

京都大学	博士 (工学)	氏名	菅原 快斗
論文題目	不飽和浸透流の解析手法と降雨流出モデルへの応用		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、降雨流出モデルにおける不飽和浸透流の解析手法について、Richards 式の解析解と流量流積関係式という二つの側面から、その課題を明確化し、解決手法を提案したものであり、序論、第 1 章～第 7 章、結論から構成されている。</p> <p>序論では、本論文の研究の背景と目的を述べ、全体の構成を示している。</p> <p>第 1 章では、Richards 式の解析解と流量流積関係式の既往研究をまとめている。Richards 式の線形化に基づく解析解は、重ね合わせの原理を用いることで離散的な入力に対する応答を解析でき汎用性を有することを示した。しかし、そのような解析解であっても降雨流出モデルへの適用については十分に議論されておらず、その検討が課題であると結論付けた。従来は流量流積関係式は斜面に垂直方向の水分量分布を考慮しておらず土壌の保水性を表す水分保持曲線を反映できていない。一方、近年の既往研究で平衡分布に基づく水分量分布を仮定することで水分保持曲線を内包させた流量流積関係式が提案されていることを示すとともに、不飽和透水係数に用いた関数の物理性やパラメータの推定法に課題があると指摘した。</p> <p>第 2 章では、地下水面を有する基岩層における不飽和浸透を想定し、線形化した Richards 式から任意の水分量境界と初期条件の下で解析解を導出した結果を述べている。また、導出した解析解を用いて流量を推定している。地下水面がある場合とない場合の不飽和浸透流を比較した結果、地下水面がある場合は、ない場合に比べてより湿潤な状態になりやすいことを明らかにした。また、基岩上の中間流の発生や消失に対応できるように、水分量の時系列データを上部境界に適用して計算する方法を提案し、仮想的な時系列水分量データを用いて計算を行った。その結果、浸透した雨水の再配分といった、より現実的な挙動を表現できることを示した。</p> <p>第 3 章では、鉛直不飽和浸透の特徴を把握するため、土層と風化基岩層における土壌水分観測を実施し、解析的に得られる土壌水分分布との比較を行った結果について述べている。観測の結果、鉛直不飽和浸透に関して、基岩層では各深さで同程度の時間的な遅れがみられること、基岩層境界付近の水分量変化は土層に比べて鋭敏であることを示した。離散化を必要としない解析的手法で現実の鉛直不飽和浸透を再現できるかを検証するため、圧力水頭を観測し、圧力拡散方程式の解析解を用いた再現計算を行った。その結果、対象とした全 14 降雨イベント中 12 イベントで Nash 指標が 0.7 以上となる良好な再現性を示した。一方、降雨が繰り返し発生する降雨イベントにおいては、拡散係数を一定とした解析解では再現が難しいことを明らかにした。</p> <p>第 4 章では、重力項を考慮したうえで観測降雨データを直接入力できる Richards 式の解析解を導出した結果を述べている。重力項を考慮することにより、降雨波形が拡散し、なだらかになる過程だけではなく、鉛直下方に移流する過程も表現できるようになることを示した。また、飽和境界を用いた場合の解析解を導出し、Green-Ampt 式で用いられるパラメータとの対応を明らかにした。Green-Ampt 式は様々な土壌に対するパラメータが提示されており、そのパラメータを援用することによって、解析解で用いるパラメータをより簡便に決定できるようにした。</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	菅原 快斗
<p>第 5 章では、水分保持曲線を反映する流量流積関係式を導出し、分布型流出モデルに適用した結果を示している。水分保持曲線と不飽和透水係数の関数として Brooks-Corey Mualem モデルを用い、斜面に対して垂直方向の平衡状態を仮定することによって解析的に流量流積関係式を導出した。得られた流量流積関係式を分布型流出モデルである RRI モデルに適用し、実際の降雨イベントを対象として流出計算を行った。土壌タイプは Sandy loam、Loam、Silt loam、Clay loam の 4 つを設定し、異なる無降雨期間を経た複数の初期条件を用意した。その結果、いずれかの土壌パラメータを用いることで対象 9 流域中 7 流域において Nash 指標が 0.8 以上となり、本研究で提案した流量流積関係式が観測流量を再現できることを確認した。また、水分保持曲線がピーク流量に与える影響を分析した結果、初期条件の違いによって最大で 0.75~1.25 倍程度ピーク流量が変動し、ピーク流量の違いはイベント開始時の表面流発生までの水量の違いに対応することを示した。</p> <p>第 6 章では、土層の一部を高い透水係数を設定することによりパイプ流を考慮した流量流積関係式を導出し、RRI モデルに適用した結果を述べている。導出した流量流積関係式はパイプの飽和透水係数、パイプの高さ、パイプの太さをパラメータとして有し、パイプの排水速度や容量を流量流積関係に反映できる。構築したモデルを用いて、パイプがある場合と土層全体が高透水係数である場合を仮定して、流出計算を行った。発生する流出形態の空間分布を確認したところ、パイプ流を考慮する場合には土層全体が高透水係数の場合と同様に不飽和側方流のみが発生する場所が多くなることがわかった。一方、河道付近では、土層全体が高透水係数の場合は飽和・不飽和流が発生する場所が支配的であるのに対し、パイプを考慮する場合は雨水が集積する場所において表面流が発生することを示した。</p> <p>結論では、本研究をまとめ、今後の展望について述べている。</p>			

