

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04711

研究課題名（和文）侵食による河口礫州フラッシュの解析法の開発

研究課題名（英文）Development of an analysis method for flushing of river mouth gravel bar due to erosion

研究代表者

竹村 吉晴（TAKEMURA, YOSHIHARU）

中央大学・研究開発機構・機構准教授

研究者番号：90634684

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：河口礫州のフラッシュには、河岸侵食の評価が重要となる。このため本研究では、非静水圧準三次元解析法に基づき、流れの三次元性と非平衡性の高い石礫の運動を考慮した河床変動解析法を構築した。河岸侵食については、サクシヨンの影響を考慮することで、河岸崩落により間欠的に進行する河岸侵食プロセスの解析法を構築した。さらに、本解析法を2006年に実施された常願川現地実験に適用し、その妥当性について検討した。そして、平成30年7月洪水による物部川河口礫州フラッシュの解析から、本解析法の有効性を示すとともに、今後の課題について整理した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の側岸侵食モデルでは、側岸侵食を説明するために安息角の大きさを調節する等の簡便な手法がとられており、その普遍性に課題があった。本手法は、自立高さという観測可能な新指標を導入し、河岸材料から決まる安息角を用いて河岸侵食を解析可能にした。今後、自立高さに対する知見を蓄積することで、河口礫州の発達する河口部の流下能力等について、従来よりも信頼度の高い議論を行えるようになるものと期待できる。

研究成果の概要（英文）：Evaluation of riverbank erosion is important for flushing of river mouth gravel bars. Based on a non-hydrostatic quasi-3D flow model, a bed variation model that takes into account the flow three-dimensionality and the non-equilibrium motion of gravel particles was developed. And we developed a method to analyze the intermittent process of riverbank erosion caused by riverbank collapse by taking into account the effect of the suction. This method was applied to a field experiment on the Jogonji River conducted in 2006, and the calculation results showed good agreement with observed data. Moreover, the effectiveness of the model was demonstrated by the flashing analysis of the river mouth gravel bars in the Monobe River due to the July 2008 flood.

研究分野：水工学

キーワード：河口礫州 河口砂州 準三次元解析法 非平衡流砂運動 側岸崩落 自立高さ サクシヨン

1. 研究開始当初の背景

河口砂州は河道への波浪や塩水の侵入を抑制する一方で、洪水流の流下を阻害し河道内の水位上昇による氾濫や偏流による河岸侵食の危険性増大の要因となる。河口砂州フラッシュ時に河川から流出した土砂は海岸への主要な土砂供給源になることから、河口砂州フラッシュの高精度な解析は河口管理上の重要な課題となっている。

近年、河口部において洪水時の水面形や航空写真、洪水前後の詳細な地形データが取得されるようになり、砂で構成される河口砂州のフラッシュについては高精度な解析が可能になりつつある¹⁾。一方、急流河川の河口では礫を主材料とする"河口礫州"が発達し、河口砂州とはフラッシュ機構が異なるものと考え、物部川を対象に研究を進めてきた。これまでの検討から、河口礫州フラッシュの解析には側岸侵食の評価が重要になること、緩勾配河川を対象とした従来の平衡流砂量式では現象を十分に説明出来ないことを明らかにしてきた。

2. 研究の目的

河口礫州のフラッシュには、側岸侵食の評価が重要となる。従来の側岸侵食モデルは、砂礫の安息角に基づき、側岸からの崩落土砂量および川底への堆積形状が幾何学的に計算される。このため、側岸侵食を説明するために安息角の大きさを調節する等の簡便な手法がとられ、普遍性の高い河岸侵食の解析法となっていない。このため、異なる外力条件に対して、河口礫州がどの程度フラッシュされ、河口部の水位上昇や海域での土砂堆積にどの程度の影響を与えるかについて、工学的に十分な精度で議論できていないのが現状と考えている。洪水時の側岸侵食は、洪水流により水際が洗掘されることで、不安定化した水面より上方の土砂が崩落し、川底に堆積した崩落土砂が流送されることで、再び崩落が発生するという間欠的なプロセスを経て進行する。このような側岸侵食のプロセスを説明可能とすることにより、侵食による河口礫州フラッシュの解析法を構築することが目的である。

