

学 位 論 文 題 名

山地斜面における表土層の構造特性と
水分変動過程に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、自然災害の中で土砂災害による被害が顕著になっているが、山地流域における斜面崩壊や土石流等の土砂の生産・流出現象を把握することは、防災計画や流域保全計画を立案する上で基本的な課題である。本研究は、山地上流域に設定した観測斜面において行った斜面表土層の構造特性と各構造に対応した土質特性の把握ならびに経年的斜面水文観測の結果から、土層特性と斜面水文現象との関係について、表土層中の水分変動の三次元モデルの開発と、現地観測値との整合による非定常飽和不飽和浸透流解析とによって、斜面の飽和域形成・拡大過程の時空間的解析を行ったものであり、表層崩壊発生機構の解明と土砂災害防止計画への展開を目的としたものである。

第1章では、本研究の目的と方法、そして、研究対象について述べた。研究項目は、斜面表土層の分布と特性、斜面水文現象の実態と特性、斜面水分変動の解析である。研究対象地としては、我が国の代表的な荒廃流域である天竜川上流域の長野県高遠町野笹地区（標高：840～976m、流域面積：0.1km²、基盤地質：花崗岩）を選定し、観測斜面（平均傾斜30°～40°）を設定した。

第2章では、天竜川上流域で発生した主な土砂生産・流出現象のうち1982年災害に着目し、山腹斜面で発生した表層崩壊現象の概要を整理した。本地域で発生した表層崩壊は、面積260～860m²、崩壊深0.58～1.57mとなり、地質によって多少の違いはあるものの、基本的には降雨と表土層の特徴から崩壊現象を論じることができると考察した。そして表層崩壊はこれまでのように降雨規模（量）との関係のみから統計的に考えるのではなく、表土層の動態現象として取り扱う必要があるとの結論が得られた。

第3章では、斜面表土層の分布とその特性について検討を行った。ボーリング調査と簡易貫入試験の結果から、表土構造のパターン区分を試みた。その結果、いずれの斜面においてもNc値のプロファイルは漸変型が主で、本地区の表土は安定した条件下で風化が発達したかあるいは崩積土が堆積した土層構造が多いと考えられた。次に、各Nc値区分に基づく土層ごとに土質試験を行った結果、Nc値が5～10で、深さが0.5～1.5mの部位に土層・土質構造に急変域が見られ、この付近を境に斜面表土層の性質が大きく異なるという結果が得られた。すなわち表土層構造特性把握が表層崩壊の発生機構解明の主要課題であることを指摘した。

第4章では、山地斜面の水文観測結果と、斜面表土層中の水分変動状

況の対応についての検討から、降雨に伴う土層中の水分状況の変化が把握され、降雨に回答する水文現象の変動パターンの特徴が整理された。そして、降雨開始時の表土層の初期水分状況が湿潤状態で短時間降雨強度が大きければ、土壌水分状況は土層中の浸潤線の低下が明確に見られる「段階型」パターンを呈するとともに、地下水位や流出水の変動は急激上昇パターンを呈した。これらの現象は漸変型土層構造特有の現象であり、表土層内の水分変動は降雨と初期水分状況から推定することが可能であると指摘した。

第5章では、山地斜面の水文観測の結果から、表層崩壊の発生機構に関するトピック的な現象に注目し、崩壊の前兆現象について検討した。その結果、斜面脚部における飽和域の拡大は、地表付近の水分張力が $160\text{ cmH}_2\text{O}$ (pF2.2)の場合には連続雨量が 110 mm 以上でなければ認められないのに対して、地表付近の水分張力が $50\text{ cmH}_2\text{O}$ (pF1.7)の場合では連続雨量が 30 mm であっても飽和域が拡大することを明らかにした。そして、観測基準点地下水位が 2.7 m 以上上昇した時には谷頭部において地盤変動が観測され、さらに、連続雨量 120 mm 、ピーク時間雨量強度 24 mm の時にはパイプフロー発生と、パイプ(径約 12 cm)からの土砂噴出(約 1.5 m^3)が確認された。これらの現象は、表層崩壊発生の前兆現象としてきわめて重要であることを指摘した。

第6章では、山地斜面における表土層内の水分変動について、差分法を用いた三次元非定常飽和不飽和浸透流解析モデルを新たに構築し、数値シミュレーションによって解析を行った。検討の結果、パラメータの変化に対応したモデルの感度状況を明らかにするとともに、実測値の変動状況を計算値によって再現することができた。一方、土砂災害を発生させるような豪雨に対しては、斜面脚部から中腹部にかけて N_c 値5~10付近に最初の飽和域が形成され、その後表土層内全体に拡大するプロセスを明らかにした。このことは、豪雨時の表層崩壊の発生過程を解明する上できわめて重要な知見であることを指摘した。

第7章では、以上の検討結果をもとに山地斜面における飽和域形成と表層崩壊について総合的な考察を行った。まず、斜面安定解析を行った結果、地形的に縦断形状が上に凸の部位で安全率が低く、 N_c 値が5~10で深さが $0.6\sim 1.4\text{ m}$ の部位で安全率が最低となった。これに対して、1982年8月災害時降雨の場合には、安全率が N_c 値10の部位で 0.760 と最低となり、 N_c 値5の部位での 0.908 がこれに次ぎ、そして、その他の層では 1.0 以上となった。これらの結果は、本流域内での表層崩壊発生実績と調和するものであった。