氏名	菅原 快斗
----	-------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、降雨流出現象のモデリングで重要となる不飽和浸透流について、複数の条件下で Richards 式の解析解を導出するとともに、分布型流出モデルに適用するための不飽和浸透流モデルを提案し、以下の研究成果を得ている。

(1) 地下水面を有する基岩層中の不飽和浸透流を想定して、任意の水分量境界条件と初期条件下で、線形化した Richards 式の解析解を導出した。また、基岩上の飽和側方流の発生や流出を考慮できるように、上部境界条件に水分量を設定できる方法を提案した。解析解の結果から、地下水面がある場合には、地下水面がない場合に比べて湿潤な状態が継続しやすいことを示した。

(2) 土層と風化基岩層における鉛直浸透流を表現するために、圧力拡散方程式の解析解を導出した。解析解の検証を目的として、土層と風化基岩中の水分量変化を観測し、基岩層の境界付近では、土層に比べて水分量が鋭敏に変化することを明らかにした。また、提案した解析解によって出水時の圧力分布の変化を的確に表現できることを示した。

(3) 重力項を考慮したうえで、降雨データを入力とする Richards 式の解析解を導出した。重力項を考慮することにより、鉛直下方に移流する過程についても計算が可能となった。また、飽和境界を用いた場合の解析解を導出し、Green-Ampt 式で用いられるパラメータとの対応を明らかにした。

(4) 水分保持曲線を反映する流量流積関係式を導出し、分布型流出モデルに適用した。導出した流量流積関係式は、水分保持曲線と不飽和透水係数の関数として Brooks-Corey Mualem モデルを用い、斜面に対して垂直方向の平衡状態を仮定することによって解析的に導出した。得られた流量流積関係式を分布型流出モデルに適用し、実際の降雨イベントを対象として流出計算を行った。その結果、一般的な土壌パラメータを用いることで降雨流出を妥当に再現できることを確認した。また、土壌パラメータと初期条件によって、流量を低減させる効果が顕著に異なることを明らかにした。

(5) 土層の一部の透水係数を高く設定することにより、パイプを考慮した流量流積関係式を導出し、分布型流出モデルに適用した。導出した流量流積関係式は、パイプの飽和透水係数、パイプの高さ、大きさをパラメータに有し、その排水速度や容量を流量流積関係に反映できる。排水速度が十分なパイプがある場合には、高い透水係数を土層全体に設定した場合と同様に、不飽和側方流のみが発生する領域が拡大することを示した。

以上のように、本論文は、不飽和浸透流の解析手法と降雨流出モデルへの応用について理論的かつ実用的な方法を提案したものであり、学術上、実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、令和4年2月16日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。