

粗礫周辺における浮遊砂の堆積過程に関する数値計算

鳥取大学大学院工学研究科 学生会員 ○三宅由衣
大和観光開発株式会社 非会員 北村祐貴

鳥取大学大学院工学研究科 正会員 檜谷 治
鳥取大学大学院工学研究科 正会員 梶川勇樹

1. はじめに

河川における浮石や沈み石帯は生物の生息場としての重要性が指摘されている。そのため、河床形態をモデル化して生息場評価等が行われているが、河床近傍の生息場は底質の構成・構造への依存性が強く、さらに、浮石の様な間隙を有する媒体中の流れ場を調査することは困難なため、礫周辺の流れについては詳しく解明されておらず、従来からの水理モデルでは底質の構造を十分に表現できないのが現状である。

そこで本研究では、浮石・沈み石形成過程の解析を目標とし、浮石は礫間の泥・砂などが掃流され、沈み石は礫間に泥・砂などがつまって形成されることから、粗礫周辺における浮遊砂の動態を再現できる鉛直 2 次元数値計算モデルの構築を行う。そして、モデルの妥当性を検討するため、トレンチ内の浮遊砂濃度分布、堆積過程の再現を試み、さらに、粗礫周辺における浮遊砂の濃度分布を再現し、対象実験との比較を行った。

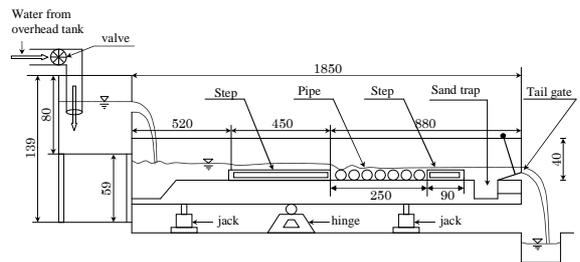


図-1 実験水路 (単位: cm)

表-1 実験条件

単位幅流量 q (m^2/s)	0.015
平均水深 ht (cm)	3.81
摩擦速度 u_* (cm/s)	4.32
勾配 i	1/200
相対水深 h/d	0.33
u_*/w_f	2.94

2. 粗礫周辺の浮遊砂堆積過程に関する水理実験

実験装置は、図-1 に示す水路幅 40cm の実験水路に上流側 450cm、下流側 90cm の step を設け、その間 250cm に直径 11.5cm の塩ビのパイプを 1.2cm 間隔で設置している。表-1 に実験条件を示す。給砂に関しては、この水路の上流側 step 上流端付近に給砂装置を設置し、粒径 0.17mm の砂を 360g/min の割合でなるべく均一に砂をふるい落とした。そして、細砂の供給による礫周辺の堆積過程の計測および濃度分布の測定を行い、堆積過程はビデオカメラを用いて 0 秒より礫間が満砂になるまで計測し、浮遊砂濃度分布は上流側 step 下流端を原点とすると 0cm, 32.35cm, 70.45cm の 3 箇所で、0cm と 32.35cm 地点では礫天端より、0.5cm, 1.5cm, 2.5cm の高さ、70.45cm 地点は、0.5cm, 1.5cm, 2.5cm, 3.5cm の高さの水と浮遊砂をそれぞれ 5 連式サイフォンにより 10 分間隔で採取した。採取した試料はろ過し、炉乾燥後に質量を計測して濃度分布を作成している。浮遊砂の堆積過程の実験結果について、礫間への堆積の時間的変化を図-2、0cm 地点での濃度分布の時間的変化を図-3、給砂から 40 分までの堆積過程と 30~40 分の浮遊砂濃度分布を図-4 に示す。

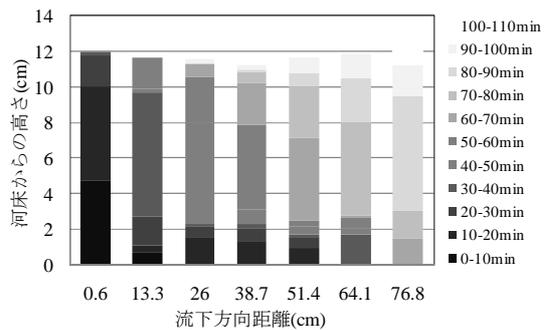


図-2 礫間への堆積の時間的変化

3. 数値計算モデル

本数値モデルには、基礎方程式に FAVOR 法を導入し、渦動粘性係数には標準型 $k-\epsilon$ モデルを採用した。しかし、標準型 $k-\epsilon$ モデルの渦運動に対する適要性の悪さを考慮し、その改良方法として渦動粘性係数にストレイン・ローティ

