

## (論文内容の要旨)

本論文は、浸透能が高い多孔質媒体中に層流あるいは乱流状態で側方、及び鉛直に浸入する開水路流れの基本特性に関して理論的、実験的、及び数値解析的に考察するとともに、降下浸透を伴う浸透層上のダム破壊流れ、本研究で提案する都市水害対策を目的とした道路下部粒状路盤層への浸透型側溝からの雨水浸入過程等、二、三の実際問題への適用について研究を行ったものであり、9章からなっている。

第1章は序論であり、研究の動機と目的を記述している。

第2章、及び第3章では、本研究で用いる多孔質媒体中の層流と乱流の基礎方程式系を記述するとともに、数値解析モデルの基本事項について記述している。

第4章では、まず一定水位、及び一定流量の条件下で浸透能の高い多孔質媒体中に層流あるいは乱流状態で急激に側方浸入する開水路流れに関して、水深積分モデルの基礎式に流下方向の水深、流速分布形の相似性を仮定することで、時間的な浸入過程が慣性・圧力領域、圧力・抗力領域に分類されることを示した。また、層流および乱流状態の抵抗則に対して、流れの先端距離、入口流速、入口水深等の特性量の時間発展に関するべき乗則を導くとともに、水深と流速分布の相似分布形を導いた。次に、粒径の異なる三種類のガラス・ビーズを用いた水理実験を行い、先端距離と時間の関係中に先に出現する慣性・圧力領域と後続の圧力・抗力領域が存在すること、及び水深分布の相似解と実験結果が適合することを示した。さらに、鉛直2次元多孔質中流れの基礎式に対してVOF法にCIP法を適用した浸入過程の数値解析を行い、数値計算結果と理論解析、水理実験結果が適合していることを示した。

相似理論を拡張することで、側方浸入初期から十分時間が経過した領域までを統一して取り扱うことができる空間積分モデルを提案した。すなわち、流下方向の水深と流速分布に相似分布を仮定して、水深積分モデルの基礎式を原点から侵入の先端まで流下方向に積分することで、浸入初期から十分時間が経過した領域までを再現可能な非線形連立常微分方程式系を導くとともに数値解析を実施した。先端距離等の特性量の解析結果には、まず慣性・圧力領域が現れ、引き続き圧力・抗力領域が出現することを示し、本研究で導いた空間積分モデルを用いて急激な側方浸入現象を統一的に表現できることを検証した。

第5章では、都市水害対策法として本研究で提案する、豪雨時雨水の貯留・浸透を目的とした道路下部粒状路盤層への側方浸透型側溝からの浸入・貯留法について基礎的な検討を行った。すなわち、多孔質媒体の端に設置した隔壁から、水が多孔質媒体中に鉛直落下しその後浸入していく現象について水理模型実験を行うとともに、第4章で行った水深積分モデルを用いた理論解析を応用して、隔壁からの流入流量や流入水先端位置の時間発展に関するべき乗則を理論的に導くことで浸入・貯留現象の基本特性を明らかにした。さらに、VOF法にCIP法を適用した数値計算法によって水脈落下を伴う急激な流れの浸入に関する実験結果を再現することで数値計算法の適用性を検証した。

第6章では、大粒径多孔質媒体中への鉛直方向の急速浸透現象に関して、従来の研究では考慮されていない運動方程式中の鉛直加速度を考慮した基礎式を適用したモデルを提案し、浸透初期における上層水柱の急激な圧力鉛直分布変化を考慮した解析法を示した。大粒径ガラス・ビーズを用いた水理実験も行い、浸透初期において本研究の結果が従来の解析法より実験結果と適合することを示した。

第7章では、急激な鉛直浸透を伴う開水路流れの例として、大粒径多孔質媒体への降下浸透を伴う浸透層上のダム破壊流れについて考察した。水理模型実験により大粒径の多孔質媒体上でダム破壊流れを発生させ、急激なダム破壊流れの浸入と同時に多孔質層への急速な浸透が生じる流れの可視化を行った。その後、本研究で用いている数値計算法を適用することで実験結果を再現した。数値計算結果は実験結果とよく適合しており、急速な鉛直浸透を伴う開水路流れへの本数値解析法の適用可能性を検証した。