3. 研究の方法

まず、申請者の開発した非静水圧準三次元解析法²⁾と石礫の非平衡運動を計算可能な長田・福岡モデル³⁾を組み合わせた洪水流・河床変動解析法(修正長田福岡モデル)を構築する。そして、間欠的な側岸崩落の発生を考慮するために、側岸の自立高さを考慮した側岸崩落の解析法を開発し、上述の洪水流・河床変動解析法と組み合わせることで、側岸侵食の新しい解析手法を開発する。本手法を、現地河川に適用し、その適用性について検討する。

4. 研究成果

(1) 解析モデルの開発

図-1 に本研究課題で開発した修正長田・福岡モデルの枠組みを示す。修正長田福岡モデルは、非静水圧準三次元解析から計算される底面付近の流速・圧力分布を考慮して、式(1)に示す砂粒子の運動方程式(x 方向のみ記載)に基づく Saltation 計算から、各粒径の平均移動速度を算出する。そして、式(2)に示す掃流砂の連続式に基づき、河床表層との土砂交換を考慮しながら非平衡の流砂運動を追跡する。

$$(\rho_s + \rho C_m)\alpha_3 d_k^3 \frac{du_{kp}}{dt} = -\left(\rho g \frac{\partial z_s}{\partial x} + \frac{\partial p'_b}{\partial x}\right)\alpha_3 d_k^3 + f_{dx} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_{pk} V_k}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}_{pk} V_k}{\partial y} = P_k - D_k \quad (2)$$

ここに、 ρ_s : 砂の密度、 u_{kp} : 粒径 d_k の移動粒子の x 方向の移動速度、 C_m : 仮想質量係数、 α_3 : 粒子の形状係数($\pi/4$)、 f_{dx} : 粒子に作用する x 方向の抗力、 V_k : 各粒径の単位面積あたりの流砂体積、 \bar{u}_{pk} : 各粒径の x 方向の平均移動速度、 \bar{v}_{pk} : 各粒径の y 方向の平均移動速度、 P_k : 単位面積・単位時間あたりに河床表層から離脱する各粒径の土砂量(離脱率)、 D_k : 単位面積・単位時間あたりに河床表層に堆積する各粒径の土砂量(堆積率)である。

さらに、河岸侵食に対しては、石礫の間隙を埋める細砂・シルトによるサクシヨンの影響を加味して、河岸の自立高さを式(3)のように求めることで、図-2 に示す間欠的な河岸崩落プロセスの解析を可能にした。

$$z'_c = \frac{4(c' + H_B \gamma_w \tan \phi_b) \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}\right)}{2\gamma_w \tan \phi_b \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}\right) + \gamma_t} \quad (3)$$