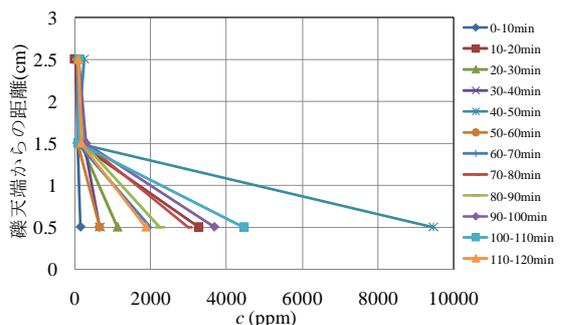


図-3 0cm 地点での濃度分布の時間的変化

ションパラメータ導入を行っている。①に基礎方程式を示す。このモデルに浮遊砂の輸送・拡散方程式を導入し、対象実験における浮遊砂濃度の再現計算を試みた。浮遊砂濃度の連続式を②に示す。ここに、 t ：時間、 (x, z) ：それぞれ水平方向、鉛直方向座標、 (A_x, A_z) ： x 方向、 z 方向に垂直な断面で流体の占める面積率、 V ：任意の格子において流体の占める体積率、 (u, w) ： x 方向および z 方向の流速成分、 g ：重力加速度、 ρ ：流体の密度、 $P = p + 2/3\rho k$ 、 p ：圧力、 ν ：動粘性係数、 ν_t ：渦動粘性係数、 $\nu_e = \nu + \nu_t$ 、 c ：浮遊砂濃度、 D_t ：渦拡散係数($= \nu_t / \sigma_t$)、 σ_t ：乱流シュミット数であり、 σ_t は0.8とした。数値計算法は、コロケート格子上におけるHSMAC法(C-HSMAC法)とほぼ同様である。標準型 $k-\epsilon$ モデルの差分化に関しては移流項と拡散項を同時に考慮するhybrid法を適用した。

4. トレンチ内の浮遊砂濃度分布に関する再現計算

モデルの妥当性を検討するため、藤田らの実験¹⁾を対象とし、トレンチ内の浮遊砂濃度分布に関する数値解析を行った。実験では、長さ9m、幅0.3m、深さ0.3mの矩形断面水路を使用し、トレンチ形状を変化させて検討を行っている。流水条件は、流量 $Q = 0.78 \text{ l/s}$ 、トレンチ部以下の水深 $h_0 = 1.45 \text{ cm}$ 、平均流速 $u_0 = 17.9 \text{ cm/s}$ 、摩擦速度 $u_{*0} = 1.2 \text{ cm/s}$ とし、トレンチ長さ L は20cmであり、計算は深さ D が0.9cm、1.9cmの2Caseについて行った。給砂は粒径 $145 \mu\text{m}$ 、比重1.18の塩化ビニール製粒子を 0.178 g/l の割合で行っている。計算条件を表-2に示す。

①まずは、図-5に各ケースにおける給砂開始直後の浮遊砂濃度分布をそれぞれ示す。ただし、Case2については、実験において浮遊砂濃度が測定されていないため、藤田らの計算結果と比較した。図より、本数値モデルによる計算結果は、流下方向の非平衡浮遊砂濃度分布を計算できている。しかし、トレンチ流入部における結果を見ると、実験ではかなり濃度が小さく、底面近傍で濃度が高かったものと考えられる。これを十分再現していないため、各ケースとも計算濃度が実験値よりも高くなったと考えられる。

②Case2におけるトレンチ内の浮遊砂堆積過程に関する計算と実験結果との比較図を図-6に示す。図より、実験ではトレンチ上流の偶各部から堆積が進行し、その後デルタが下流へ前進するように堆積しているが、計算結果ではトレンチ上流部からの堆積が見られるものの、その後トレンチ内全体で堆積が進行している。図-5(b)を見ると、トレンチ底面付近における濃度は、本数値モデルおよび藤田らの結果ともほぼ同様であり、計算法に問題があるとは考

