

氏 名	シュ 徐 永 強
学位(専攻分野)	博 士 (農 学)
学 位 記 番 号	農 博 第 1483 号
学位授与の日付	平 成 17 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	農 学 研 究 科 地 域 環 境 科 学 専 攻
学位論文題目	Applications of Richards Equation to Earth Dam Design and Runoff Problems (アースダムデザインと流出問題に対する Richards 式の応用)
論文調査委員	(主 査) 教 授 河 地 利 彦 教 授 青 山 咸 康 教 授 三 野 徹

論 文 内 容 の 要 旨

近年, 世界の多くの地域において, 急速な経済発展と人間活動による水不足の増大や水質の悪化, 洪水, 干ばつなど, 水資源に関連した諸問題が深刻化している。このような問題を未然に防止するためには, 水理構造物の適切な設計, 水理・水文現象の解析と予測を行うことが必要であり, とくに, 数値的手法の活用は重要かつ有効である。本論文は, 飽和 - 不飽和浸透流の支配方程式である Richards 式に関連した数値手法と逆解析手法を, アースダム横断面の最適設計, 並びに小流域における流出解析へ応用することについて検討したものである。

第 1 章は緒論であり, 水資源問題に対する数値解析のアプローチの重要性, 水理・水文現象に対する数値モデル化手法と逆解析手法について述べ, 本研究の目的と意義を示している。

第 2 章では, Richards 式およびその飽和 - 不飽和浸透流と流出問題への応用, 浸透流における逆解析のさまざまな数値手法, 並びに流出問題に関する従来の研究を総括・整理している。

第 3 章では, アースダム横断面の最適水理設計問題を, 多孔性媒質における飽和 - 不飽和浸透流の定常モデルに関する逆問題として取り扱っている。最適制御理論に基づく逆問題の定式化においては, 堤体からの漏水量と築堤材料のコストの最小化を最適設計の目的として評価関数を定義し, ダム横断面における土質材料の分布を制御変数に設定している。定常問題として定式化した最適化問題の式系には正則でない式が含まれるため, これを擬似非定常問題に置き換え, 時間発展系の漸近解として最適解を得る方法を考案している。このために擬似非定常問題に対する数値スキームを開発し, 理想的なアースダム横断面における土質材料の最適配置計算を行っている。結果は, 低透水性の傾斜粘土コアを横断面の上流側に配置すべきであることを示している。また, 不飽和領域の存在が最適設計の結果に大きく影響しており, Richards 式の応用が極めて有用であることを明らかにしている。

第 4 章では, 森林などの植生に覆われた小流域における降水 - 流出過程に対する複合型流出モデルを開発している。このモデルは, 植物と土壌を包括した一般化多孔性媒質における水分移動過程を記述するための 1 次元 Richards 式を, 圧力水頭分布と流出流量に関連付ける線形出力ジェネレータに結合したものである。線形出力ジェネレータのパラメータは, 降水 - 流出の観測時系列データから同定している。滋賀県甲賀市水口町にある小流域で実測された時系列データを用いてモデルの同定と検証を行ない, このモデルが流出流量の確率論的予測に有効であることを明らかにしている。

第 5 章では, 小流域における流出過程をより精度よく再現するため, 鉛直 2 次元 Richards 式モデルを開発している。このモデルにおいては, 小流域を表す 3 次元領域は, いくつかの地形的特徴を保存する座標変換法によって鉛直 2 次元領域に単純化でき, この領域内で水理・水文現象が, Richards 式に支配される圧力水頭の時空間分布によって表現できるとしている。モデルの有効性を検証するため, 第 4 章と同じ小流域を対象として, まず領域における透水性パラメータの配置を実測データ時系列から試行錯誤法により同定し, 次いで検証計算を行っている。その結果, 同定された透水性パラメータの配置が, 小流域における植生と土壌の鉛直 2 次元構造を反映していることを明らかにしている。

第6章では、第5章で開発した Richards 式モデルに随伴状態法を適用し、パラメータの感度解析、さらには、その感度解析の妥当性を確認するための流出流量時系列データを用いた検証計算を行っている。その結果、随伴変数から計算される感度が、モデル構築とパラメータ同定のために有用な情報をもたらすことを明らかにしている。

終章である第7章では、これら一連の研究の整理・要約を行っている。結論として、この研究で開発した Richards 式モデルに関する数値手法と逆解析手法は比肩するもののない革新性を有し、水理・水文現象のモデル化において新たな選択肢の一つになり得る有用な手法であるとしている。また、今後の研究課題や発展の方向性についても論じている。

論文審査の結果の要旨

多孔性媒質における飽和 - 不飽和浸透流の支配方程式である Richards 式は、これまで、主として土壌水分の移動過程を表すモデルとして用いられてきた。また、多孔性媒質の透水特性を記述する水理パラメータの値を得るため、実験的な測定とともに、Richards 式モデルに関する逆解析手法の開発もなされてきた。しかしながら、水理パラメータに関する逆解析手法を、土木構造物の最適水理設計に応用した研究は見当たらない。一方、Richards 式モデルを土壌以外のより一般的な飽和 - 不飽和浸透領域へ適用する試みは、ようやく緒についたところであり、その確立が鶴首されている。本論文は、Richards 式モデルがこのように広範な適用の可能性を有する点に着目して、アースダム堤体横断面の最適設計、さらには小流域における流出解析に対して、Richards 式の応用を試みたものであり、評価できる主要な点は以下のとおりである。

- (1) 水理パラメータの同定を目的としたこれまでの逆解析手法を発展させ、水理構造物の最適設計手法を提示した。このような手法を用いることにより、アースダムの水理特性並びに材料コストをもっとも有利なものとする堤体横断面の最適な土質材料配置を求める方法を示した。
- (2) 森林等の植生を土壌と同等の一般化多孔性媒質としてとらえ、Richards 式モデルを包括的に適用することにより、流域全体における水分移動過程を統一的に取り扱う方法論を提示した。これにより、土壌と植生が降水浸透や流出に与える影響を、定量的に取り扱うことのできる流出解析モデルを開発した。
- (3) 鉛直 1 次元 Richards 式と線形出力ジェネレータからなる複合型流出解析モデルを開発した。このモデルは、同定すべきパラメータが線形出力ジェネレータのみに集中しているため、実用的にも十分な精度を与えながらパラメータの同定が安定かつ容易に行えるという特徴を有している。
- (4) 小流域を表す 3 次元領域を、いくつかの地形的特徴を保存しつつ鉛直 2 次元領域に単純化し、その単純化領域における流出解析モデルを鉛直 2 次元 Richards 式を基礎として開発した。このモデルは、領域の単純化によって同定すべきモデルパラメータの数が実用的な程度にまで減少し、同定作業が容易になること、また一般化多孔性媒質の透水特性が定量的に把握できるなどの点で優れて有用である。
- (5) Richards 式モデルにおける水理パラメータの感度解析を、随伴状態法を用いて行った。この方法は、変分法に基づいて、複数のパラメータの感度を一括して求めるものであり、これにより最適設計やパラメータの同定といった逆問題全般に対して有用な情報を得ることができる。

以上のように、本論文は、Richards 式モデルおよびその逆解析手法の土木工学的応用に関して新たな展開を試みたものであり、水資源工学、水利施設工学、水文学の発展、また、水理構造物設計や流域水管理の実際面に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、平成17年2月14日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士（農学）の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。