

氏名	おん だ しんいちろう 音 田 慎 一 郎
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2488 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	工 学 研 究 科 土 木 工 学 専 攻
学位論文題目	開水路流れの水深積分モデルの高精度化とその応用に関する研究

論文調査委員 (主査) 教授 細田 尚 教授 戸田 圭一 助教授 牛島 省

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、流れの水深積分モデル中に鉛直加速度や流速分布の局所的变化の効果を組み込むことで、流体の振動・波動現象、及び河川洪水流や河床変動現象に適用するための解析モデルを高精度化するとともに、モデルを実用的問題に応用するための数値解析手法などについて検討したものであり、全7章で構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的、本論文の検討内容とその構成が記述されている。

第2章では、通常ブシネスク方程式と呼ばれる、鉛直加速度を考慮した開水路流れの水深積分モデルに関して、そのシステムティックな高精度化法の検討を行った。ブシネスク方程式は、水の波や波浪のような波動現象を多次元モデルを用いることなく水深積分型モデルで解析する場合に用いられるが、少なくとも微小振幅波特性を精度よく再現する能力を有することが必要とされる。そこで、非回転条件に適合する流速分布形を逐次求める方法と、Madsen & Schaffer がポテンシャル流れに対して適用した線形分散関係の singularity を解消するための分散項の修正法を同時に適用することで、基礎式が段階的に高精度化されることを示した。さらに、従来の修正ブシネスク方程式では明らかでなかった分散項の修正法と流速分布形、及び圧力分布形との関係を明らかにすることで、平均流速で表示できる流速分布形、圧力分布形を導いた。

得られた基礎式を矩形水槽内の水面振動現象に適用し、線形解析と微小振幅波理論を比較することで、線形分散関係や流速分布形が従来のモデルより高波数領域まで微小振幅波理論に適合することを示した。また、非線形領域においても、非線形解析結果と VOF 法及び移動一般座標系を用いた鉛直2次元数値解析結果を比較することで、基礎式の適用性のある程度検証した。

第3章では、これまでの応用例が少ない移動一般座標系での浅水流方程式を用いて、種々の条件下での水槽内流体振動について検討した。まず基本的な例として、一定加速度場に置かれた水槽内の流体運動、水槽の壁が移動あるいは振動する場合の流体振動などを取りあげ、数値解析手法を提案するとともに計算結果と理論解を比較するなどして、解析法の妥当性を検証した。

さらに、移動一般座標系での浅水流方程式を振動台上に置かれた水槽の流体振動現象に適用した。まず振動台を用いた基礎水理実験を行い、水面振動の特性について整理した。次に、浅水流方程式と鉛直加速度を考慮したブシネスク方程式の理論解を求めるとともに数値解析を行い、水理実験結果と比較することで基礎式の適用条件や数値解析法の妥当性を検証した。特に、振動台の振動振幅、周波数、初期水深から構成される無次元パラメータによって、基礎式や理論解が適用可能な範囲を検討した。

第4章では、小規模河床波(砂堆や反砂堆)の発生・発達過程と流れの抵抗特性を再現できる水深積分モデルに基づいた数値解析モデルを構築した。従来の水深積分モデルでは、河床に形成される小規模河床波の発生・発達から平衡状態にいたるまでを再現することができなかった。そこで、鉛直加速度を考慮したブシネスク方程式と非平衡流砂モデルを組み合わせたモデルを基本とし、底面せん断応力の評価法に流れの局所の変化を考慮するなどしてモデルを改良することで、小規模河

床波の発生から平衡状態に至るまでを比較的容易に再現可能にした。また既往の実験的、理論的研究に基づいて、小規模河床波の発達過程だけでなく、その形状特性、河床波形成の領域区分、及び流れの抵抗増加特性の再現性についても検証した。

第5章では、河川湾曲部で生じる湾曲の2次流の効果を水深積分モデルに組み込み、モデルを高精度化する手法を提案した。すなわち、従来の実験的、理論的研究、あるいは第6章の3次元乱流解析結果において、主流流速分布が2次流の影響により局所的に変化することが確認されるとともに平均流速場に影響することが指摘されており、そのメカニズムを考察することで流速分布変化を表現できる簡易なモデルを考案した。次に、その流速分布のモデルを従来の河川流を対象とした一般座標系での水深積分モデルに組み込んで、実際の連続蛇行水路実験の条件下で数値解析を行った。さらに、流速分布について計算結果と水理実験結果、及び3次元乱流解析結果と比較することでモデルの妥当性を検証した。

第6章では、本研究を通じて水深積分モデルの改良のために必要となる3次元乱流解析についてまとめ、二、三の解析結果を示した。乱流モデルには、レイノルズ応力の実現条件 (Realizability) を考慮した実用的な非線形 $k-\epsilon$ モデルを適用した。移動一般座標系で記述された基礎式に有限体積法を適用して河道湾曲部の流れなどの数値解析を行い、実験結果と比較することでモデルの妥当性を検証するとともに、水深積分モデル改良のための理論構築などに援用した。

第7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

本研究は、主として河川の治水計画や環境計画、及び河道設計を検討するための要素技術として用いられている、河川洪水流や河床変動の数値解析モデルの高精度化を目的として行われた。特に、河川流など開水路流れの水深積分モデルを実用的予測モデルの基本として、そこに流れの局所の変化の影響を組み込むことで水深積分モデルを改良して、適用範囲をできるだけ拡張することを研究の主目的としている。

得られた成果は次の4項目に要約される。

1. 従来の水深積分モデルでは、河床に形成される小規模河床波 (砂堆や反砂堆) の発生・発達から平衡状態にいたるまでを再現することができなかった。そこで、鉛直加速度を考慮したブシネスク方程式と非平衡流砂モデルを組み合わせたモデルを基本とし、底面せん断応力の評価法に流れの局所の変化を考慮するなどしてモデルを改良することで、小規模河床波の発生から平衡状態に至るまでを比較的容易に再現可能にした。また、小規模河床波の発達過程だけでなく、その形状特性及び流れの抵抗増加特性の再現性も検証した。
2. 実河川では流路が蛇行しているため、河道湾曲部において2次流の影響を無視できない。本研究では、2次流の効果による主流流速分布の局所的な変化をモデル化し、流れの3次元構造を精度よく水深積分モデルに組み込む方法を提案するとともに、水理実験結果及び3次元乱流解析結果と比較することでモデルを検証した。
3. 本研究の流れのモデル化は、河川流だけでなく波動現象のモデル化にも適用できる普遍性を有している。具体的には、断面平均流速を用いるタイプの鉛直加速度を考慮したブシネスク方程式について、そのシステムティックな高精度化手法を提案するとともに、流速分布形、圧力分布形も同時に評価できる方法を考案している。また、微小振幅波理論と比較することで、モデルの妥当性を検証した。
4. 上記の水深積分モデルの改良と同時に、実現条件 (Realizability) を考慮した実用的な乱流モデル (非線形 $k-\epsilon$ モデル) を河道湾曲部の流れなどの3次元解析に適用し、その結果を考察することで水深積分モデル改良のための理論構築や検証に援用した。

以上本論文は、流れの局所の変化の影響を水深積分モデルに組み込むことで、河川流と河床変動の数値解析モデルを高精度化するとともに、モデルの実用的な適用について検討したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。従って、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17年1月31日に、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。