

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20760327

研究課題名(和文) 河川構造物周辺の流れと地形変化に関する予測シミュレータの高度化と体系化

研究課題名(英文) Refinement of numerical model on flows and bed deformation around river hydraulic structure and its verification

研究代表者

音田 慎一郎 (ONDA SHINICHIRO)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：50402970

研究成果の概要(和文): 本研究では, 流れの3次元性や非定常性が強い水制, 橋脚等の河川構造物周辺の流れ場を対象とし, 河川洪水流解析において汎用されている平面2次元モデルに流れの局所的变化の影響をモデル化して組み込むことで, 複雑な流れ場にも適用できるよう計算技術の高度化を図った。また, 3次元数値解析も別途実行し, 平面2次元, 3次元モデルの現象への適用性を総合的に考察した。流れのモデルと平衡・非平衡流砂モデルを用いて水制周辺の局所洗掘と湾曲水路の河床・河道変動等に関する数値解析を行い, 数値解析モデルの適用性について検証した。

研究成果の概要(英文): Around river hydraulic structures such as a spur dike and a square cylinder, complex three-dimensional flow structures are predominant. Therefore, a simple depth averaged flow model is not applicable to such cases. In this study, a modeling of three-dimensional flow structures is carried out theoretically, and a depth averaged flow model is refined by incorporating the effects of secondary currents, flow acceleration/deceleration and vertical acceleration. The three-dimensional numerical simulation is also conducted to compare the numerical results. Applicability of the numerical model with equilibrium and non-equilibrium sediment transport models to the local scouring around a spur dike and river channel processes is examined.

交付決定額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：河川工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：河川構造物, 局所流, 局所洗掘, 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

近年, 局地的集中豪雨に起因する水災害, 土砂災害によって河川の氾濫や河川構造物の被災等, 甚大な被害が全国各地で頻発しており, 水災害, 土砂災害に対して減災対策を求める社会的要請は高まりつつある。こうし

た災害への対策として適切な河川の治水計画, 河道計画を検討するためには, 河川源流域から河口までの長区間を対象領域として, 災害の規模や危険区域等, 対象領域内で起こり得る現象を的確に予測することが基本である。

本研究で対象している橋脚、水制、堰などの河川構造物周辺では、局所的な深掘れ・堆積によって護岸や構造物の被災、倒壊の危険といった問題が生じる可能性がある。一方、環境への配慮から水制等の構造物を設置することにより積極的に河床を変動させ、河道の多様性を創出する機能も期待されている。このような観点から、構造物周辺の局所洗掘のみならず、洗掘・堆積域の範囲、構造物周辺の河床形状（河床波）やその変動過程を精度良く予測することが重要である。しかし、現象が複雑であるため、精度良く予測できるシミュレータは現段階では確立されていないと考えられる。そこで本研究では、河川構造物周辺などの複雑な流れ場にも適用できる高度計算技術の開発について検討する。

2. 研究の目的

本研究では、治水計画や河道計画の策定、河川の維持・管理を検討する際に有用なツールとなる河川洪水流、及び河床変動予測シミュレータの高度計算技術の開発を目的とし、特に、流れ構造や土砂輸送特性が複雑な河川構造物周辺の流れ場について着目する。構造物周辺の流れと局所洗掘現象は、一般に流れの3次元性、非定常性が強く、現象が複雑であるため、従来の平均流的な取り扱い（単純な平面2次元モデル：3次元モデルを水深方向に積分することで次元を下げたモデル）では現象を再現できない。こうした複雑な現象を予測するには、3次元数値解析モデルの適用が検討されてきた。一方、流れの局所的变化の影響をモデル化し、水深積分モデルに組み込むことで平面2次元モデルの高度化を図る研究も行われており、例えば、河道湾曲部の2次元流や鉛直加速度等の流れの3次元性の一部を積分した形で取り込んだ水深積分モデルが提案されている。

