

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560611

研究課題名(和文)水没する河川構造物周辺の底面流速解法と非平衡流砂運動を考慮した局所洗掘解法の開発

研究課題名(英文)Bottom velocity computation method around structures and local scour calculation method coupled with the non-equilibrium sediment transport model

研究代表者

内田 龍彦(Uchida, Tatsuhiko)

中央大学・公立大学の部局等・准教授

研究者番号：00379900

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では水没する河川構造物周辺周りの複雑な3次元流れを有する底面流速場とそれによる局所洗掘を解析するため、静水圧分布等の圧力鉛直分布の仮定をせずに流速鉛直分布を評価できる一般底面流速解法を開発した。この解析法では、構造物を越流する急変流や橋脚周りの馬蹄形渦などの従来の水深積分モデルでは解析できなかった現象に適用できることを明らかにした。また、非平衡流砂運動を考慮した河床変動解析法を開発し、小規模河床波、複断面蛇行流路の河床変動、構造物周りの局所洗掘を概ね説明できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study developed the general bottom velocity calculation method which can calculate vertical distributions of velocity and pressure in the depth integrated model to calculate three dimensional flow and local scouring around structures. The method was validated for rapidly varied flows over structures and 3D vortex motions with the horse show vortex around a pier. This study also developed a non-equilibrium bed load formula based on momentum equations of sediment particles moving as bed load. The bed variation calculation method coupling with the bottom velocity calculation method was successfully applied to bed variation problems which have been difficult to be calculated by depth integrated model, such as various bed form calculation, bed variation in a compound meandering channel, local scouring around structures.

研究分野：水工水理学

 キーワード：非静水圧準三次元解析 渦度方程式 底面流速 局所洗掘 河川構造物 複断面蛇行流路 非平衡流砂
量式 小規模河床波

1. 研究開始当初の背景

河川構造物周辺で発生する局所洗掘は、構造物の基礎を晒し、構造物の破壊等の甚大な被害に繋がる危険性があるため、古くから洗掘予測は治水上極めて重要な課題であり、多くの研究が行われてきた。また、河川構造物周辺に形成される瀬淵構造等が河川環境にとって重要であるとの認識から、より精度の高い河川構造物周辺の河床変動予測が求められるようになってきた。河床変動予測に関する技術的課題は、河床変動を引き起こす流砂運動の解析法に関するものと、流砂運動を引き起こす底面近傍の流れの解析法に関するものに分けられる。

底面近傍の流れの解析法では、河川の洪水時の河床変動解析において、底面近傍流速や底面せん断力評価のために平面二次元解析モデルが用いられてきた^{1),2)}。しかし、水深平均流速を計算する平面二次元流解析モデルは、河道湾曲・蛇行部、合流部、河川構造物周辺等の変形した流速鉛直分布による流れの三次元構造の影響を受けた底面流速場を評価できない課題を有している。湾曲二次流等の特定の流速鉛直分布の変形については二次元モデルの改良^{1),2)}が試みられている。より一般的な方法として、流速鉛直分布に関する方程式を解く準三次元解析法も提案されている¹⁾。しかし、これらの従来の水深積分モデルは流速鉛直分布の単純化、静水圧分布の仮定等の制約により、河川構造物周辺の複雑な流れ場の底面流速場を表現するには十分ではない。近年では、流速、圧力の鉛直分布を計算する三次元乱流解析モデルは、橋脚³⁾、水制⁴⁾周辺などの馬蹄形渦による局所洗掘現象を解析できることが知られている。しかし、このような高精度の三次元乱流解析モデルは時空間的に極めて小さいスケールの単一構造物周辺の局所洗掘現象に適用が限られており、洪水流による河道の河床変動解析への適用には限界がある。

