

機関番号：32641

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760390

研究課題名(和文) 河川の安全度照査のための信頼性・実用性の高い河床変動予測モデルの開発と適用

研究課題名(英文) DEVELOPMENT OF NUMERICAL SIMULATION MODEL FOR RIVER BED VARIATION FOR RIVER MANAGEMENT AND MAINTENANCE

研究代表者

内田 龍彦 (UCHIDA TATSUHIKO)

中央大学 研究開発機構 機構准教授

研究者番号：00379900

研究成果の概要(和文)：本研究では、水表面流速方程式と水深積分渦度方程式を用いることによって、流速、圧力の鉛直分布を直接解くことなく、河床面近傍流速を半直接に解析する底面流速解析法を構築した。本解析法は、合流部、橋脚、水没水制周囲の複雑な流れによる底面流速場を再現できることを明らかにした。底面流速解法を用いた河床変動解析法を構築し、河川構造物を有する水路の河床変動と局所洗掘を説明できることを示した。また、本解析法を実河川洪水流による河床変動解析法に応用できることを実証した。

研究成果の概要(英文)：Instead of computing vertical distributions of velocity and pressure intensity by 3D model, this study developed the semi-direct bottom velocity computation method for bed variation computation, in which equations of water surface velocity and horizontal vorticity are computed with shallow water equations. It is presented the method can reproduce bottom velocity fields resulted by complex 3D flow structures around river confluence or river structures. A bed variation computation by bottom velocity computation method can explain bed variation in the channel with structures and local scouring around structures. And we demonstrated the method is can be applied to compute river bed variation during flood events.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：底面流速、渦度方程式、水表面流速、水深積分モデル、局所洗掘、河川合流部、河川構造物、馬蹄形渦

1. 研究開始当初の背景

我が国では、地球温暖化により洪水危険度が増加し、治水安全度が著しく低下することが予測されており、その適応策についての議論がされている。河道湾曲・蛇行部の外岸、河川合流部、河川構造物周辺などの洪水時に

大きな河床洗掘が予想される個所では、護岸工の破壊、さらには堤防決壊の危険性が高く、洪水時の安全性の照査は喫緊の課題となっている。このため、これらの洗掘危険個所において河川構造物や河川堤防の安全度照査を行うための信頼性・実用性の高い河床変動

予測モデルが求められている。

洪水による河床変動予測に関する技術的課題は、以下の(1)河川・洪水情報の取得・評価手法、(2)流れと河床変動の解析手法に関するものに分けられる。

(1)河川・洪水情報の取得・評価手法：河川の地表面は、砂礫、草本類や樹木など様々な地覆状態を有しており、複雑な地形とともにこれらの空間分布と抵抗の評価が重要となる。河川の地表面情報の取得は、近年のLP技術の発達により可能となってきた^{例えば, 1), 2)}。また、複雑な地表面情報を有する流れ場の解析手法については市街地氾濫流を中心として検討されている^{例えば, 3)}。一方、河道内の抵抗分布の評価法は、洪水時の水位の時系列データと2次元数値解析を用いて、洪水流量ハイドログラフの評価と合わせて実用的に十分な精度で算定できることが明らかとなってきた⁴⁾。既に全国の主要河川の多くに水位計が常設されており、これらの新しい技術の発達によって、河川・洪水情報の取得・評価に関しては、かなりの程度可能となってきたと言える。

(2)流れと河床変動の解析手法：近年、局所的な流れと河床変動においては3次元解析モデルを用いて説明できるようになってきた⁵⁾。しかし、河川洪水流やそれによる河床変動解析には、3次元解析モデルは計算負荷、計算技術の両面で未だ困難であり実用的でなく、平面2次元解析が用いられることが多い^{4), 5)}。平面2次元流れの解析法については、多くの研究者によって提案されてきた^{3)~6)}。一方、河床変動解析モデルにおいては、流砂の非平衡性や混合粒径効果などに未だ課題は残されているが、粒径の比較的小さい河道においては、底面付近の流れを精度よく解ければ信頼性の高い洗掘形状が計算できることが知られている⁴⁾。