本研究では、上記の状況を鑑み、河川洪水流、及び河床変動解析で汎用されている平面2次元モデルを計算技術の基本のモデルとして、その中に流れの局所的な3次元構造やそれに伴う複雑な土砂輸送過程をモデル化することで、平面2次元モデルの適用範囲を拡張させ、応用範囲の広い予測技術の開発を目指す。また、3次元数値解析についても別途実行し、平面2次元、3次元モデルの現象への適用性を総合的に考察することで、予測シミュレータの体系化について検討する。

3. 研究の方法

河川構造物周辺の流れと地形変化を平面2次元モデルによって予測する場合、平面2次元モデルに組み込む流れのモデル化（基礎理論）や土砂輸送モデル（平衡・非平衡流砂モデル）の選定、モデルパラメータの同定が重要となる。本研究では主に3つの点について

検討する。

(1) 鉛直加速度を考慮した水深積分モデルの開発

河川洪水流解析において汎用されている水深積分モデルでは、一般に圧力分布に静水圧を仮定する。しかし、河川構造物周辺のように複雑な流れ構造を有する場合には、静水圧仮定が成立しなくなり、鉛直加速度の影響を考慮する必要があると考えられる。また、例えば非定常条件下における河床変動過程を予測するには、流れのモデルに非定常モデルを適用する必要がある。そこで、これまで検討してきた鉛直加速度を考慮した水面形方程式の解析法にならい、鉛直加速度を考慮した非定常プシネスク方程式を導き、数値解析モデルの高度化を図る。

(2) 河川構造物前縁に発生する馬蹄形渦のモデル化

河川構造物前縁では、馬蹄形渦が発生し、流れの3次元性が強い。馬蹄形渦は局所洗掘を引き起こすことから、局所洗掘を精度良く予測するには、馬蹄形渦を再現する流れのモデル化が必要となる。そこで、これまで検討してきた湾曲流の水深積分型モデルの改良法を拡張し、流れの加速・減速効果を加えた運動方程式と水深平均渦度方程式を連立して解くことで馬蹄形渦のモデル化を考察する。

(3) 平衡・非平衡流砂モデルの適用性

水制等の河川構造物周辺では、底面せん断応力の局所的变化、局所河床勾配の変化に伴う砂粒の離脱量、移動方向とステップレングスの空間的な変化に起因して流砂の非平衡性が出現すると考えられる。そこで、3次元流れ解析モデルと平衡・非平衡流砂モデルを用いて水制周辺の局所洗掘に関する数値解析を行い、結果を比較することで、モデルの適用性を検証する。また、洗掘孔形状に対する数値モデルのモデルパラメータの影響、及びモデルスケールの依存性について考察することで、予測シミュレータの体系化について考察する。さらに、一般座標系での平面2次元モデルと平衡・非平衡流砂モデルを用いて急勾配湾曲水路における流路変動解析を行い、土砂輸送モデルによる現象の再現性について考察する。

4. 研究成果

(1) 鉛直加速度を考慮した水深積分モデルによる小規模河床波の形成・遷移過程に関する数値シミュレーション

鉛直加速度を考慮した水深積分モデルと非平衡流砂モデルを組み合わせ、小規模河床波の形成・遷移過程を再現できるモデルの構

築を行った。

まず、土砂輸送過程の基礎的な知見を得るために、小規模河床波の発達・遷移過程に関する模型実験を実施し、路床勾配の変化に伴って河床波が遷移すること、及びヒステリシス現象が現れることを確認した。

次に、上記の数値解析モデルを用いて小規模河床波の形成・遷移過程に関する実験の再現計算を行った。

図-1は、水路勾配を時間的に変化させ、非定常条件下での小規模河床波の遷移過程における水深の変化を示したものである。青、赤の矢印の向きがそれぞれ勾配を減少、増加させたときの結果である。図をみると、同じ勾配に対して2つの河床形態が現れることが確認される。本数値モデルは河床波の形成に伴う流れの抵抗増加とヒステリシス現象を再現していることがわかる。また、非平衡流砂モデル中のモデルパラメータであるステップレングスを変化させて数値解析を行い、河床波の発達・遷移過程を再現するにはステップレングスの取り扱いに注意を要する必要があることがわかった。