著者らは、河床変動解析のためには底面近傍流速が重要であり、流速鉛直分布は必ずしも重要ではないことに着目した。そして、図-1に示すように水深積分された水平方向渦度方程式と水表面流速の運動方程式を用いることで、流速、圧力の鉛直分布を直接解かない底面近傍の流速の解析法(底面流速解析法)を検討し、合流部の本川と支川の逆向きの二次流セルや非水没河川構造物周辺の馬蹄形渦による複雑な底面流速場を再現できることを明らかにした^{5),6)}。しかし、底面流速を評価する際に、浅水流の仮定(流れの水平スケールに対して水深スケールが小さいとし、鉛直方向流速の場所的变化と静水圧分布からのずれを無視)が用いられており、構造物近傍の洗掘解析においてはこの仮定を満足す

るとは限らないこと、非静水圧成分に起因する流れの抵抗変化は直接考慮できず、抗力係数等のパラメータの検討を通して評価する必要があること等が課題として残されていた。特に、水没構造物周辺では、前面の渦度の集中や図-1に示すような背面の剥離が生じるなど、底面付近に集中する水平方向渦の回転、伸縮により、より複雑な流れとなり、鉛直方向に曲率をもった流れとなり、急変流や剥離など鉛直方向流速や静水圧分布からのずれが重要となる。水没構造物は、低水路護岸部、水没水制、堰・床止め工等、河川に多く存在し、洗掘危険性が高い。また、堰・床止め工等では、下流水深が低く、越流する流れのFr数が大きい場合には、水面で剥離を伴う潜り噴流などの極めて洗掘危険性の高い流れとなる。このため、このような水没構造物周辺や複雑な水面形を有する流れ場の底面流速解法になる場合についての底面流速解法について、詳しく検討する必要がある。

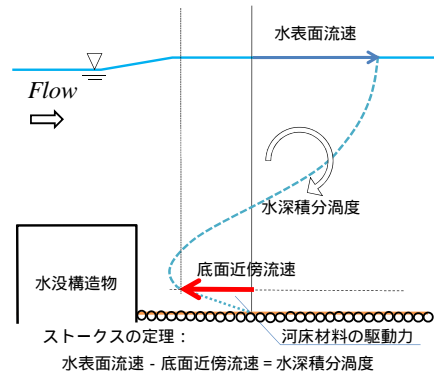


図-1 底面流速解析法の考え方: 流速鉛直分布を直接解かなくても水表面流速と水深積分渦度から底面近傍流速を決定することができる。

一方、流砂運動の多くの解析では、流砂量の計算にその場所の水理量で流砂量が決定するとした平衡流砂量式が用いられている。しかし、河川構造物周辺では砂を動かす駆動力となる底面近傍の流速場が場所ごとに大きく変化するため、局所洗掘解析のためには流砂運動の非平衡性を考慮した解析が必要である¹⁾。例えば、長田ら⁴⁾は水制周りの局所洗掘解析のために、砂粒子の離脱量の算定、運動方程式に基づく掃流砂の移動経路の計算、step-lengthに応じた堆積量の算定によって構成される非平衡流砂モデルを構築している。このような砂粒子の挙動をラグランジュ的に解析する方法は、一般に複雑な形態の流砂運動を厳密に記述できる半面、計算負荷が極めて大きくなる課題をもつ。オイラー型の非平衡流砂量式の検討例もいくつかある^{1),6)}が、砂粒子の運動の素過程の検討が不十分である。このため、砂粒子の運動の素過程を流れ場と同様にオイラー型で記述できる実

用的な非平衡流砂量式が必要である。

参考文献

- 1) 福岡捷二(2005)：洪水流の水力と河道の設計法，森北出版。
- 2) Wu, W.(2008): Computational River Dynamics, Taylor & Francis/Balkema, The Netherland.
- 3) Roulund, A., Sumer, B.M., Fredsøe, J. and Michelsen, J.(2005) : Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile, Journal of Fluid Mechanics, 534, pp.351-401.
- 4) 長田 信寿, 細田 尚, 村本 嘉雄, 中藤 達昭 (2001)：3次元移動座標系・非平衡流砂モデルによる水制周辺の河床変動解析，土木学会論文集，No.684/II-56，pp.21-34。
- 5) 内田龍彦，福岡捷二(2010)：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。
- 6) Phillips, B.C. and Sutherland, A.J.(1989): Spatial lag effects in bed load sediment transport, Journal of hydraulic research, Vol.27, No.1, pp.115-133.

