

京都大学	博士 (工学)	氏名	QIYUN PANG
論文題目	DEVELOPMENT OF THREE-DIMENSIONAL FLOW MODEL CONSIDERING SURFACE AND SEEPAGE FLOWS IN A GENERALIZED CURVILINEAR COORDINATE SYSTEM AND ITS APPLICATION IN HYDRAULIC ENGINEERING (表面流と浸透流を考慮した一般座標系での3次元流れ解析モデルの開発と水工学における応用)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>近年の災害外力の増大に対して、効果的な治水計画や持続可能なマネジメントを検討するには、河川洪水流や地形の変化、河川から市街地への氾濫流を精度よく予測できる数値解析モデルが必要となる。河川洪水流や河床変動の数値シミュレーションでは、これまで実用性の観点から、3次元 Navier-Stokes 方程式を水深方向に積分して導かれる水深積分モデルが広く用いられてきた。しかし、構造物周辺を含めた河道内の流れや河川洪水流が市街地まで拡がる複雑な流れとそれに伴う土砂輸送を精度よく予測するためには、3次元流れ解析モデルが必要である。</p> <p>一方、3次元モデルによる流れ解析も行われており、直交座標系や水面と河床面に沿って軸を設定する移動一般座標系での基礎式が用いられてきた。しかし、河川は一般に蛇行して流れているため、直交座標系では非河川域にも計算格子を設定する必要があり、効率的なシミュレーションを行うことが難しい。また、移動一般座標系では、水面と河床面に軸を設定するため水域が拡大する氾濫流解析への適用が困難であると考えられる。</p> <p>そこで、本研究では、河川の流れと地形変化に関する数値解析モデルについて、効率的な解析手法を構築するために、河道に沿って座標系を設定した一般座標系を適用するとともに、3次元 Reynolds Averaged Navier-Stokes 方程式 (RANS) をもとに、水面変動の時間的変化を求めるための密度関数法、表面流と浸透流を同時に予測するためのポーラスメディア法を導入し、3次元流れ解析モデルの高度化を行った。さらに、流れ解析モデルと土砂輸送モデルを組み合わせ、地形変化を予測できるモデルを開発した。数値解析モデルを水工学における基本的な流れ場に適用し、モデルの妥当性を検証した。</p> <p>第1章は序論であり、本論文の研究背景、研究の目的、および本論文の構成を述べている。</p> <p>第2章では、一般座標系に変換するための座標変換の関係式、微分演算を用いて一般座標系における Navier-Stokes 方程式を導出するとともに、数値解析手法、乱流モデルとして採用した2次非線形 <math>k-\varepsilon</math> モデル、圧力補正のアルゴリズム、水面変動を予測するための密度関数法、境界条件の設定について説明している。</p> <p>第3章では、側壁に堰を設置した直線水路、湾曲水路での横越流現象を対象に3次元流れ解析モデルを適用した。直線水路の横越流現象では、堰の高さや長さが異なる条件で数値解析を行い、堰付近での急激な水面上昇など、水深・平均流速の縦断分布が実験結果とほぼ適合することを示した。また、3次元数値解析結果における鉛直断面内の主流速分布から堰下流側の底面付近での剥離流の形成と横越流によって引き起こされる2次流構造を確認するとともに、底面付近での剥離流のメカニズムを水面変動とそれに伴う圧力勾配の観点から考察した。次に、湾曲水路の横越流現象では、堰の高さ、流入流量が異なる条件で数値解析を行い、直線水路と同様に水深・平均流速の縦断分布を概ね再現できることを示した。さらに、相対堰高 <math>w/B</math> (堰の高さ <math>w</math>、水路幅 <math>B</math>) の違いによって堰下流の内岸側で形成する剥離域のスケールや堰周辺での2次流分布が</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	QIYUN PANG
