

京都大学	博士（工学）	氏名	熊 俊
論文題目	Study on Simulation methods of Grounwater Behavior for Slope Stability Analysis (斜面安定評価のための地下水挙動の解析手法に関する研究)		
(論文内容の要旨) 道路斜面防災においては、予測降雨の情報等を考慮して斜面災害に対する安全性を経験的に決定し、現地で安全確認を目視等によって行う対策が行われているが、その手法は科学的根拠に乏しい客観性のない手法のために、効果的かつ効率的な通行止めや通行解除を行うことができないために交通への影響を軽減させる工夫が出来ず、また管理体制上においても大きな負担を要しているのが実情である。近年では局所的な豪雨が数多く発生しており、それら降雨の指標と斜面災害の発生との相関性も明確ではないため、これまでのような区間単位での災害履歴の分析に基づく降雨と斜面災害の関係に頼った判断では、道路の安全性の確保が予測困難となっている。このような背景を鑑み、適切な通行規制および解除時期を行うための斜面安定性評価システムの構築のため、個別の斜面に対するリアルタイムでの安定性を決定する支援システムの必要性が提唱されている。本研究はこの要求に応える道路防災のための斜面安定性評価システムを構築するため、降雨時の斜面内の地下水挙動に着目して斜面安定性を解析的に求める手法の開発に取り組んだ成果と考察まとめたものである。本論文は、序論および結論を含め6章から成っている。 第1章は序論であり、本研究の背景である異常気象時、特に降雨時の道路斜面防災の現状について記述し、世界的にも降雨による斜面災害、特に表層崩壊による災害事例が多発していることを実例を引用することによって示す。これら道路斜面災害に対して、道路利用者の安全を確保しながらも交通機能を最大限に発揮させるための効果的な通行規制と規制の解除を決定するシステムの構築が必要とされている実情に対して、これまでは従来の災害事例に基づいた経験に頼った災害発生の判断を行ってきたという問題点を指摘している。このため斜面災害に対して客観的で合理的な対策を講じることが困難であるということだけでなく、近年多発している局所的な豪雨に対して対処することができない事態が発生していることを論じている。本研究は、このような背景に基づいて、科学的な根拠に基づいた災害発生予測システムを構築することを提案する。具体的には、斜面内の水分挙動を短期的に計測したデータと結びつけた斜面安定解析によって斜面災害を予想することの重要性を論じ、本手法によって合理的な道路通行規制と解除が可能になることを明らかにしている。 第2章では、斜面内の水分挙動の把握が斜面安定性の評価に対して重要であるという序論での提唱に対して、これまでの事例を考察することにより、取り組むべき研究の課題を明確にする。例えば切土のり面の素因データと最大連続雨量を基にして限界雨量を定めて斜面安定性を結びつけるシステムなどを事例に挙げて、経験に基づいた手法の問題点をあらためて明らかにし、斜面内の水分挙動を的確に把握することで、個別のり面に対してどの程度の連続雨量で災害が生じるのかという判断できることを考察している。そのためには、計測機器の配置や選定法、その計測データを活用して定量的に斜面内の水分挙動を把握し予測する手法を構築することが必要なこと、さらにこれまでののり面での計測事例に基づいて、局所的な豪雨に対してもリアルタイムで斜面内の飽和度と降雨の関係を定量的に把握するシステムの構築の可能性を考察する。具体的には、地すべりに対しては、計測データと飽和不飽和浸透流解析と不飽和領域の湿潤重量を変えた Fellenius 法による斜面安定解析を練成させることによって、降雨量の入力に対して地すべり			

の安全率を算出する手法が可能となることを論じ、豪雨に対する表層崩壊に対しては、より簡便な計測システムで対処する新しい手法として、タンクモデルによる斜面内の水分挙動を解析する方法の構築の必要性を論じている。

第3章では、斜面内に配置した計測機器によって得られる飽和度および間隙水圧の変動特性に基づいて浸透流解析を実施し、予測降雨情報に対するのり面安定性を定量的に評価できるシステムの構築を試みる。地すべり現象の危険性のある斜面に対して、不飽和特性を決定するためのpF試験結果を含めた土質試験法を整理し、当試験によって現場観測データを再現できない場合には、1次元浸透流を実施することにより前記不飽和特性を設定する手法が有用であることを現場データを基にして考察する。その後、2次元の浸透流解析の結果を利用して、個別ののり面に対してFellenius法による極限平衡法安定解析を行い、降雨に対する安全率を計算することで斜面の安定性を評価する。本章では、本提案手法の妥当性を複数の現場に適用し、降雨量の入力に対して斜面の安全率の相対的な変化に着目することで斜面を管理する手法の妥当性も検証し、本手法の有用性を実証している。