2. 研究の目的

本研究では，水没構造物周辺の局所洗掘解析法を構築するため，水没構造物や複雑な水面形を有する流れ場における底面流速解法とオイラー型で砂粒子の運動の素過程を記述できる実用的な非平衡流砂量式を開発し，検証する。

前者に対しては，浅水流速場の仮定を用いない新たな底面流速解析法(一般底面流速解析法)を開発し，構造物近傍の局所流解析における適用性と妥当性を検証する。後者に対しては，底面流速を用いた砂粒子の様々な運動形態を記述するオイラー型非平衡流砂解析法を構築し，水没構造物や河床波の発達する流れなどに対して適用し，既往の水力実験結果と比較を通して妥当性を検証することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 浅水流の仮定を用いない一般底面流速解析法の検討に先立ち，対象とする流れの状況に応じた適切な水深平均流速場と底面流速場の解析法を明らかにするため，平面二次元解析法，三次元解析法，及びこれら2つの解析法の繋ぐ役割を持つ底面流速解析法を含めた準三次元解析法の適用範囲を現象のスケールと水深スケールの比を用いて評価する。浅水流の仮定を用いた従来の底面流速解析法⁵⁾では，流れの水平スケール L_0 に比べて，代表的な鉛直スケールである水深 h_0 が小さい浅い流れ $\varepsilon_s=h_0/L_0 \ll 1$ を仮定して，展開さ

れている。また，多くの水深積分解析法に用いられる静水圧分布の仮定も浅い流れの仮定のひとつである。しかし，局所洗掘等の局所的な流れにおいては，水平スケールと鉛直スケールのオーダーが一致し，浅い流れの仮定が適切でない場合がある。このため，流れと河床変動の有効な解析法を検討するため，どのような条件において，どの項が支配的となるのかを基礎方程式の各項のオーダーを比較する。

(2) 浅水流の仮定を用いずに底面流速を計算するためには，式(1)の右辺の括弧内の鉛直方向流速に関する項を計算する必要がある。

$$u_{bi} = u_{si} - \varepsilon_{ij3} \Omega_j h - \left(\frac{\partial W h}{\partial x_i} - w_s \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + w_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

ここに， ε_{ij3} ：エディトンのイプシロン， Ω_j ：水深平均 j 方向渦度， W ：水深平均鉛直方向流速， z_s ：水位， w_s ， w_b ：水面，底面の鉛直方向流速である。本研究では，連続式を満たすように式(1)の鉛直方向流速の空間変化項を修正するポアソン型の方程式を導き，三次元解析における圧力解法と同様に鉛直方向流速を陰的に解く方法を検討する。本解析法を構造物周辺の局所流解析，構造物を越流する急変流，水没粗度群を有する流れに適用し，検証した。

(3) 開発した一般底面流速解析法と非平衡掃流砂量式を用いた河床変動解析法を検討する。河床材料粒子に作用する流体力を適切に評価するためには，解析において定義された底面高と河床材料粒子高の関係を明確にする必要がある。そこで本解析では，河床高相当粗度 k_s を用いて対数側の原点位置を ak_s と表し，それより僅か δz_b 上の高さを底面 z_b とし，底面 z_b と水面 z_s の間の流れを解く。構造物周辺の局所洗掘解析や小規模河床波の解析においては，粒子の非平衡運動の評価方法が重要であることが指摘されている。本研究では砂粒子の運動方程式に基づいたオイラー型の非平衡流砂量式を開発し，越流構造物の侵食，種々の小規模河床波を有する流れと河床変動，複断面蛇行流路の河床変動に適用し，検討した。