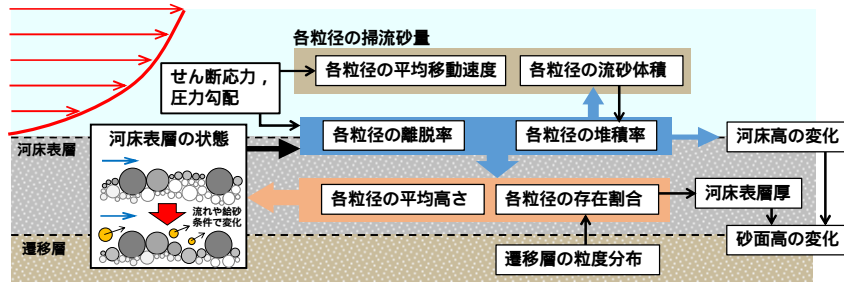


図-1 修正長田・福岡モデルの枠組み

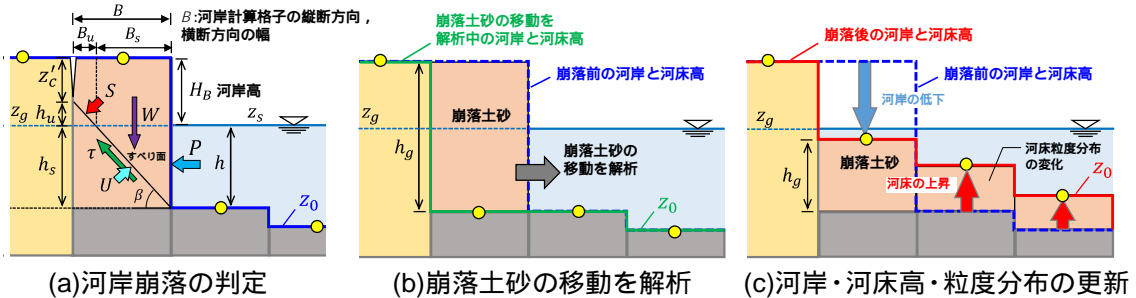


図-2 河岸崩落の判定と崩落土砂が川底に堆積する過程の解析手順

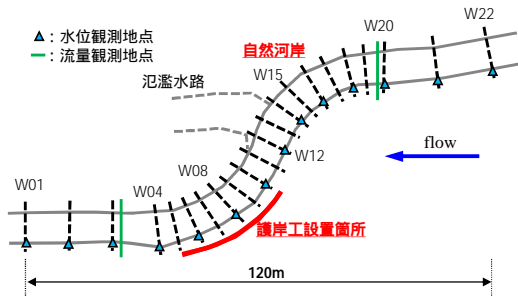


図-3 実験水路の平面図と観測地点

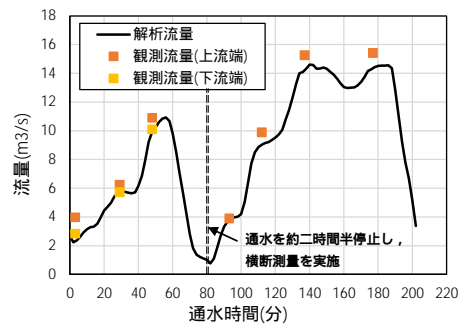


図-4 実測と解析の流量ハイドログラフ

ここに、 z'_c ：河岸の自立高さ、 H_B ：水面からの河岸高さ、 γ_w ：水の単位体積重量、 γ_t ：土塊の乾燥単位体積重量、 ϕ_b ：内部摩擦角、 c' ：粘着力である。

(2) 2006年常願寺川現地実験への適用

国土交通省富山河川国道事務所は、常願寺川の11.1km地点の砂州上に蛇行水路を作成し、河岸侵食実験を行っている⁴⁾。図-3に実験水路の平面形および水位・流量の観測地点を示す。水路長は120mで水路幅は6~7m程度である。実験水路は蛇行部を2つ設けており、下流側の蛇行部の外岸には護岸が設置されている。河岸侵食実験では、図-4に示すように最大で約15m³/sの流量が通水された。図-5は、実測と解析の水面形と通水前後の河床高の比較である。黒の実線は通水前の平均河床高であり、黒のプロットは通水後の実測平均河床高である。蛇行部区間では、河岸侵食に伴う土砂供給により、通水前後で平均河床高が上昇している。黒の点線は、通水後の解析平均河床高であり、全体的には実測と良く一致している。10m地点付近と70m地点付近では、実測に比べ、解析の平均河床高が高めに計算されている。これらの地点では、河岸侵食がやや大きめに計算されたことが理由である。図-6(a)は、本解析法によるW15地点の解析横断面形状と実測の比較である。図-6(b)は、従来の安息角モデル(河岸勾配が安息角(内部摩擦角)より急にならないように、地盤高を修正する方法)を用いて、河岸侵食を評価した場合の解析結果である。実験では、現地地敷を掘削して作成した水路に大流量が通水され、湾曲部の両岸が大きく侵食される大規模な実験が行われた。このため外岸だけでなく内側も著しい侵食を受けている。本解析法は、このような現象を適切に再現出来ており、実測の横断面形状をほぼ説明出来ていることが分かる。これに対し、安息角モデルを用いた場合は、流量10m³/sを通水した段階で河岸が大きく侵食されており、実測を説明出来ていない。図-6には、流量10m³/s、15m³/s通水時の観測最大水位を示している。本解析法では、水面と河岸の高さに差がある程、サクシヨンの影響(自立高さが高くなること)により、河岸崩落が発生しにくくなる。安息角モデルでは、このような機構が考慮されないため、水面に比べて河岸が十分高い場合に、河岸侵食を過大評価する傾向がある。