小規模河床波は水深スケールを有するため、水深方向に積分した簡易なモデルで発達・遷移過程を取り扱う研究は国内外を通じてほとんど行われていない。本手法は、簡易な積分型モデルによって現象を再現した点で、実用的に有用であると考えられる。今後、平面2次元場への拡張について検討したい。

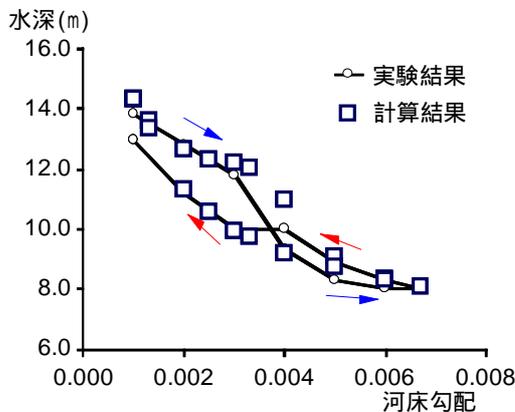


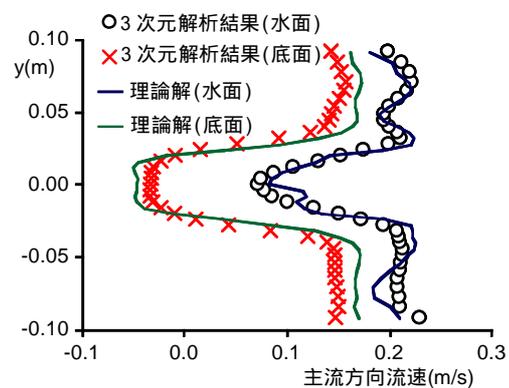
図-1 河床勾配に対する水深の変化

(2) 馬蹄渦のモデル化に関する理論的考察

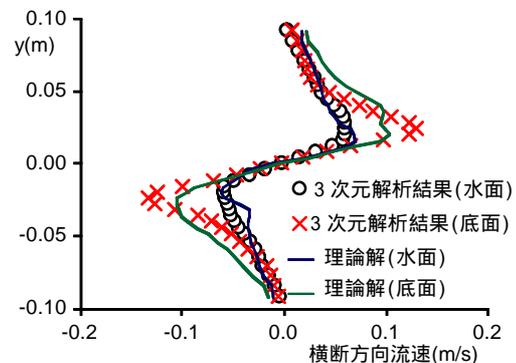
積分型モデルの高度化として、河川構造物の前縁に発生する馬蹄形渦のモデル化を理論的に考察した。具体的には、流れの加速・減速効果を加えた運動方程式と水深平均渦度方程式を連立して解くことで底面流速を精度良く評価する手法を検討した。導かれたモデルを角柱周辺の流れ場に適用し、3次元数値解析結果と比較することでモデルの妥当性を検証した。

図-2は角柱前面における水面と底面での主流、及び横断方向流速の横断分布を比較し

たものである。プロットが3次元数値解析結果であり、実線が今回のモデル化による理論解である。主流方向の流速分布をみると、馬蹄形渦内における逆流流速について良好な一致が見られる。横断方向流速については底面流速における速度勾配が3次元数値解析結果よりも緩くなっている。その結果、構造物前面での水はね効果が小さくなり、馬蹄形渦下流側の流れの再現性が十分ではなかった。しかし、本研究は積分型のモデルでも馬蹄形渦の発生を概ね再現できることを示しており、積分モデルの新たな展開に向けた一歩と考えられる。今後、上記のモデル化から導かれる運動量輸送を水深積分モデルに組み込むことで平面2次元モデルの発展について検討したい。