4. 研究成果

(1) 水深平均流速の運動方程式と式(1)に渦度方程式と水面の運動方程式を代入した底面流速式の運動を記述する式において，浅水パラメータ(ε_s)に対する各項の大きさを調べ，二次元，三次元解析法の適用範囲と準三次元解析法の有効性を検討した(図-2)。この結果，平面二次元解析法の水深平均流場に対する適用範囲は広く，河道平面形状，河道断面形状及び洪水流量ハイドログラフ等によって

生じる洪水流や氾濫流の重要な現象の多くを解析するのに適切であり、洪水流や氾濫流解析に広く用いられている平面二次元解析法の有効性を明らかにした示すものであるが広く用いられている。一方、河床変動解析に重要な底面流速場に対しては、平面二次元解析法の適用範囲が水深平均流速の場合と比べてかなり狭くなり、洪水時の河床変動解析のために種々の準三次元解析法の必要性を改めて示した。さらに、水深スケールに近い流れとなると、静水圧分布等の浅い流れの仮定が成立しないため、構造物近傍の局所的な流れの解析には従来の二次元解析法や浅い流れの仮定を用いた準三次元解析法は適切でないことが明らかとなった。例えば、破堤点を含む流れや構造物近傍の流れでは浅水流の仮定を用いない一般底面流速解析法が必要である。

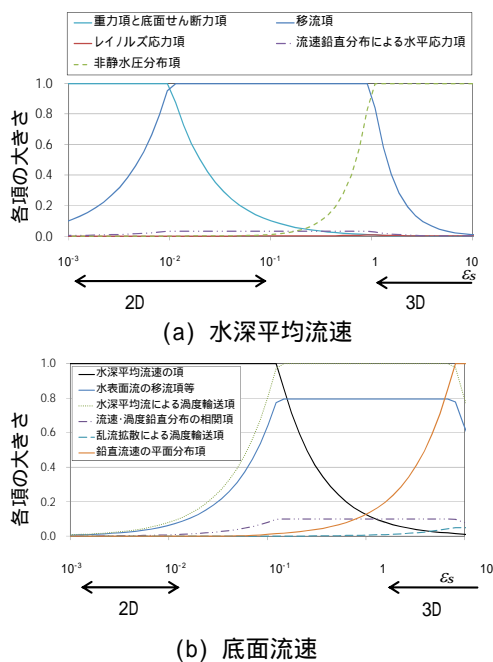
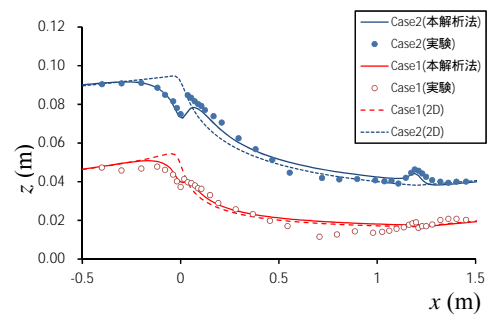


図-2 各項のオーダー比較

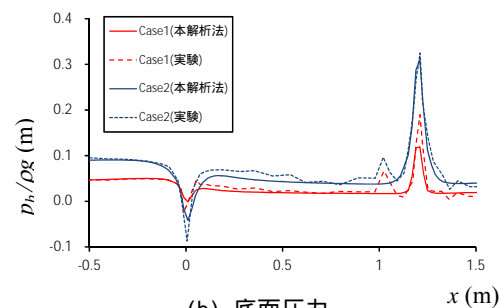
(2) 開発した一般底面流速解析法解析対象を Roulund ら³⁾の粗面固定床実験に適用し、浅い流れの仮定を用いない一般底面流速解析法を橋脚回りの流れ場の実験に適用し、本解析法の妥当性を示した(主な発表論文など、雑誌論文、)。