図-7は、河岸崩落の発生地点と発生時間の解析結果を平面的に示したものである。コンターで示す通水時間は、図-4の横軸と対応している。図-7から、河岸全体の侵食が間欠的に進んでいく様子が確認できる。このように、本解析法では、崩落土砂の流送、河岸際の洗掘、河岸崩落の発生という一連のプロセスを経て、河岸侵食が計算されることになる。扇状地河川の場合は、

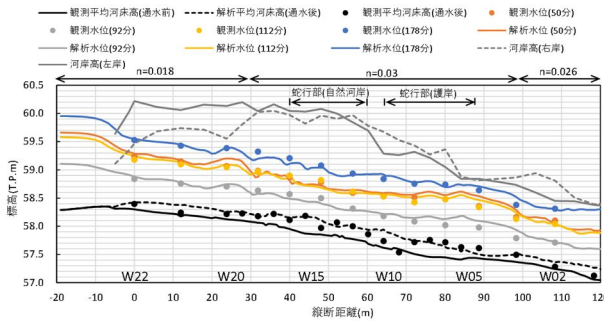


図-5 実測と解析の水面形時系列および
 通水後平均河床高の比較

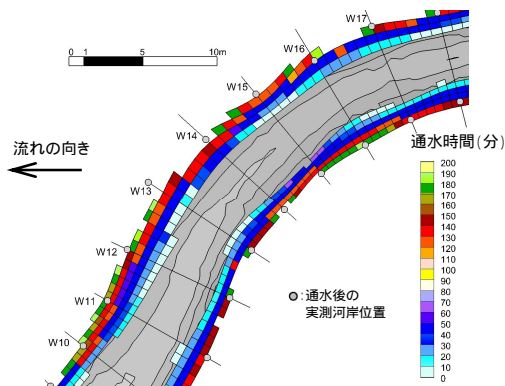
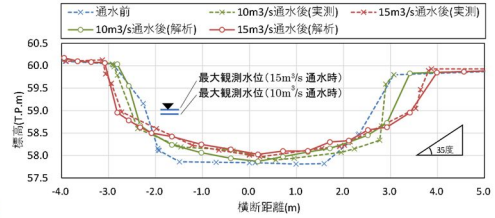
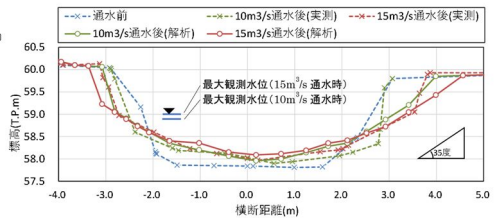


図-7 河岸侵食の発生地点と発生時間



(a) 本解析法



(b) 安息角モデル

図-6 W15 地点における実測と解析
 の横断面形状の比較

河岸崩落に伴い川底に供給された石礫がどの程度の時間をかけて流送されるかが、河岸侵食の進行速度や流路変動を予測するための鍵となる。このため、本論文で示したように、間欠的な河岸崩落の解析とともに、河岸近傍の三次元流れと石礫の非平衡運動を高精度に解析することが重要であることを強調したい。