(1) 主流方向流速



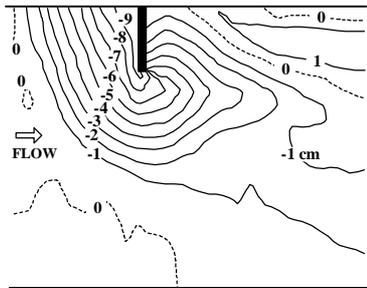
(2) 横断方向流速

図-2 流速の横断分布の比較

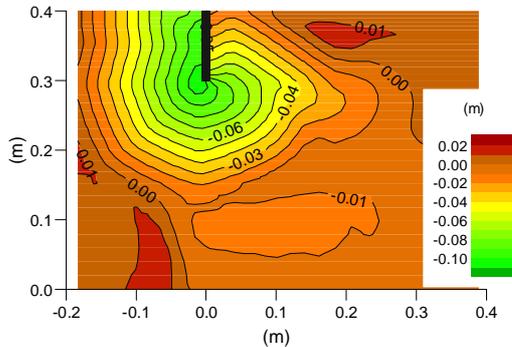
(3) 平衡・非平衡流砂モデルの適用性とモデルパラメータとスケールの影響

3次元流れ解析モデルに平衡・非平衡河床変動モデルを組み合わせ、水制周辺の局所洗掘に関する数値解析を行った。図-3は、平衡状態における河床高のコンター図を比較したものである。平衡流砂モデルでは、水制先端部だけが局所的に洗掘されるのに対し、非平衡流砂モデルでは、実験結果に見られるよ

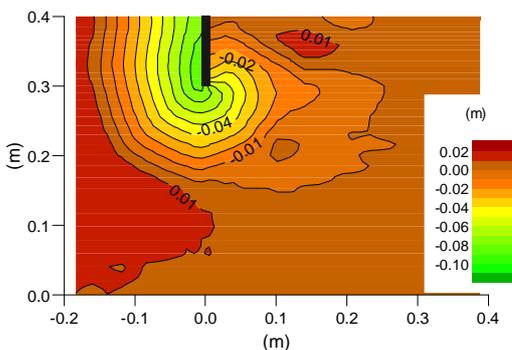
うな水制前面で一様に洗掘される様子が良好に再現できた。また、モデルスケールと非平衡流砂モデルにおけるモデルパラメータを変化させて数値解析を行い、洗掘孔形状に対する空間スケールとモデルパラメータの依存性について考察した。非平衡流砂モデル中のパラメータであるステップレングスが空間的に一様な場合には、平衡・非平衡流砂モデルにおいて洗掘孔形状が同じになる可能性を指摘した。