以上のことから、河川の河床変動予測において最も重要な技術的課題のひとつは、精度よく底面近傍流速を算定するために、平面2次元流解析法の枠組みの中でどのように流れの3次元性を考慮するかと考えられる。

流れの3次元性を考慮した平面2次元解析法の改良は、湾曲・蛇行流路の2次流を対象として関連する研究は古くから多くある^{4), 5), 7)~14)}。例えば、先駆的研究であるEngelund⁷⁾の遠心力二次流モデルは、簡易的に底面流速を表現する手法として現在でも河床変動解析に広く用いられている^{4), 5)}。二

次流モデルは、蛇行流路における2次流の発達・減衰を考慮できる解析法^{7), 12)}、さらに主流方向の流速分布と2次流の相互作用を考慮できる解析法^{13), 14)}が提案されてきた。一方、より一般的に流速鉛直分布を評価する方法として、静水圧三次元方程式から、重み付き残差法に基づいて導いた流速鉛直分布に関する方程式を解く解析法^{4), 8)~11)}が提案されている。以上の水深積分解析法は、図-1に示すように静水圧分布の三次元基礎方程式を目的に応じて効率的に解く解析法と言える。これらは、静水圧分布に基づく解析法であるため、湾曲・蛇行部の外岸部、合流部、構造物周辺の複雑な流れに対しては制限があると考えられ、例えば既存の水深積分モデルを用いて河川構造物周辺の複雑な流れ場と局所洗掘を再現することは困難である。

参考文献

- 1) 内田ら, 河川技術論文集, 第14巻, pp. 301-306, 2008.
- 2) 内田ら, 河川技術論文集, 第13巻, pp. 243-248, 2007.
- 3) 内田・河原, 応用力学論文集, Vol. 9, pp. 917-924, 2006.
- 4) 福岡: 洪水流の水利と河道の設計法, 森北出版, 2005.
- 5) Wu, Computational River Dynamics, Taylor & Francis/Balkema, The Netherland, 2008.
- 6) Toro, Shock-Capturing methods for free surface shallow flows, John Wiley & Sons, England, 2001.
- 7) 池田・西村, 土木学会論文集, 第369号/II-5, pp. 99-108, 1986.
- 8) 石川ら, 土木学会論文集, 第375号/II-6, pp. 181-189, 1986.
- 9) 福岡ら, 土木学会論文集, No. 443/II-18, pp. 27-36, 1992.
- 10) Jin & Steffler, J. Hydraul. Eng., ASCE, Vol. 119, No. 1, pp. 109-124, 1993.
- 11) Yeh & Kennedy, J. Hydraul. Eng., ASCE, Vol. 119, No. 7, pp. 776-795, 1993.
- 12) Finnie et al., J. Eng. Mech., ASCE, Vol. 125, No. 7, pp. 848-863, 1999.
- 13) Blanckaert & de Vriend, Water Resources Research, Vol. 39, No. 12, 1375, , 2003.
- 14) 音田ら, 水工学論文集, 第50巻, pp. 769-774, 2006.

2. 研究の目的

本研究では、河川構造物の安全度照査をするための信頼性・実用性の高い新しい河床変動予測モデルを構築・検証することを目的としている。具体的には、実用性を高めるために流れの3次元性を考慮した水深積分モデル（準3次元モデル）を構築するが、構造物周辺の局所洗掘問題を扱うために、図-1に示すように、従来の準3次元モデルで用いられた静水圧分布を仮定せずに、渦度方程式を用いた信頼性の高い準3次元解析法を開発する。そして、実験結果との比較により妥当性を検証し、実河川への適用性を検討する。