(3) 平成 30 年 7 月洪水による物部川河口礫州フラッシュの解析と今後の課題

平成 30 年 7 月洪水では、物部川河口部において洪水前後で詳細な地形測量が実施されている。図-8 は、平成 30 年 7 月洪水後の観測と解析による物部川河口部の地形コンターである。図-8(c)は、平面二次元解析と平衡流砂量式を用いた従来法による解析結果である。洪水前は閉塞状態の河口が、洪水後は図-8(a)に示すように約 480m 開口し、砂嘴状の礫州が形成されている。本解析法は、このような特徴をある程度説明出来ており、河口礫州フラッシュの再現性が向上している。一方、本解析結果は観測結果に比べて、洪水後の河口礫州が沖合まで延伸する傾向にある。この理由の一つとして洪水時の波浪の影響が考えられる。実際に平成 30 年洪水時には、2m 程度の有義波高が平均的に観測されており、洪水後に測量を実施する前には 4m の有義波高が生じていた。洪水時の河口部およびその周辺海域での地形変化を解析、予測するためには、洪水流と波浪の両者の影響を考慮するとともに、これらの相互作用を適切に評価することが重要と考えられ、今後、さらなる検討を進めていく予定である。

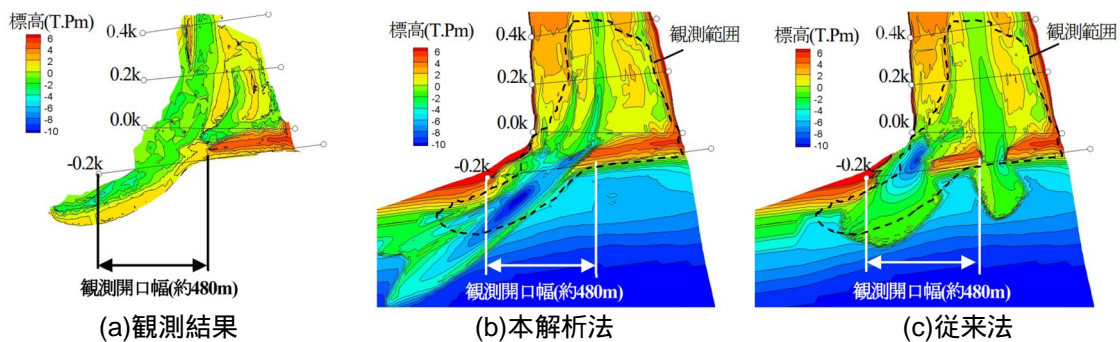


図-8 平成 30 年 7 月洪水後の物部川河口部の観測地形コンターと解析地形コンター

参考文献

- 1) 立山政樹, 福岡捷二, 石川俊之: 大規模洪水による河口砂州の開口機構に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.4, pp.I_715-I_720, 2018.
- 2) 竹村吉晴, 福岡捷二: 波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面(水面・底面)上の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS), 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.75, No.1, pp.61-80, 2019.
- 3) 長田健吾, 福岡捷二: 石礫河川の河床変動機構と表層石礫の凹凸分布に着目した二次元河床変動解析法, 土木学会論文集 B1, Vol. 68, pp.1-20, 2012.
- 4) 塚本洋佑, 福岡捷二, 須賀正志, 澤原和哉, 長田健吾: 石礫河川の粒度分布特性と安定河道形状, 河川技術論文集, 第 14 巻, pp.7-12, 2008.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 竹村吉晴, 福岡捷二	4. 巻 Vol.77, No.2
2. 論文標題 扇状地河川の河岸侵食プロセスの解析法と常願寺川現地実験への適用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 pp.1_757-1_762
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.77.2_1_799	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 竹村吉晴, 福岡捷二	4. 巻 第9回
2. 論文標題 扇状地河川における河岸侵食プロセスに関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第9回河川堤防技術シンポジウム	6. 最初と最後の頁 pp.79-82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 竹村吉晴, 久保宜之, 岡田将治, 福岡捷二	4. 巻 26
2. 論文標題 洪水流による物部川河口礫州の開口と変形機構 に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 pp.669-674
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 竹村吉晴
2. 発表標題 自立高さを考慮した河岸侵食プロセスの解析法と常願寺川現地実験への適用
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshiharu Takemura ,Shoji Fukuoka
2. 発表標題 Non-equilibrium bed variation analysis in stony-bed rivers considering changes in the bed surface structure: application to enlargement mechanism of the Monobe river mouth due to floods
3. 学会等名 22nd IAHR-APD Congress (国際学会)
4. 発表年 2020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