

石礫河川における底面流速解法を用いた洪水流・河床変動解析に関する研究

中央大学大学院理工学研究科 学生会員 ○前嶋 達也
 国土交通省北陸地方整備局富山河川国道事務所 曾山 和宏
 中央大学研究開発機構 フェロー会員 福岡 捷二
 中央大学研究開発機構 正会員 長田 健吾

1. 研究背景及び目的

石礫河川の河床材料は、石礫から砂まで幅広い河床材料分布で構成される。また、石礫河川は洪水時の流体力が大きく土砂移動が活発であるため、洪水時の河床変動特性の理解は極めて重要であり、河床材料分布を考慮した河床変動機構の解明及び予測技術が求められている。これまで、室内移動床水路実験をベースに混合粒径河床の河床変動に関する実験的及び解析的研究（例えば芦田ら¹⁾）が行われてきた。しかし、室内水路実験であるため、実験条件が制約され、室内実験の河床材料分布は、**図-1**に示すように現地石礫河川とは大きく異なる。福岡ら^{2) 3)}は常願寺川大規模現地実験より、石礫河川の土砂移動機構は粒径が小さい砂河川及び砂礫河川の土砂移動機構とは異なることを明らかにし、石礫河川の河床変動解析法を構築した。本研究では、底面流速解法を用いた準三次元洪水流解析法⁴⁾と石礫河川の河床変動解析法³⁾を組み合わせたモデルを構築し、著者らが2009年に複断面直線-蛇行水路で行った常願寺川現地実験に適用した。

2. 2009年常願寺川現地実験の概要と実験結果

現地実験は、常願寺川8.6kmの高水敷上に複断面蛇行-直線水路を掘削し行った⁵⁾。**表-1**に実験条件を示す。掘削水路は、蛇行長190m、低水路幅3m、左右岸高水敷幅2m、全水路幅8m、低水路河岸勾配1:1である。また、堤防河岸の侵食対策として約400mm程度の玉石を堤防河岸際に連続的に配置した。本研究では、通水3回目(Q=8.0 m³/s)を検討対象とする。**図-2**に通水3回目前後の実測河床変動量コンターを示す。実験水路は大きく蛇行しているため、二次流の発達により外岸河床の洗掘、蛇行部内岸における土砂堆積が見られた。通水終了後の河床材料は、直線区間の低水路河床は約100mm、蛇行部外岸は約100mm~200mm、濤筋部は70mm~100mm、内岸部は40mm程度となり、河床材料が顕著に分級した。

3. 底面流速解法を用いた準三次元洪水流・石礫河床変動解析

二次流が発達する蛇行部における河床変動、及び河床材料が大きい石礫河川の土砂移動を検討するため、内田・福岡⁴⁾の底面流速解法を用いた準三次元洪水流解析法と長田・福岡³⁾の石礫河川の二次元河床変動解析法を組み合わせた計算を行う。流れの支配方程式は、一般座標系の水深積分された運動方程式と連続式、水表面流速の運動方程式、渦度方程式を用いた。渦度を用いた底面流速解法を**図-3**に示す。底面流速は、(1)式に示す水深積分した渦度と水表面流速を用いて決定される。

$$u_{bx} = u_{sx} - \varepsilon_{xy3} \Omega_y h, \quad u_{by} = u_{sy} - \varepsilon_{xy3} \Omega_x h \quad (1)$$

ここに、 u_{bx} , u_{by} はx,y方向の底面流速、 u_{sx} , u_{sy} はx,y方向の表面流速、 ε_{ij3} はエディトンのイプシロン、 Ω_x , Ω_y はx,y方向の水深平均渦度、 h は水深を表している。

河床変動計算は、上述した解析法により求めた底面流速を用いる。**図-4**に示すように各粒径に働く力を考え、河床からの離脱量 V_p 、堆積量 V_D 及び粒子の移動速度ベクトル u_{px} , u_{py} を計算する。