第8章では、第6章で基本的な検討を行った道路下部粒状路盤層への側方浸透型側溝からの浸入・貯留法に関して、本研究の数値解析法を用いて、実現象を模擬したシミュレーションを行った。すなわち、浸透層の横に側壁を有する側溝を設置し、側溝に雨水の非定常な流入条件を与えることで水位を上昇・下降させることにより浸透路盤層への浸入・貯留過程のシミュレーションを行った。粒状路盤層への初期浸入過程から貯留過程を経て、側溝の水位低下により路盤層から側溝への逆流が生じるまでの一連の非定常過程が定性的に再現されており、今後本解析法を用いて、道路下部粒状路盤層への雨水浸透貯留法の実際的な有効性を検討することができることを示した。

第9章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、浸透能が高い多孔質媒体中に層流あるいは乱流状態で側方、及び鉛直に浸入する開水路流れの基本特性に関して理論的、実験的、及び数値解析的に考察するとともに、降下浸透を伴う浸透層上のダム破壊流れ、本研究で提案する都市水害対策を目的とした道路下部粒状路盤層への浸透型側溝からの雨水浸入過程等、二、三の実際問題への適用について研究を行ったものである。得られた成果を要約すると以下ようになる。

1. 一定水位、または一定流量の条件下で浸透能の高い多孔質媒体中に層流あるいは乱流状態で急激に側方浸入する開水路流れに関して、水深積分モデルの基礎式に流下方向の水深、流速分布形の相似性を仮定することで、時間的な浸入過程が慣性・圧力領域、圧力・抗力領域に分類できることを示した。また、層流および乱流状態の抵抗則に対して、流れの先端距離、入口流速、入口水深等の特性量の時間発展に関するべき乗則を導くとともに、水深と流速分布の相似分布形を導いた。次に、粒径の異なる三種類のガラス・ビーズを用いた水理実験を行い、先端距離と時間の関係中に先に出現する慣性・圧力領域と後続の圧力・抗力領域が存在すること、及び水深分布の相似解と実験結果が適合することを示した。さらに、鉛直2次元多孔質中流れの基礎式に対してVOF法にCIP法を適用した浸入過程の数値解析を行い、数値計算結果と理論解析、水理実験結果が適合していることを示した。

2. 相似理論を拡張することで、側方浸入初期から十分時間が経過した領域までを統一して取り扱うことができる空間積分モデルを提案した。すなわち、流下方向の水深と流速分布に相似分布を仮定して、水深積分モデルの基礎式を原点から浸入水の先端まで流下方向に空間積分することで、浸入初期から十分時間が経過した領域までを統一的に再現可能な非線形連立常微分方程式系を導いた。数値解析の結果得られた浸入水の先端距離等の特性量と時間との関係を検討することで、まず慣性・圧力領域が現れ、引き続き圧力・抗力領域が出現することを示すとともに、本研究で導いた積分モデルにより急激な側方浸入現象を統一的に表現できることを検証した。

3. 上記解析法を、都市水害対策法として本研究で提案する、道路下部粒状路盤層への側方浸透型側溝からの雨水浸入・貯留法について適用した。すなわち、多孔質媒体の端に設置された隔壁上から水が多孔質媒体中に落下しその後浸入していく現象について、水理模型実験を行うとともに、上述の水深積分モデルを用いた解析法を応用して、隔壁からの流入流量や流入水先端位置の時間発展に関するべき乗則を理論的に導くことで浸入・貯留現象の基本特性を明らかにした。さらに、VOF法にCIP法を適用した数値計算法によって水脈落下を伴う急激な流れを再現し、実験結果と比較することで数値計算法の適用性を検証した。

4. 急激な鉛直浸透を伴う開水路流れの例として、大粒径多孔質媒体への降下浸透を伴う浸透層上のダム破壊流れについて考察した。水理模型実験により大粒径の多孔質媒体上でダム破壊流れを発生させ、急激なダム破壊流れの浸入と同時に多孔質層への急速な浸透が生じる流れの可視化を行った。その後、本研究で用いている数値計算法を適用することで実験結果を再現した。数値計算結果は実験結果とよく適合しており、急速な鉛直浸透を伴う開水路流れへの本数値解析法の適用可能性を検証した。

要するに本論文は、浸透能が高い多孔質媒体中に層流あるいは乱流状態で急激に浸入する開水路流れの基本特性に関して理論的、実験的、及び数値解析的に考察するとともに、水工学分野で対象とする実用的な流れ場に対して解析モデルの有効性を検証したもので、学術上、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8月3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。