

令和 6 年 6 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04272

研究課題名（和文）任意曲面を有する流路の流れと地形変化予測に関する高度計算技術の開発

研究課題名（英文）Development of advanced computational model for predicting flows and bed deformation in arbitrary curved channels

研究代表者

音田 慎一郎 (Onda, Shinichiro)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50402970

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：水災害のリスクが高くなってきている中、洪水流の非定常的な挙動と地形変化を予測する高度な計算技術の開発は河川工学的に重要な課題である。本研究では、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開発するとともに、土砂輸送モデルと組み合わせ、曲線形状を有する流路の流れと地形変化を精度よく予測する3次元数値解析モデルを構築した。湾曲水路での横越流、多孔質床上のダム破壊流れ、湾曲部流れなどについて流れ解析を行うとともに、連続蛇行水路における砂州形成過程、堤防の越流侵食過程について河床変動解析を行い、モデルの妥当性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、水災害のリスクが高くなってきている中、洪水流の非定常的な挙動と地形変化を予測する高度な計算技術の開発は河川工学的に重要な課題である。その際、実際の河川では曲線形状を有していることから、河道に沿った一般座標系を用いることが有用である。本研究では、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と土砂輸送モデルを組み合わせ、水際・河床近傍の複雑な流れの3次元性と土砂輸送特性を考慮した数値モデルの構築を行った。こうした数値解析モデルの開発、高度化は、適切な河道管理を検討する際のツールとして大きく貢献すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：With the increasing risk of water-related disasters, the development of advanced computational model to predict flood flows and bed deformation is of great importance in river engineering. In this study, a 3D numerical model is developed by combining a 3D flow model in a generalized curvilinear coordinate system that simultaneously predict surface and seepage flows and a sediment transport model. The numerical model was verified by applying the lateral overtopping flows in a curved channel, dam break flows on a porous bed, and flows in a curved channel, as well as riverbed deformation during bar formation in a meandering channel and levee breaching due to overtopping flows.

研究分野：河川工学

キーワード：一般座標系 数値モデル 表面流と浸透流 地形変化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、豪雨災害が激甚化する中で、洪水流が河床や河岸を構成する多量の土砂を侵食し、河床や流路が大きく変動する現象が確認されている。災害リスクが高くなってきている中で、地形変化に関する精度の高い予測を行うためには、洪水氾濫流の非定常的な挙動と、地形変化をもたらす河床近傍の流れと土砂輸送特性を取り扱うことのできるモデルの構築が必要である。その際、実際の河川では曲線形状を有していることから河道に沿った一般座標系を用いることが有用であると考えられる。

そこで本研究では、申請者が開発してきた表面流と浸透流を同時に予測できるデカルト座標系での3次元流体解析モデル、土砂輸送モデルを河道に沿った一般座標系に拡張し、水際・河床近傍の複雑な流れの3次元性と土砂輸送特性を考慮することで、曲線形状を有する流路の流れと地形変化を予測できる数値解析モデルの構築に取り組んだ。

2. 研究の目的

本研究では、曲線形状を有する流路の流れと地形変化を精度よく予測できる3次元数値解析モデルの構築を目的としている。

豪雨災害時の河川洪水流、河床・河道変動を予測する数値解析モデルでは、実用性の観点から平面的な水の流れ場を解く巨視的なモデル¹⁾が汎用されてきたが、災害リスクが高くなってきている中で、精度の高い予測を行うためには、洪水氾濫流の非定常的な挙動、地形変化をもたらす河岸、河床近傍の流れと土砂輸送特性を取り扱うことのできるモデルの構築が必要である。その際、実際の河川では曲線形状を有していることから河道に沿った一般座標系を用いることが有用であると考えられる。そこで本研究では、申請者が開発してきた表面流と浸透流を同時に予測できるデカルト座標系での流体解析モデル、土砂輸送モデルを河道に沿った一般座標系に拡張してモデルを発展させ、数値解析モデルの開発に取り組むとともに、水理模型実験に適用し、モデルの妥当性を検証した。具体的には、まず、一般座標系に拡張した3次元流体解析モデルを用いて、湾曲水路の側壁に堰を設置した場合の横越流現象に関する数値解析を行った。次に、表面流と浸透流を同時に予測できるように流れのモデルを発展させ、多孔質媒体中、および多孔質床上のダム破壊流れなどに適用した。最後に、一般座標系での土砂輸送モデルを組み合わせ、連続蛇行水路における河床変動や正面越流による堤防侵食に関する数値解析を行い、数値解析モデルの妥当性を検証した。