第4章では、局所的な豪雨による表層崩壊に対して、より簡便な計測システムで対処する新しい斜面内の水分把握手法として、タンクモデルによる斜面内の水分挙動を解析する方法の実用化について論じる。本研究での手法は多段のタンクで構成されるタンクモデルを斜面内の地質状況に応じて多数点配置するマルチタンクモデルと称する方法であり、超短期の降雨データを入力することでリアルタイムに斜面内の水分挙動を把握することが可能なシステムが構築できることを実証している。その一方で実用化を図るために斜面内の水分挙動を決定する各種パラメータの決定法を考察すると同時に、解析パラメータが斜面内の水分挙動に与える影響を定量的に検証する。その結果実際のさまざまな降雨パターンに対して、従来の解析パラメータの決定法の長短所を整理し、マルチタンクモデル法の有用な運用を行うための指針を論じている。

第5章は、近年多発している局所的な豪雨波形に対して、前章で議論したマルチタンクモデルを適用するための新たなパラメータ決定法に関して論じている。マルチタンクモデル法では深度方向に設置する計測器の数に対応したパラメータを効率的に求める必要があるが、そのためにカルマンフィルターを導入することを検討する。さらに、従来の降雨パターンと異なる豪雨に対しても精度よく水分挙動を予測することを可能にするため、アンサンブルカルマンフィルターによる解析パラメータの決定法を開発する。本章においては、前章において論じた斜面内の計測機器の配置を含めたタンクモデル法の実用性を、あらためて実際の斜面において実証し、斜面の地形および地質の情報に基づいて考察される災害パターンと関連させて適用していく手法を整理することにより、地すべりから表層崩壊性の斜面災害に対して最適な安定性評価法を提案できることを示している。

第6章は、本論文の研究成果のまとめと今後の展開について記述する。今後の課題としては、本手法をより多くの実斜面に適用することにより、その信頼性の向上を図ることとしている。

以上本論文は降雨時の斜面安定性を斜面内の水分挙動に着目して評価することを提案するものであり、当手法を実用化するための計測手法と解析法の組み合わせを考察し、実際の斜面への適用事例を基にその有用性を実証した成果を取りまとめたものである。本研究成果により、地すべりや表層崩壊を含む斜面災害に対して、局所的な豪雨に対しても合理的に斜面安定性を評価するシステムの構築を図ることが可能になる。

(論文審査と結果の要旨)

世界的に降雨がもたらす斜面災害による被害は多発しているが、道路斜面などにおいてはどの国においても、連続雨量や累積雨量の組み合わせによる経験的な指標と現位置での安全確認に基づく手法による管理に頼っているのが実情であり、管理体制上の負荷が大きいながらも正確ではないために、科学的根拠に基づいた交通への影響を考慮する確かな安全対策を講じる手法の構築が求められてきた。特に近年多発している局所的な豪雨による斜面災害に対しては、これまでのような区間単位での災害履歴の分析に基づく降雨と斜面崩壊の關係に頼った判断では斜面の安全性は予測困難であり、個別の斜面に対するリアルタイムでの安定性を決定する支援システムの必要性が提唱されている。本研究はこのシステムを構築するため、降雨時の斜面内の地下水挙動に着目して斜面安定性を解析的に求める手法の開発に取り組んだものであり、その主な研究成果は次のとおりである。

(1) 従来の連続雨量や実効雨量といった雨量指標に基づく斜面安定性の判断では、斜面内の水分状態を正確に表現することは困難であり、特に斜面の安定性に重要な影響を与える先行降雨や降雨量パターンを加味することが出来ない実用上の問題点を明らかにし、飽和不飽和浸透流解析と不飽和領域の湿潤重量を変えた Fellenius 法による斜面安定解析を練成させることによって、降雨量の入力に対してリアルタイムで斜面の安全率を算出する手法を構築した。また安全率の相対的な変化に着目することで斜面を管理する手法の妥当性も検証し、新たな斜面管理手法の構築を図った。

(2) 飽和不飽和浸透流を運用するための解析パラメータの決定手法を、土壤水分計あるいは間隙水圧計を用いた数多くののり面での計測事例に基づいて考察し、短時間のモニタリングによる降雨情報と組み合わせて斜面内の水分飽和過程あるいは減少過程を高精度で予測するための手法を示した。具体的には、一次元解析によるパラメータを初期値として二次元浸透流解析を行う手法の有用性を実証し、パラメータを調整するための各種計測手法を現場計測例に基づいて体系的にまとめることで、本研究の斜面安定性システムの実用化を図った。

(3) 近年多発している豪雨による被害例の中でも多くを占める表層崩壊に対して、より簡便な計測システムで対処する新しい手法として、タンクモデルによる斜面内の水分挙動を解析する方法を実用化した。深度方向に設置する計測器の数に対応したパラメータを効率的に求めるためカルマンフィルターの考え方を導入することを検討したが、従来の降雨パターンと異なる豪雨に対しても精度よく水分挙動を予測することが可能なアンサンブルカルマンフィルターによるタンクモデルの解析パラメータを決定する方法を開発した。これにより、超短時間の降雨強度の測定値を使って斜面内の水分挙動を算出するタンクモデル法を構築することが可能となり、結果としてリアルタイムでの斜面崩壊の危険性を予測する手法を確立させることができた。

以上、本研究の成果は、切土斜面あるいは切土のり面を対象にして、降雨時における挙動を予測するのに不可欠な斜面内の地下水挙動の解析手法の構築と実用化を図ったものであり、学術的、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 21 年 11 月 13 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。