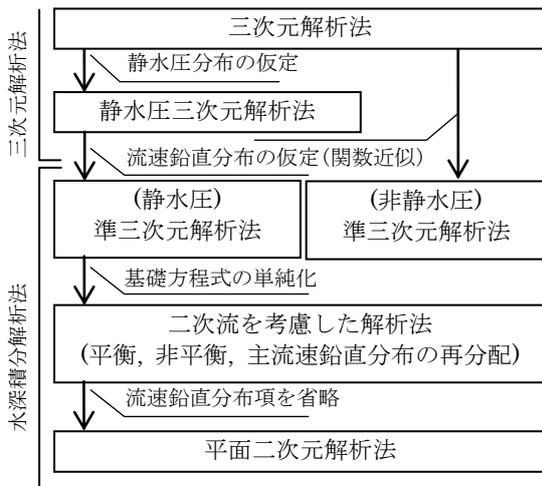


図-1 水深積分解析法の種類

3. 研究の方法

(1) 渦度方程式を用いた準三次元解析法に基づく底面流速解析法の開発

実用的な河床変動解析法の開発を行うため、渦度方程式を用いた準三次元解析法を応用し、河床に作用する河床近傍の底面流速の効率的な解析法（底面流速解析法）を開発する。

(2) 底面流速解法を用いた河川合流部の流れ場の解析法の検討

河川合流部のような二つの二次流ができる複雑な三次元流れに対して、本解析モデルの妥当性、有効性を検証する。具体的には、直角合流、斜め合流の実験、及び三次元解析と本解析法を適用し、検証する。

(3) 底面流速解法を用いた河川構造物周辺の局所洗掘解析法の検討

底面流速解法を応用し、河川構造物を有する水路の河床変動、構造物周辺の局所洗掘の解析法を開発する。具体的には、馬蹄形渦による典型的な洗掘である橋脚周辺の局所洗

掘、水制群を有する水路の河床変動と水制近傍の流れと局所洗掘解析に対する妥当性を検証する。

(4) 底面流速解法を用いた実河川洪水流の河床変動解析法の検討

底面流速解法の実河川の洪水流による河床変動解析法の応用性を検討する。具体的には、一般曲線座標系の底面流速解析法を構築し、多摩川 H19 洪水に適用し、検証する。

4. 研究成果

(1) 渦度方程式を用いた底面流速解析法の開発

底面流速は、渦度の水深積分値と水表面流速から求まることに着目し、渦度方程式を用いた準三次元解析法に基づく底面流速解析法を開発した。本研究で開発した底面流速解法を図-2に示す。底面流速は、渦度の水深積分値と水表面流速から求まるが、渦度の水深積分値の輸送を考慮するためには、水深平均流速場が必要である。さらに、流速鉛直分布が場所ごとに異なることから、乱れの非平衡性を考慮する必要があると考えられる。このため、底面流速解法の基礎方程式は、水表面流速の運動方程式、水深積分された運動方程式、連続式、乱れエネルギーの輸送方程式、および渦度方程式で構成した。図-2に示すように、滑りなし条件が課される面より僅かに上の面を底面とし、それより上に流速鉛直分布を考え、水表面流速、水深平均流速、渦度方程式、乱れエネルギーの輸送方程式を定式化した。基礎方程式の数に基づいて、本解析法の計算負荷を検討した。底面流速解法の基礎方程式には、平面二次元解析法と比べると、水表面流速の運動方程式と水深積分された渦度方程式が付加されており、従来の静水圧準三次元解析法^{4), 8) 11)}において2次モードまで考慮に入れた場合と同数である。非静水圧