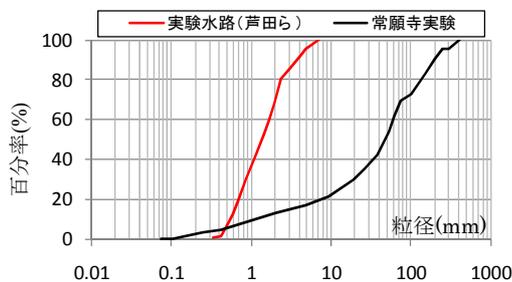


図-1 室内実験と現地実験の材料分布

表-1 実験条件

実験CASE	通水1回目	通水2回目	通水3回目	通水4回目
流量(m ³ /s)	2.0	3.2	8.0	12.0
低水路水深(m)	0.34	0.56	0.80	1.10
水面幅(m)	3.1	6.9	7.8	8.5
平均河床勾配	1/130		1/150	

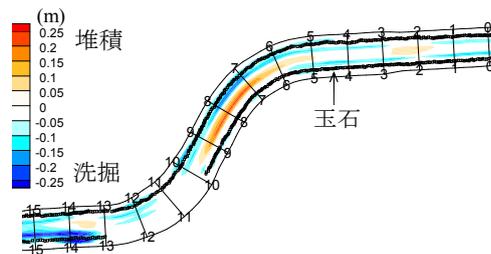


図-2 実測河床変動量コンター

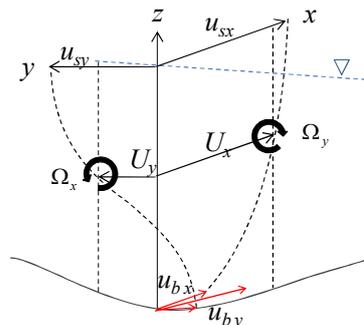


図-3 渦度を用いた底面流速解法

それら河床からの離脱量と堆積量を用いて、(2)式に示す各粒径の高さ Z_{Bk} を時々刻々計算することで、時間的に変化する河床表層の凹凸（空隙率）を表現する。流砂量 q_{bx} , q_{by} は、(3)式に示す単位面積当たりの流砂体積 V_s を用いて(4)式より求める。

$$\frac{\partial Z_{B,i,j,k}}{\partial t} = -\frac{\alpha_2 (V_{P_i,j,k} - V_{D_i,j,k})}{\alpha_3 P_{i,j,k}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial V_{S_i,j,k}}{\partial t} + \frac{\partial q_{B_x,i,j,k}}{\partial x} + \frac{\partial q_{B_y,i,j,k}}{\partial y} = V_{P_i,j,k} - V_{D_i,j,k} \quad (3)$$

$$q_{B_x,i,j,k} = u_{px,i,j,k} V_{S_i,j,k}, \quad q_{B_y,i,j,k} = u_{py,i,j,k} V_{S_i,j,k} \quad (4)$$

ここに、 i,j はメッシュ番号、 α_2 , α_3 は形状係数、 P_k は各粒径の表層割合である。

図-5 に解析で用いた粒度分布を示す。実測の表層画像解析、ふるい分け試験を参考に表層と下層に分けて与えた。上下流の境界条件は、観測された水位ハイドログラフを用いた。実験では、上流端からの土砂供給はないため、解析でも考慮していない。解析では、解析メッシュ内に占める玉石の割合を算出し、玉石に働く抗力を考慮した。

4. 解析結果と考察

図-6 に、通水開始約 2 時間後の解析水面形と観測水位(レベル測量)の縦断面図を示す。解析値は蛇行部を含めて観測水面形を概ね再現している。図-7 は No.9 断面の平均流速の横断分布を示している。蛇行部外岸では遠心力により流速が加速され、実測を説明していることから高水敷河床の洗掘を再現できている。ただし、堤防河岸の侵食は実測値に比べ解析値は小さい。図-8 に解析河床変動量コンターを示す。図-2 の実測コンターに比べて蛇行部内岸の土砂堆積量が少ない。これは、石礫河川の河床変動モデルでは、大きな石の露出に伴い細かな河床材料が遮蔽されるため、従来の解析法に比べて小さい粒径は移動しにくくなるためである。図-9 に No.9 断面の解析横断面形状と平均粒径の横断分布を示す。河床表層の粒度分布を計算しているため、河床材料は、粗粒化する実測値を概ね再現している。

5. 結論

河床表層材料の粗粒化及び石礫の土砂移動を説明することができた。しかし、細かな材料の移動機構が十分考慮できていないため、蛇行部内岸の細粒土砂の堆積を再現できていない。