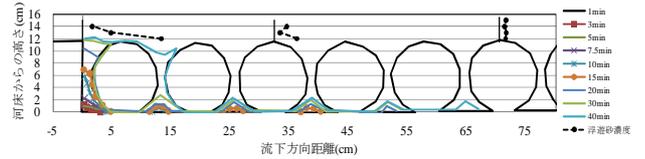


図-4 40分までの堆積過程と30～40分の濃度分布

【基礎方程式】…①

<連続式>

$$\frac{\partial(A_x u)}{\partial x} + \frac{\partial(A_z w)}{\partial z} = 0$$

<運動方程式>

・ x 方向(流下方向)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V} \left\{ \frac{\partial(A_x u u)}{\partial x} + \frac{\partial(A_z w u)}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{V} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left\{ 2A_x \nu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ A_z \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \right]$$

・ z 方向(鉛直方向)

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V} \left\{ \frac{\partial(A_x u w)}{\partial x} + \frac{\partial(A_z w w)}{\partial z} \right\} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{\nu} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left\{ A_x \nu_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ 2A_z \nu_e \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \right]$$

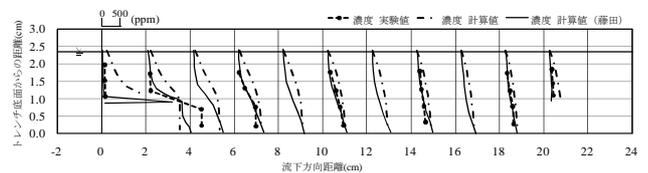
【浮遊砂濃度の連続式】…②

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{1}{V} \left[\frac{\partial}{\partial x} \{ A_x u c \} + \frac{\partial}{\partial z} \{ A_z (w - w_f) c \} \right] = \frac{1}{V} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(A_x D_t \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z D_t \frac{\partial c}{\partial z} \right) \right]$$

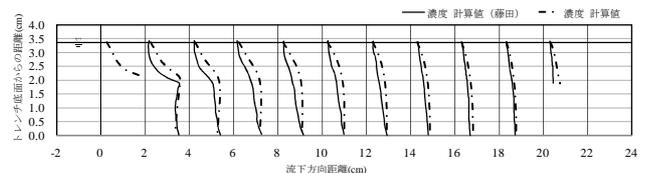
$$D_t = \frac{\nu_t}{\sigma_t}$$

表-2 計算条件

分散間隔	Δt (sec)	0.001
	Δx (cm)	1.00
	Δz (cm)	0.25
メッシュ数	x 方向	0.0105
	z 方向	80
粗度係数 n		25



(a) Case1 ($D = 0.9 \text{ cm}$)



(b) Case2 ($D = 1.9 \text{ cm}$)

図-5 トレンチ内の浮遊砂濃度分布

えにくい。そのため、実験結果を再現するためには浮遊砂がトレンチ内に入った際に比較的早い段階で沈降していくような工夫をする必要が考えられる。

5. 粗礫周辺の浮遊砂濃度分布に関する数値計算

本数値モデルでは、4. で行ったトレンチ内の浮遊砂堆積過程における計算結果から妥当性が得られなかったため、粗礫周辺の実験に関する計算は、浮遊砂濃度についてのみ試みた。計算条件を表-3に示す。また、実験ではトレンチ外の上流部で浮遊砂の堆積が見られたが、計算ではトレンチ内のみ浮遊砂の浮上・堆積を考慮し、実験給砂開始から0, 30, 60分経過後の浮遊砂濃度の解析を行った。

結果として、給砂から0, 30, 60分経過後の浮遊砂濃度分布の計算値と実験値の比較を図-7に示し、30分経過後の浮遊砂濃度コンター図を図-8に示す。図-7の計算値は上流ステップ直上とそれぞれの礫直上の地点における濃度を示している。図より、実験では礫天端に近い所から濃度が高くなっていること、水面に近くなる程、計測地点によつての濃度の差があまり見られないことが分かる。実験値と計算値を比較すると、計算濃度は時間経過に伴って徐々に大きくなっていることが分かるが、下流部は上流部と比べ、濃度が時間とともに大きくなる様子や底面に近い程値が大きくなる様子を再現できておらず、特に十分礫間に浮遊砂が堆積した時点の結果に関しては実験値の様な変化を計算結果から得ることはできなかった。図-8は、実験では測定困難な礫間の浮遊砂濃度を把握するため、計算結果によるコンター図を示した。図より、礫間では水深が大きくなるにつれ、浮遊砂濃度が大きくなっていることが分かる。

