した手法を用いる場合より、表層崩壊・土石流の発生場の予測精度が向上することを明らかにした。また、ここでも斜面勾配と集水面積の関係から土層の形成プロセスを推定し、斜面部と溪床部の粘着力を2区分して設定する簡易な手法を用いることにより、表層崩壊・土石流発生場の予測精度を有意に向上させられることを示した。

また、第2章の平成30年7月豪雨における斜面崩壊・土石流発生箇所の詳細調査で確認されたような、従来のモデルでは崩壊発生を説明できなかった15°程度の緩勾配地域での表層崩壊の発生についても、現地における地表流の発生(10~30cm)や間隙水圧の変化(1.0~1.2倍)を考慮した上で、本研究における新たな解析手法を用いることにより土層の不安定化の発生を説明できることを示した。

以上をまとめると、本論文では、従来多く用いられてきた表層崩壊発生予測モデルに、地表流の影響を加味した新たな安定解析手法を用いることで、近年の豪雨発生時に従来のモデルでは予測できなかった溪床部、緩勾配斜面を含む流域全体の表層崩壊・土石流の発生場をより高精度で予測できることを明らかにした。