3. 研究の方法

(1) 開水路流れモデル

一般座標系での3次元流体解析モデル²⁾では、水面捕捉法として密度関数法を用いるとともに、計算格子において水域、土中とその境界を容易に表現し、土中の浸透流を考慮するためにポーラスメディア法を適用した。また、土中の流れの抵抗則を評価するため、本研究ではDarcy則を適用した。表面流における乱流諸量を計算するため、乱流モデルには非線形 $k-\varepsilon$ モデルを用いた。

(2) 土砂輸送モデル

土砂輸送形態として掃流砂のみを取り扱う。主流方向の流砂量にはColombini³⁾によって提案された砂の移動限界に河床勾配の影響を考慮した式を、また、横断方向の流砂量には長谷川⁴⁾の式を適用する。以上より求めた主流方向、横断方向の流砂量を一般座標系での流砂量に変換した後、流砂の連続式から河床変動の計算を行い、河床高を求める。また、局所的な河床勾配が増加し、ある限界角以上の斜面が形成すると土砂の崩壊が生じる。本研究でも崩壊による土砂移動計算を考慮した。

4. 研究成果

(1) 湾曲水路での横越流現象

一般座標系に拡張した流れ解析モデルの検証として、湾曲水路の側壁に堰を設置した場合の横越流現象⁵⁾に関する数値解析を行った。実験水路の概要図を図-1に示す。上流側、下流側の直線水路はそれぞれ1.4(m)、1.1(m)であり、その間に曲率半径 $R=0.7$ (m)の湾曲水路が接続している。水路幅は0.2(m)である。90度湾曲した場所に長さ0.2(m)、堰高 w が0.035(m)、あるいは0.0(m)の堰が設置されている。境界条件として上流で流量を与え、下流で勾配0の条件を課した。

計算結果の一例として、流入流量が $Q_{IN}=0.0042$ (m³/s)、 $w=0.035$ (m)の場合の水深平均流速コンター図と流線の様子を図-2に示す。図をみると、湾曲部上流の内岸側から堰に向かって流速が速くなっているとともに堰下流の内岸側では流速が遅くなっていることが確認できる。また、水路中央断面における水位、平均流速の縦断分布、堰近傍の水位の横断分布について実験結果と比較を行い、実験結果の分布形を概ね再現できることを示した。さらに、流入流量に対する越流量比についても実験結果を概ね再現できることを確認した。