6. まとめ

本研究では、粗礫周辺における浮遊砂濃度分布の再現を試みた。その結果、計算濃度は時間経過に伴って徐々に大きくなっていることが分かったが、下流部は上流部と比べ、濃度が時間とともに大きくなる様子や底面に近い程値が大きくなる様子を再現できておらず、特に十分礫間に浮遊砂が堆積した時点の結果に関しては実験値の様な変化を計算結果から得ることはできなかった。今回は対象実験における堆積過程の再現を行うまでに至らなかったため、今後より良好に浮遊砂濃度を再現でき、さらに粗礫周辺の浮遊砂堆積過程の再現に応用できるような数値モデルの構築が求められる。

【参考文献】1) 藤田正治, 道上正規, 檜谷治: トレンチ内の流れと浮遊砂濃度分布の数値シミュレーション, 水工学論文集, 第35巻, pp.377-382, 1991.

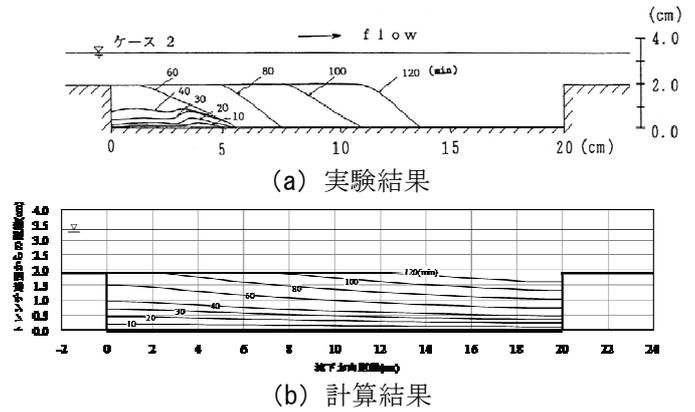


図-6 トレンチ内の堆積形状

表-3 計算条件

離散間隔	Δt (sec)	0.001
	Δx (cm)	0.4233
	Δz (cm)	0.4233
メッシュ数	x方向	250
	z方向	50
粗度係数 n		0.012

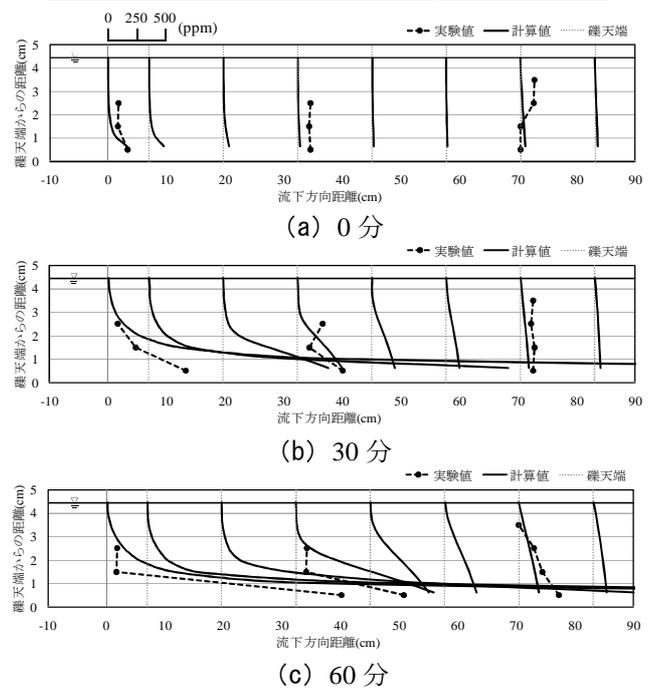


図-7 浮遊砂濃度分布の計算値と実験値の比較

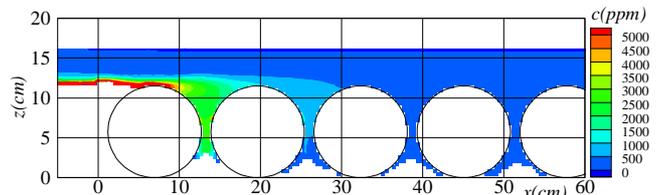


図-8 浮遊砂濃度コンター図 (計算値 30分)