<p>異なることを示した。</p> <p>直線水路、湾曲水路での横越流現象に関する数値解析を通して流出口が2つある場合での流入流量に対する越流量比が概ね再現できることを示した。特に、湾曲水路の場合、<math>w/B = 0.175</math>では、流入流量の増加に伴って横越流量が大きくなるのに対し、<math>w/B = 0</math>では、流入流量の増加に伴って横越流量が小さくなるという実験結果の特徴を良好に再現した。</p> <p>第4章では、ポーラスメディア法を導入することで表面流と浸透流を同時に予測できるように3次元流れ解析モデルを拡張した。多孔質媒体中の抗力については Darcy 則を適用した。数値解析モデルをまず多孔質媒体中、および多孔質床上のダム破壊流れに適用し、水面形を精度よく予測することを確認した。次に、サクションを伴う開水路流れの数値解析を行い、底面への浸透によって多孔質媒体近傍の流速分布形が変化し、対数則とは異なる分布を示すという特徴を再現した。さらに、湾曲水路における河床変動後の開水路流れに適用し、主流速と2次流の複雑な鉛直分布形、水面形に関して実験結果を概ね再現できることを示した。また、湾曲部内岸で剥離流が生じる様子も再現した。</p> <p>第5章では、第4章で構築した表面流と浸透流の同時解析手法に、掃流砂を対象とした土砂輸送モデルを組み合わせ、河床変動を予測できるモデルの開発を行った。ポーラスメディア法を用いているため、地形変化後の流れ解析においては、地形変化に応じて計算格子内の固相の体積濃度を毎時ステップ計算し、基礎式に反映させることで河床近傍の流れを予測することとした。連続蛇行水路における河床変動解析を行い、平均流速、2次流やそれに伴う外岸側での土砂の侵食、内岸側での砂州の形成を再現した。また、流れ解析モデルに一般座標系での3次元モデルを用いることで既往の結果と比較して精度が大幅に向上したことを確認した。さらに、初期の堤体形状に沿って一般座標系を設定し、正面越流による堤防の侵食過程の数値解析を行った。越流侵食時では、堤体表面に沿った流れを捉えることができるため、デカルト座標系での既往の数値解析結果より天端近傍の侵食特性を再現することができた。</p> <p>第6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。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本研究は、河川の治水計画や持続可能なマネジメントを考える際に必要となる流れと地形変化に関する数値解析モデルにおいて、一般座標系を用いた高度な3次元流れ解析モデルを開発することにより、河川洪水流と地形変化の予測精度の向上、水工学における種々の現象への応用について検討したものである。得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 一般座標系での3次元流れ解析モデルを用いて、側壁に堰を設置した直線水路、湾曲水路での横越流現象に関する数値解析を行い、流出口が2つある場合での流入流量に対する越流量比、水深・平均流速に関する堰周辺の流れ構造を概ね再現できることを示した。また、数値解析結果から鉛直断面内の主流速分布において堰下流底面付近での剥離流の形成と横越流によって引き起こされる2次流構造を確認した。
2. 河床近傍の流れを精度よく予測できる手法として、一般座標系での流れ解析モデルにポーラスメディア法を適用することで、表面流と浸透流を同時に予測できる流れ解析モデルの開発を行った。多孔質媒体中および多孔質媒体上のダム破壊流れ、サクションを伴う開水路流れ、湾曲水路の開水路流れへの適用を通じて、得られたモデルが、表面流から浸透流への遷移過程や主流速、2次流流速の鉛直分布形の変化を適切に予測できることを示した。
3. 流れ解析モデルに掃流砂を対象とした土砂輸送モデルを組み合わせ、河床変動解析を行った。平均流速、2次流やそれに伴う外岸側での土砂の侵食、内岸側での砂州の形成を再現することに成功するとともに、正面越流による堤防の越流侵食においては堤体表面上の流れと天端の侵食特性を再現できることを示した。

本論文は、表面流と浸透流を同時に予測できる一般座標系での3次元流体解析モデルを構築し、土砂輸送モデルと組み合わせ、河川洪水流と地形変化を精度よく予測できる高度な数値解析モデルを提案したものであり、得られた成果は、水工学・河川工学の分野における要素技術の発展として学術上、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、令和6年1月19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。