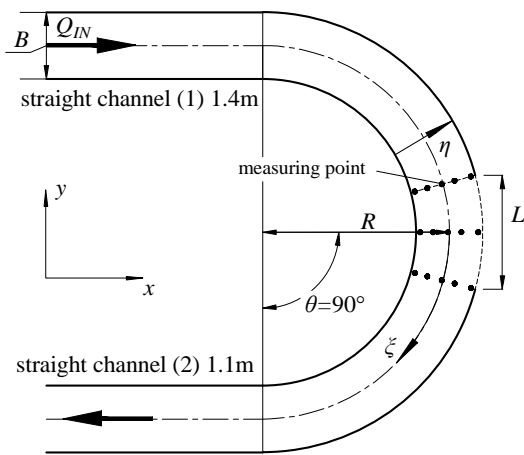


図-1 実験水路の概要図⁵⁾

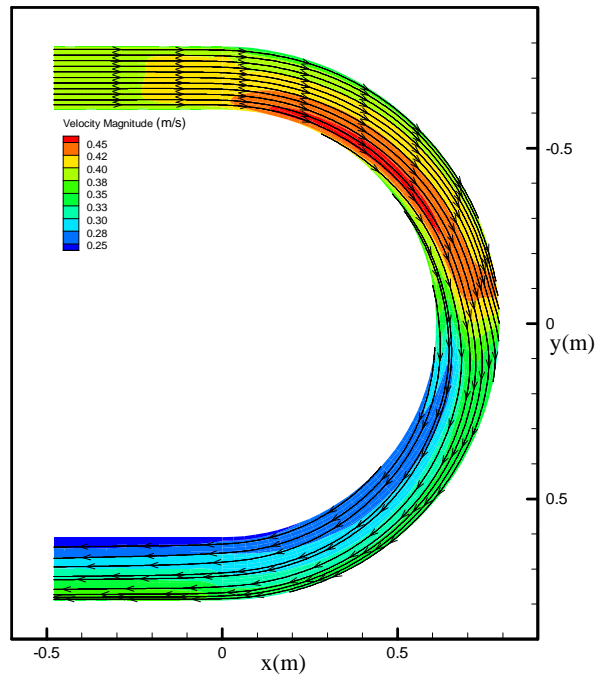


図-2 平均流速のコンター図と流線

(2) ダム破壊流れと湾曲部流れへの適用

一般座標系での流れ解析モデルにおいてポラスメディア法を導入し、表面流と浸透流を同時に予測できるようにモデルを拡張した。まず、数値解析モデルを直線水路における多孔質床上のダム破壊流れ⁶⁾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、湾曲水路における河床変動後の開水路流れ⁷⁾に適用する。図-3は実験結果の河床変動後の河床高であり、この河床高を入力データに使用した。図-4は、水深平均流速のコンター図と流線を示したものである。内岸側での流れの剥離と、外岸側への流れの集中が確認できる。また、図-5は湾曲水路の60度断面での主流と2次流の鉛直分布に関して実験結果と比較したものである。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している。

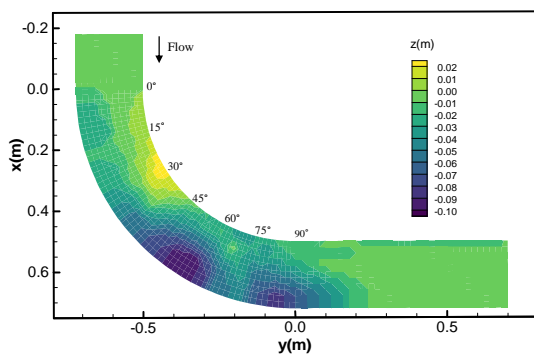


図-3 実験後の河床高コンター図⁷⁾

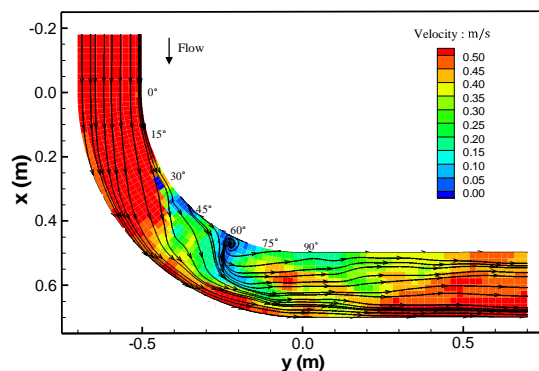


図-4 平均流速のコンター図と流線

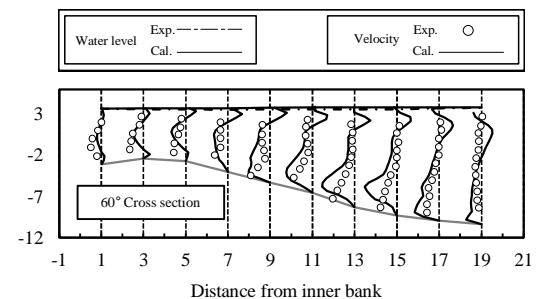
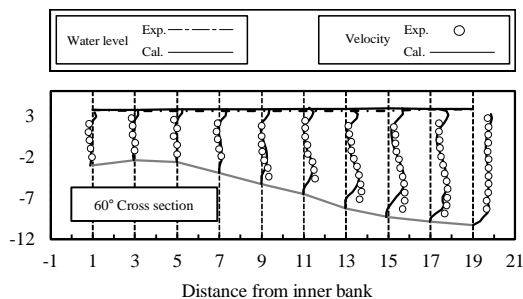