(1) 実験結果



(2) 平衡流砂モデルによる計算結果

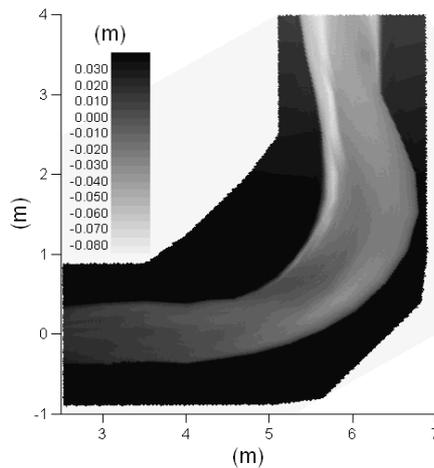


(3) 非平衡流砂モデルによる計算結果

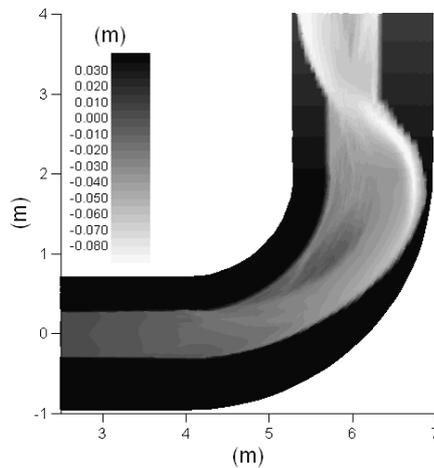
図 3 河床高コンター図

さらに、土砂輸送モデルの適用性を検証するため、平衡・非平衡流砂モデルを用いて急勾配湾曲水路における河床・河道変動解析を行った。図 4 は、河床高コンターについて実験結果と計算結果を比較したものである。平衡流砂モデルでは、外岸側での河岸侵食が実験結果よりも進行しすぎているのに対し、非平衡流砂モデルでは、湾曲部外岸側での河岸

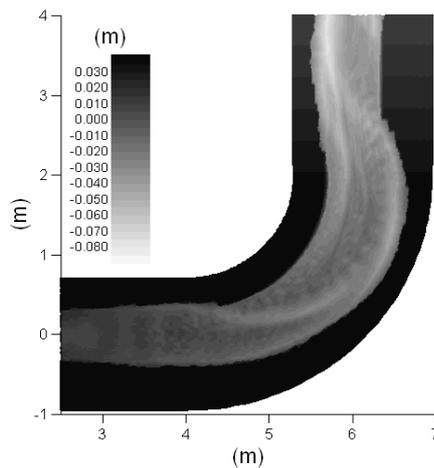
侵食が若干少ないものの湾曲部から直線部にかけての内岸側のみお筋も再現していることが確認できる。



(1) 実験結果



(2) 平衡流砂モデルによる計算結果



(3) 非平衡流砂モデルによる計算結果

図 4 河床高コンター図

2 つのテストケースから、流砂の非平衡性の影響が大きい現象では、平衡流砂モデルよりも非平衡流砂モデルを用いたほうが精度

の良い結果が得られることを示した。今後、土砂輸送モデルにおける土砂崩壊過程をより詳細に表現することでモデルの高度化を行いたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

Onda, S., Hosoda, T. and Kimura, I.: Effects of model scale and parameter in numerical model on local scouring around a spur dike, Riverflow2008, 査読有, Vol.3, 2008, pp.2205-2214.

音田慎一郎, 細田 尚:水深積分モデルによる非定常条件下での砂堆の遷移過程に関する数値シミュレーション, 土木学会水工学論文集, 査読有, 第53巻, 2009, pp.721-726.

音田慎一郎, 白井秀和, 細田 尚, 有光剛, 大江一也:急勾配湾曲水路の河床・河道変動に対する平衡・非平衡流砂モデルの適用性について, 土木学会水工学論文集, 査読有, 第54巻, 2010, pp.691-696.

Onda, S., Shirai, H., Hosoda, T., Arimitsu, T. and Ooe, K.: Numerical simulation of river channel processes with bank erosion in steep curved channel, Riverflow2010, 査読有, Vol.2, 2010, pp.993-1000.

音田慎一郎, 細田 尚, 木村一郎, 岩田通明:水深積分モデルにおける馬蹄形渦のモデル化とその検証について, 土木学会水工学論文集, 査読有, 第55巻, 2011, pp.1003-1008.

[学会発表](計 3 件)

Onda, S., Hosoda, T. and Kimura, I.: Refinement of a Depth Averaged Flow Model in Curved Channel in Generalized Curvilinear Coordinate System, The Eighth International Conference on Hydro-Science and Engineering, 2008.09.11, 名古屋.

Onda, S., Hosoda, T. and Ishibashi, Y.: Numerical simulation of transition processes of dunes under unsteady flow conditions using a depth averaged flow model, The 6th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, 2009.09.22, Santa Fe, Argentine.

Onda, S., Hosoda, T. and Ishibashi, Y.: Numerical and experimental study of development and transition processes of dunes, 17th Congress of IAHR-APD

2010, 2010.02.22, Auckland, New Zealand.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

音田 慎一郎 (ONDA SHINICHIRO)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号: 50402970