本解析法を堤防越流実験⁷⁾に適用し、急変流場の水面形と圧力分布に対する本解析法の妥当性を検証した。図-3に堤防を越流する流れの水面形と底面圧力分布の実験結果と解析結果の比較を示す。堤防天端は射流であるが、法肩直下の圧力低下の影響が上流方向に伝播するため、法肩近傍では水位が低下している。一方、法尻近傍では、圧力が上昇し、水面が盛り上がっている。このような水面形

の特徴は平面二次元解析では再現できない。これに対し、圧力の非静水圧分布を解く本解析法は、実験結果との差異があるものの法肩近傍の天端の水位低下と法尻近傍の水位上昇を再現できている。



(a) 水深



(b) 底面圧力

図-3 堤防を越流する流れへの適用

水没した巨石が点在する流れ場の実験⁸⁾に適用し、同一解析条件において平面二次元解析法を用いた場合(2D)、一般底面流速解析法場合(BVC-EWL)、および非平衡粗面抵抗則を用いた一般底面流速解析法(BVC-DWL)を比較した。水面流速分布を見ると、巨石の影響はほとんど現れておらず、水面の流れは概ね一様であり、各種解析結果の差もほとんどないが、底面近傍の流速分布は、巨石の影響を受け、底面近傍の流れは複雑である。2D解析では水没粗度の抵抗や流速分布の変形の影響が考慮できず、ほぼ一様の速い底面流速となっている。BVC-EWL解析では、水没粗度背面の剥離等を計算できているが、全体的に底面流速がやや大きめに計算されている。これに対し、非平衡粗面抵抗則を導入したBVC-DWL解析は底面流速が全体的に小さくなり、実測結果をよく説明できた。2D解析、BVC-EWL解析、BVC-DWL解析による底面流速場の解析結果と実測結果の平均二乗誤差の比較から、BVC法を導入することによって、巨石断面の解析精度は大きく向上しており、大きな粗度による流速分布の変形や作用する流体力はBVC法によって概ね評価できることが分かった。一方、巨石間断面においては、平衡粗面抵抗則を用いた解析では解析誤差があまり小さくなっておらず、非平衡粗

面抵抗則を導入することによって、誤差が大きく低減している。これは、巨石間断面では巨石による底面近傍の非平衡流れが粗度層や渦層との運動量交換を生じさせていることを示している(主な発表論文等, 学会発表)。

(3) 本研究で開発した一般底面流速解析法による底面流速と底面せん断応力を用い、砂粒子の運動方程式に基づいたオイラー型の非平衡流砂量式を開発した。図-4に堤防侵食過程の解析結果を示す。初期段階において、法尻を中心に円弧上に侵食が生じている。その後時間とともに法尻の浸食深が発達するが、洗掘がある程度以上となると跳水が形成され、その後埋め戻されている。裏法面の侵食過程を見ると、浸食が進行すると、切り立った斜面が形成され、既往の堤防裏法面侵食過程を説明できた。また、この解析法を津波による構造物周辺の局所洗掘解析に適用し、本解析法は広域の流れと構造物周辺の局所流と局所洗掘を一体的に解けることと、その必要性を示した(主な発表論文など, 雑誌論文)。