図-5 流速の鉛直分布に関する実験結果⁷⁾との比較(左:主流, 右:2次流)

(3) 連続蛇行水路における砂州形成過程と堤防の越流侵食過程への適用

上記の流れの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・河道変動を予測できるモデルの開発を行った。本研究ではポラスメディア法を用いているため、地形変化後

の流れ解析で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している。まず、数値解析モデルを連続蛇行水路における砂州形成過程⁴⁾に適用した。図-6は1波長内の河床変動コンター図を示したものである。実験結果⁴⁾に比べて、砂州のスケールが若干大きく、下流側に位置しているものの、計算結果の砂州形成域や侵食域は実験結果を概ね再現しており、また砂州高さや外岸側での侵食深もほぼ一致している。

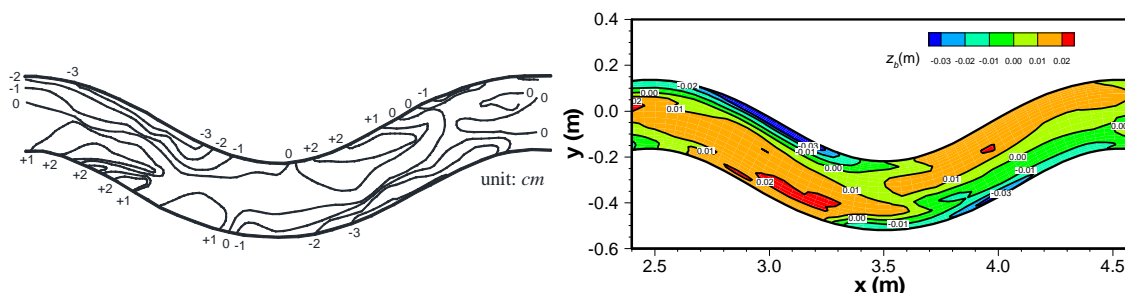


図-6 河床変動コンター図（左：実験結果，右：計算結果）

次に、越流による堤防侵食過程⁸⁾に適用した。図-7は数値解析に用いた計算格子を表しており、本研究では、一般座標系を用いていることから堤体表面に座標系を設定し、格子を作成した。図-8は堤防侵食過程における流況図を示したものである。赤い色で表されている表面流によって堤防侵食が進んでいく様子が再現されている。また、堤体形状の時間変化について、実験結果、デカルト座標系での計算結果⁸⁾と比較を行い、一般座標系を用いた数値解析モデルのほうが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⁸⁾より天端近傍の侵食特性を再現することができた。