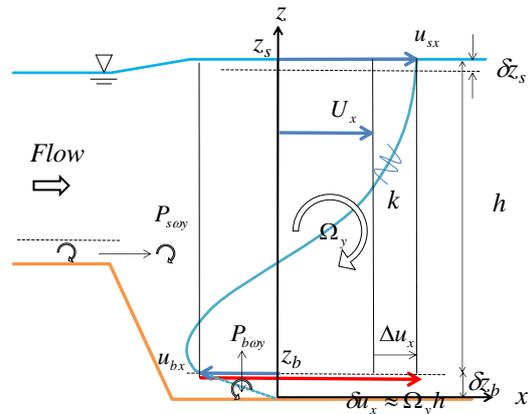


図-2 渦度を用いた底面流速解法

三次元解析法と比べると、底面流速解法は、運動方程式の数が鉛直方向に2分割する場合と3分割する場合の間であり、圧力のポアソン方程式のような繰り返し計算を必要とする方程式を有さないため、計算負荷は著しく小さい。以上より、底面流速解法は、平面二次元解析より若干計算負荷が大きい、従来の静水圧準三次元解析法と同程度の計算負荷で底面流速を半直接的に評価するものであり、三次元解析法よりも著しく計算負荷が小さく、効率的な河床変動解析を可能とすると考えられた。

(2) 底面流速解法を用いた河川合流部の流れ場の解析法の検討

本研究では、合流部の複雑な流れによる底面流速場を解析するために、渦度方程式を用いた底面流速解法による合流部の解析法を開発し、検証した。本解析法は、合流点直下の剥離領域については再現性に課題を残したが、主流路と支流路の二次流や合流直下で底面流速が大きくなる等の合流部における特徴的な流れの三次元構造について、計算負荷の大きい三次元解析を用いずとも、直角合流部、斜め合流部の実験結果を再現できることを明らかにした。

(3) 底面流速解法を用いた河川構造物周辺の局所洗掘解析法の検討

本研究では、局所洗掘解析のために、河川構造物周辺の底面流速解法を構築し、構造物周辺の局所洗掘解析を行うために、非平衡流砂量式を導き、局所洗掘解析法を構築した。本研究で得られた主要な成果を示す。

- ①□ 本研究で提案する底面流速解法は、円柱橋脚上流面の馬蹄形渦による底面流速場と背後の剥離領域の鉛直方向渦度の回転に誘発される複雑な流れ場（底面流速場、図-3）を再現し、実験で生じた橋脚周りの局所洗掘を説明できる（図-3, 4）。

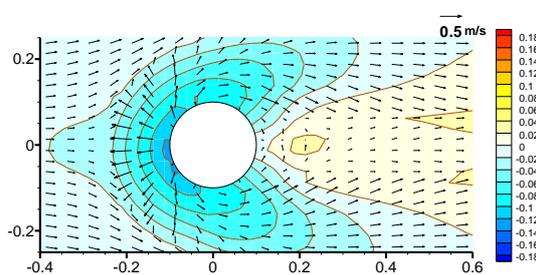


図-3 底面流速解法による橋脚周辺の底面流速と局所洗掘形状の解析結果

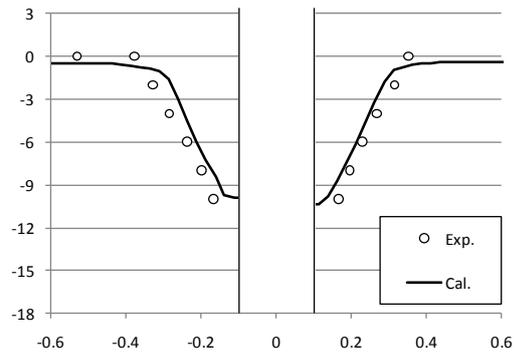


図-4 底面流速解法による橋脚周辺の底面流速と横断方向の局所洗掘形状の解析結果と実験結果の比較

- ② 水没水制が周囲の渦度分布に与える影響を評価するために、前面では渦度の鉛直分布を考慮した渦度の越流フラックスの評価法、背面では剥離による横断方向渦度の供給量の評価法を示した。本底面流速解法は水没水制群前面の逆流、背面の剥離による流速低下など、実験による水没水制群周りの複雑な底面流速場の特徴を再現できることを明らかにした（図-5）。また、解析結果は、水没水制群を有する水路全体の縦断河床形状と流砂量の時間変化特性、水没水制群周辺の局所的な河床形状の特徴、及び水没水制群の縦断的な最大洗掘深の分布特性を説明できることを明らかにした（図-6）。