参考文献

- 1) 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義, 梅本正樹: 蛇行流路における Sorting 現象及び平衡河床形状に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 33 号 B-2, pp.261-279, 1990.
- 2) 福岡捷二: 石礫河川の移動床水理の諸問題と解決への道筋, 第 44 回水工学に関する夏期研修会講義集, A-1, 2008.
- 3) 長田健吾, 福岡捷二: 石礫河川の二次元河床変動解析法に関する研究, 河川技術論文集, 第 15 巻, pp327-332, 2009.
- 4) 内田龍彦, 福岡捷二: 水平方向過渡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, pp841-846, 2010.
- 5) 前嶋達也・岩佐将之・長田健吾・福岡捷二: 石礫複断面直線-蛇行河道の河床変動及び河床材料分布に関する研究, 水工学論文集, 第 55 巻, 2011.

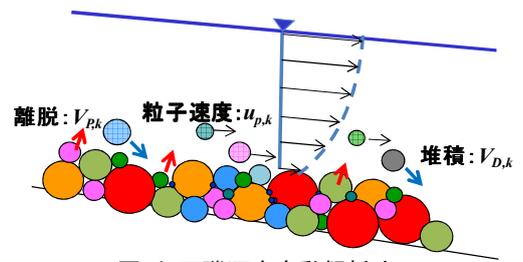


図-4 石礫河床変動解析法

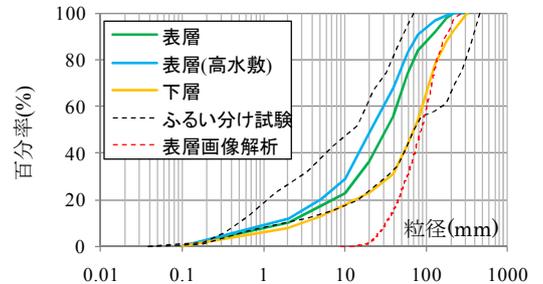


図-5 解析で用いた粒度分布

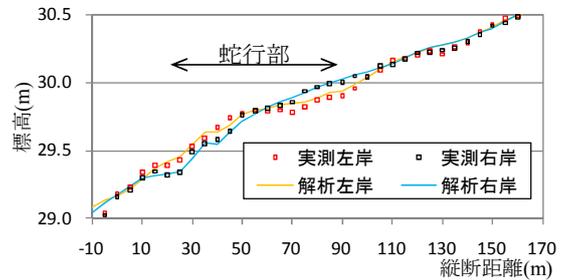


図-6 解析・実測の水位縦断面図

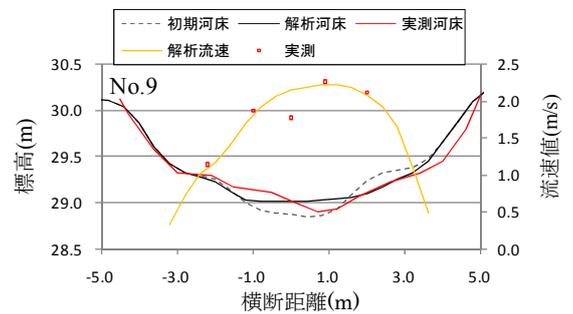


図-7 解析流速分布

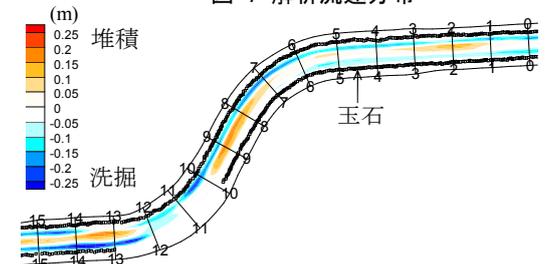


図-8 解析河床変動量コンター

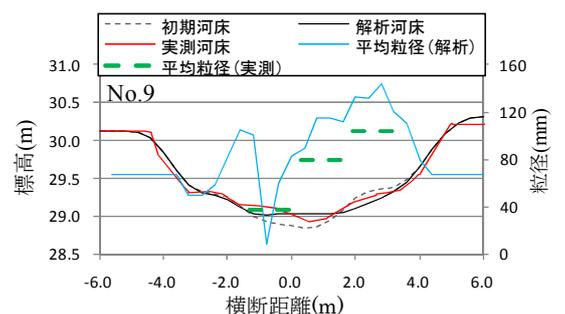


図-9 横断形状と平均粒径の横断分布