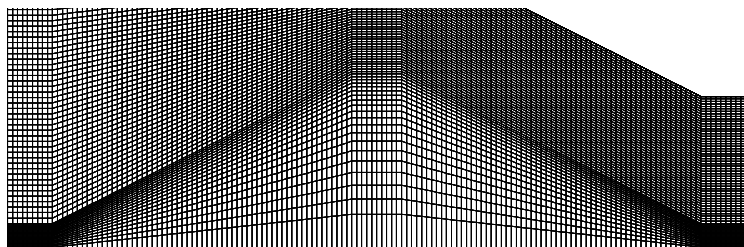


図-7 計算格子

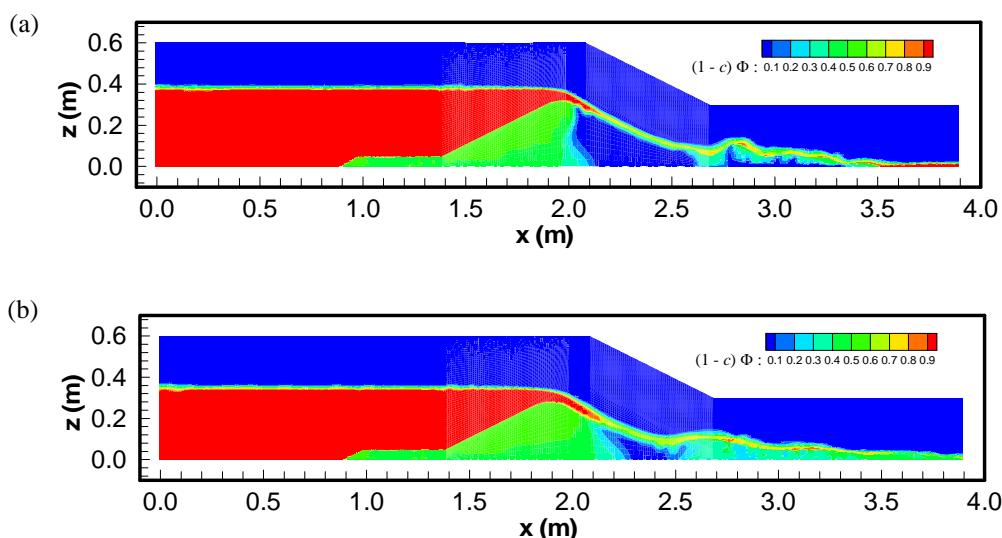


図-8 堤防の越流侵食過程における流況図（(a) $t = 10$ (s), (b) $t = 20$ (s)）

参考文献

- 1) 長田信寿, 細田 尚, 村本嘉雄：河岸侵食を伴う河道変動の特性とその数値解析法に関する研究, 土木学会論文集, No.621/II-47, pp.23-39, 1999.
- 2) Pang, Q. and Onda, S.: 3D Numerical simulation of lateral overtopping flows in curved channel using boundary fitted coordinate system, *Journal of JSCE, Special issue (Applied Mechanics)*, Vol.11, No.2, 22-15049, 2023.

- 3) Colombini, M.: Revisiting the linear theory of sand dune formation, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.502, pp.1-16, 2004.
- 4) 長谷川和義: 沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研, 北海道大学学位論文, 1984.
- 5) 河元信幸, 朝位孝二, 白水 元: 湾曲水路における横越流時の水面形と流速分布, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol74, No.5, pp.I_775-I_780, 2018.
- 6) Ghimire, B.: Hydraulic analysis of free-surface flows into highly permeable porous media and its applications, 京都大学学位論文, 2009.
- 7) 檜谷 治, 道上正規, 川合 茂: 一様湾曲水路における河床変動と河床波の特性に関する実験的研究, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.979-984, 1998.
- 8) 音田慎一郎, 清水皓一, 山口凌大: 浮遊砂の影響を考慮した堤防の越流侵食に関する数値シミュレーション, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.77, No.2, pp. I_703-I_708, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Qiyun Pang and Shinichiro Onda	4. 巻 11 (2)
2. 論文標題 3D NUMERICAL SIMULATION OF LATERAL OVERTOPPING FLOWS IN CURVED CHANNEL USING BOUNDARY FITTED COORDINATE SYSTEM	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 22-15049
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/journalofjsce.22-15049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Qiyun Pang and Shinichiro Onda	4. 巻 12 (2)
2. 論文標題 APPLICATIONS OF 3D NUMERICAL MODEL CONSIDERING SURFACE AND SEEPAGE FLOWS IN GENERALIZED CURVILINEAR COORDINATE SYSTEM	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 23-15042
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/journalofjsce.23-15042	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Qiyun Pang and Shinichiro Onda	4. 巻 12 (2)
2. 論文標題 SIMULATION OF BAR FORMATION AND LEVEE BREACHING BASED ON NUMERICAL MODEL IN CURVILINEAR COORDINATE SYSTEM	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 23-16175
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/journalofjsce.23-16175	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Qiyun Pang and Shinichiro Onda
2. 発表標題 Development of Numerical Model in Boundary Fitted Coordinate System and Application to the Lateral Overtopping Flows
3. 学会等名 the 39th IAHR World Congress (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Qiyun Pang and Shinichiro Onda
2. 発表標題 3D Numerical Simulation of the Lateral Overtopping Flows Using Boundary Fitted Coordinate System
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関