

審査の結果の要旨

論文提出者氏名

Gallage Chaminda Pathma Kumara

豪雨による斜面災害の対策手法として、アンカーや擁壁などの構造物を構築して斜面を補強する方法と、降雨量や地盤の状態を計器によって直接計測して斜面の状態を監視し、警報を発令し避難を促す方法がある。前者は、適切に施工されれば十分な効果が得られるがコストが高く、全国に無数にある不安定斜面に広く対策を施すには、後者のモニタリングの方法を開発することが適している。現在行われているモニタリングの問題点は、予測に用いられるパラメータが、比較的容易に得られる降雨量と過去の災害記録などに限られており、データ取得の困難な斜面ごとのきめ細かな地盤情報が考慮されない点である。本研究では、盛土法面にできるだけ少数の土壌水分センサーを設置し、常時計測した情報から斜面の水分特性を推定しておき、豪雨時にリアルタイムで斜面内の土壌水分の分布を推定して、斜面災害のリスクを評価する手法を提案した。

本論文の第1章は序論であり、上記の問題を提起している。

第2章～第4章は、以後に行う斜面模型実験で用いる土を使って、室内での不飽和土の要素実験を行い、斜面を構成する土の土壌水分曲線（SWCC）と、様々な含水状態での不飽和透水係数および三軸圧縮変形強度特性を測定し、豪雨時の斜面内への水分の浸透、強度の低下、斜面災害のリスクの増加を定量的にシミュレーションするための基礎データを取得した。土壌水分曲線は、Fredlundらが提案した4つのパラメータを含む数式でうまく表現できることを確認し、本研究で提案するリスク評価の方法ではこの式を用いることにした。不飽和透水試験では、透水係数をサクションでなく体積含水率に対してプロットすることで、吸水・排水過程のヒステリシスを取り除くことができ、リスク評価のための数値解析を簡略化できることを示した。三軸圧縮試験では、有効応力についての内部摩擦角は水分量や吸水・排水の状態によらず一定なのに対し、サクションについての内部摩擦角と粘着力は、水分量に依存することを示した。実験技術上の知見として、三軸供試体の端部だけでなく中央部のサクションも計測し、透水経路が長いために、一定のサクションを与えてから1週間以上時間をかけなければ、供試体内の水分分布が一様にならないことを示した。

第5章では、模型斜面の人工降雨実験を行い、斜面内の水分の挙動と斜面が崩壊に至るまでの変位を詳細に計測した。斜面への雨水の浸透、斜面地盤の強

度の低下、斜面崩壊の発生の過程を、前述の室内試験で得られた材料特性のパラメータを用いて、数値的に解析し、実測値と比べることで、提案するリスク評価の方法の妥当性を確認した。

第6章、第7章は、本研究で提案する斜面災害のリスク評価の方法を示し、前述の斜面模型実験の計測事例に適用して、その妥当性を確認した。この方法では、盛土法面内の土壌水分分布を把握するために、斜面内の3箇所にはサクション計を設置する。設置作業時に、斜面内部の土を採取し、比較的低コストの室内試験によって、密度、間隙比（飽和時の体積含水比）、飽和時の透水係数、および強度特性を測定しておく。その後、サクションと降水量を、継続的に計測する。最初の数回の降雨時の計測データに対して、これを説明できるようにパラメータを調整することで、斜面の土壌水分特性を推定する。以後、豪雨時には、このパラメータを用いて土壌水分の挙動を推定し、斜面地盤の強度の低下を推定し、斜面安定解析で安全率を計算して、リアルタイムで斜面災害のリスクを評価する。模型斜面の人工降雨実験に、この方法を適用したところ、最初の降雨時の計測値に合わせて決定したパラメータを用いて、それ以降の降雨時の挙動や、同じ材料を使った別の模型の挙動を推定することができた。また、計算にかかる時間は、実際の現象の1/3程度になり、斜面安定計算時の安全率を考慮することにより、斜面崩壊の数十分前に警報を発することができた。

一方、実物の鉄道盛土の法面に対しても、本研究で提案した方法の適用を試みた。降雨時の土壌水分の挙動を計測し、これを説明できるパラメータを推定しようとしたが、模型斜面の場合に比べて適切なパラメータを決めることが難しかった。これは、模型では斜面地盤や水分の初期分布が一様になるように管理されているのに対して、実盛土では地盤、水分分布ともに不均一性が強いからだと考えられる。また、現時点で用いている数値解析法は、斜面内で吸水と排水が同時に生じる状態を適切に考慮できない。降雨後に排水が始まり、斜面の安定性が回復する過程を推定して警報を解除するという使い方をするには、この点の改良も必要である。これらは、実用化に向けての今後の課題として、本研究で指摘された。

以上、少数の土壌水分量の計測情報から斜面の水分特性を推定し、豪雨時の斜面災害のリスクをリアルタイムで評価して警報を発する方法を提案した。その妥当性を検討するために、系統的な室内での不飽和土の材料実験と、小型斜面模型の人工降雨実験、実物盛土の降雨時の水分特性の計測、および理論的検討と数値解析を行った。この手法の精度の向上、適用可能な斜面の範囲の拡大、実現場での検証など、実用化に向けての課題が残されているが、低コストできめ細かな斜面防災手法の基本的な考え方を提案しており、今後の技術開発に貢献することが大である。

よって本論文は、博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。