以上より表層崩壊の発生機構は飽和域の拡大と表土層の弱層をもとに説明することができる。このうち、表層崩壊現象に大きな影響を与える降雨と土層中の飽和域の拡大は、降雨と初期水分状況との関連から説明することが可能となった。これに対して表層崩壊の発生場については、斜面表土層の不安定度合すなわち表土層内の相対的な弱層として把握された。これは、浸透流解析および安定解析によれば最も安全率が低くなる位置である。すなわち、表層崩壊災害を防止するには、このような表土層中の相対的な弱層に注目した対策立案が必要である。そして、流域・斜面管理計画を策定するには、斜面表土層の土層構造管理ならびに水文情報管理が重要であり、合理的でシステムティックな斜面管理ネットワークを構築していくことが肝要であることを提唱した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 新 谷 融

副 査 教 授 松 田 豊

副 査 教 授 笹 賀一郎

副 査 助教授 中 村 太 士

学 位 論 文 題 名

山地斜面における表土層の構造特性と 水分変動過程に関する研究

本論文は、表25、図81、写真11を含む総頁数167の和文論文である。別に、参考論文33編が添えられている。

近年、自然災害の中で土砂災害による被害が顕著になっているが、山地流域における斜面崩壊や土石流等の土砂動態機構を解明することは、地域防災計画や流域保全計画を立案する上での基本的課題である。

本研究は、斜面崩壊の発生機構を解明するために、山地流域の山腹斜面において斜面表土層の構造・土質特性調査ならびに水文経年観測を行い、表土層水分変動の三次元モデルの開発と非定常飽和不飽和浸透流解析とによって、斜面表土層の水分変動応答特性を明らかにしたものである。研究成果の概要は以下のようである。

1. 天竜川上流で発生した山腹崩壊の実態調査結果から、小規模な表層崩壊（崩壊面積260～860㎡、崩壊深0.5～1.5m）が大半を占めていること、降雨規模・パターンと崩壊発生についての統計的解析手法によるのではなく、山腹崩壊現象を表土層動態の降雨への応答現象として論じるべきであるとし、とくに斜面表土層における水分変動過程を明らかにすることの重要性を指摘している。

2. 簡易貫入試験およびボーリング調査から得られた斜面表土層の分布とその特性について検討を行った結果、表土は、安定条件下での風化発達土層および斜面崩土堆積土層が多いこと、次に各土層ごとに行った土質試験結果からNc値5～10、深さ0.5～1.5mの部位で土層・土質構造に急変域が形成されていること、そしてこの急変域を境に斜面表土層の性質が大きく異なっていることを明らかにしている。

3. 山地斜面の水文観測結果から、降雨に伴う表土層中の水分状況の変化を推測し、降雨に応答する水文変動パターンの特徴を抽出してい

る。そして、降雨開始時における表土層の初期水分状況が湿潤状態で短時間降雨強度が大きいケースでは、土層中の浸潤線の低下が明瞭な「段階型」土壌水分変動パターンを呈し、同時に地下水位や流出水は急激上昇変動パターンを呈することを明らかにしている。

4. 表層崩壊の発生に関するトピック的な現象に注目し、崩壊の前兆現象について検討した。その結果、斜面脚部における飽和域の拡大機構を、地表付近の水分張力と連続雨量との関連から明らかにするとともに、地下水位上昇時において谷頭部の地盤変動と、さらに多降雨時の局所的なパイプフロー発生を確認している。

5. 斜面表土層の水分変動について三次元非定常飽和不飽和浸透流解析モデルを構築し、数値シミュレーションを実施した結果、観測実績値の変動状況を計算値によって再現することが可能であることを明らかにした。そして、土砂災害発生豪雨に対しては、斜面表土層の N_c 値5～10の近縁に飽和域が形成され、その後斜面全域に拡大してゆくプロセスを再現した。このことは、豪雨時の表層崩壊の発生過程を解明する上できわめて重要な知見であることを指摘している。

6. 山地斜面における飽和域形成と表層崩壊についての総合的検討のために行った斜面安定解析から、安全率は縦断地形が上に凸の部位で低く、また N_c 値5～10、深さ0.5～1.5mの土層で最低となったが、とくに災害豪雨時にあっては1.0未満になった。この結果は本流域内の表層崩壊発生実績と調和するものであるとしている。

7. 以上より、表層崩壊の発生機構を飽和域の拡大と表土層構造とから考察し、とくに土層中の飽和域の形成・拡大については、初期表土層水分状況と降雨との関連から解明している。また表層崩壊の発生場については、浸透流解析および安定解析から最も安全率が低くなる表土層内の相対的弱層域であることを明らかにした。

以上のように本研究は、山地流域における斜面表土層の構造特性と水分変動過程を解明するとともに、表層崩壊の予測方法とその可能性を提示したものであり、その成果は学術ならびに技術面から高く評価される。

よって審査員一同は、別に行った学力確認試験の結果と合わせて、本論文の提出者小川紀一郎は博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格があるものと認定した。