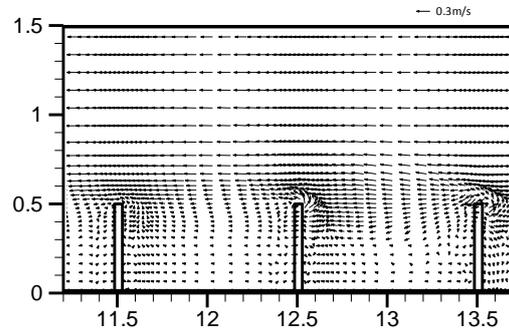


図-5 底面流速解法による水没水制群周辺の底面流速場の解析結果

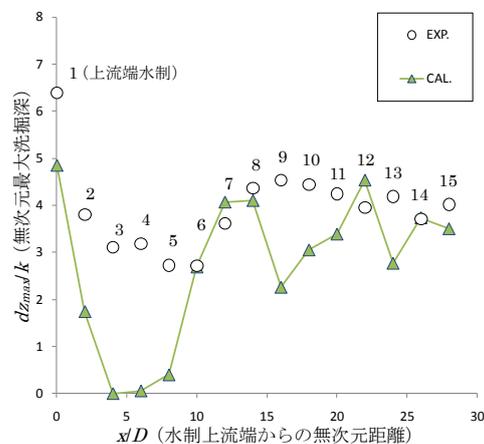


図-6 水没水制群内の水制先端の最大洗掘深の縦断分布の実験結果と解析結果の比較

(4) 底面流速解法を用いた実河川洪水流の河床変動解析法の検討

本研究では、平成 19 年 9 月洪水による二ヶ領宿河原堰の直上流の深掘れの発達機構を実測データと河床変動解析により検討した。一般座標系渦度方程式を用いた底面流速解析法を構築した。それを用いた観測水面形時系列データを用いた洪水流の河床変動解析法を構築し、本解析は河道線形と河川横断構造物による砂州の流下特性と局所洗掘を計算でき、洪水前後の実測データを概ね再現することができた。

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 10 件)

- 1) 内田龍彦, 福岡捷二: 底面流速解法による連続する水没水制群を有する流れと河床変動の解析, 土木学会論文集 B1, Vol. 67, No. 1, pp.16-29, 2011, 査読有.
- 2) 忠津哲也, 内田龍彦, 石川武彦, 福岡捷二: 洪水時の砂州の変形と河川構造物周辺の局所洗掘, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.829-834, 2010.2, 査読有.
- 3) 内田龍彦, 福岡捷二: 水平方向渦度方程式を用いた底面流速の半直接解法と橋脚周りの局所洗掘解析, 水工学論文集, 第 54

巻, pp.841-846, 2010.2, 査読有.

- 4) T. Uchida and S. Fukuoka: Practical Numerical Simulation Method For Estimating Local Scouring Around A Pier ~ Bottom Velocity Computation Method Based On Depth Integrated Model, 11th International Symposium on River Sedimentation, CD-ROM, Stellenbosch, South Africa, 2010.9, 査読有.

[学会発表] (計 6 件)

- 1) 忠津哲也, 下條康之, 内田龍彦, 福岡捷二: 洪水流による砂州の変形と粒度形成に関する研究, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集 CD-ROM, II-217, 2010.9.1, 北海道大学.
- 2) 内田龍彦, 福岡捷二: 水没水制群を有する流れにおける底面流速の半直接解法と河床変動解析, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集 CD-ROM, II-235, 2010.9.3, 北海道大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内田 龍彦 (UCHIDA TATSUHIKO)
中央大学・研究開発機構・機構准教授
研究者番号: 00379900