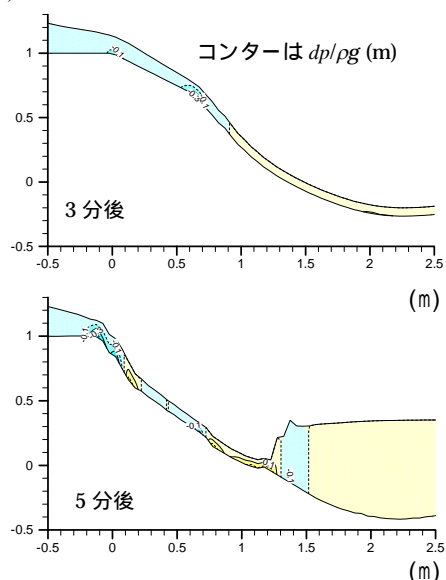


図-4 堤防侵食解析における水面形と圧力分布

底面流速解析法と非平衡流砂量式を応用し、水理条件によって変化する小規模河床形態の解析法を構築した。本解析法は水理条件の変化によって砂堆から平坦河床を経て遡上反砂堆へ河床形態が遷移すること再現し、流砂量が極端に大きくなる反砂堆の条件で水深の計算結果(抵抗評価)に課題がある以外では、実験の流砂量と水深(抵抗)を概ね再現することができた。本解析法では擾乱と流砂運動の緩和距離以外については、式形、係数などを変更することなく、標準的な値が用いられている。擾乱は砂堆に比べて十分小さいことから、様々な河床形態を統一的に説明できたことは意義が大きい。

本解析法をこれまで水深積分モデルを用いて解析することが困難であった、相対水深の異なる複断面蛇行水路の河床変動解析に適用し、検討した。本解析法は、相対水深によって変化する単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れによる河床変動特性を説明できることを示した。浅水流の仮定を用いないことは、複断面蛇行流れにおける壁面付近の河床変動を解析するのに必要であることを明らかにした。また、解析結果は複断面蛇行水路における相対水深の変化による流砂量特性の変化を説明できることを示した(主な発表論文など, 雑誌論文)。

参考文献

- 7) 越水堤防調査最終報告書 - 解説編 - (1984), 土木研究所資料, 第2074号, 建設省土木研究所。
- 8) Papanicolaou, A.N., C.M. Kramer, A.G. Tsakiris, T. Stoesser, S. Bomminayuni, and Z. Chen. 2012. Effects of a fully submerged boulder within a boulder array on the mean and turbulent flow fields: Implications to bedload transport, *Acta Geophysica*. 60(6):1502-1546.

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12件)

Uchida, T. and Fukuoka, S.: Numerical calculation for bed variation in compound-meandering channel using depth integrated model without assumption of shallow water flow, *Advances in Water Resources*, Vol.72, pp.45-56, 2014.

DOI: 10.1016/j.advwatres.2014.05.002

内田龍彦, 福岡捷二: 底面流速解析法を用いた津波による構造物周りの三次元流れと局所洗掘解析 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.69, No.2, I_271-I_275, 2013.

内田龍彦, 福岡捷二: 浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる種々な小規模河床形態の統一的解析法の構築, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, I_1135-I_1140, 2013.

Fukuoka, S. and Uchida, T.: Toward integrated multi-scale simulations of flow and sediment transport in rivers, *Journal of JSCE, Ser.B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol. 69, No. 4, II_1-II_10, 2013.

内田龍彦, 福岡捷二: 構造物を越流する流れの解析法の開発, 河川技術論文集, 第18巻, pp.351-356, 2012.

内田龍彦, 福岡捷二: 浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる底面流速の解析法, 土木学会論文集 B1(水工学),

[学会発表](計16件)

Uchida, T., Papanicolaou, A. N., Tsakiris, A. G. and Fukuoka, S.: A numerical calculation method for flow in the presence of isolated boulders atop a rough bed by using an enhanced depth integrated model with a non-equilibrium resistance law, River Flow 2014, International Conference on Fluvial Hydraulics, Lausanne, Switzerland, 2014.9.5.

内田龍彦,福岡捷二,:水深積分モデルを用いた構造物を越流する急変流場の解析法,第67回年次学術講演会,II-036,名古屋大学,2012.9.6.

T. Uchida and S. Fukuoka: Bottom velocity computation method based on depth integrated model without shallow water assumption, 3rd International Symposium on Shallow Flows (ISSF), Iowa City, USA, CD-ROM, 2012.6.5.

内田龍彦:構造物まわりの局所流の実用的解析法,2011年度基礎水理シンポジウム,話題提供,土木学会水工学委員会基礎水理部会,東京,2011.12.5.

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