

粗礫河床における浮遊砂の堆積過程に関する数値シミュレーション

鳥取大学大学院工学研究科 学生員 ○岸 俊宏
鳥取大学大学院工学研究科 正会員 梶川 勇樹

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 学生員 寺田 雄一

1. はじめに

河川環境を考える上で、河床材料に付着する藻類の生態についても考慮する必要があるが、この付着藻類の剥離に関しては、河床礫に対する浮遊砂の衝突が重要な役割を担う。したがって、数値計算により厳密な付着藻類の剥離予測を行う場合、河床材料を個別に着目した計算が必要となるものの、現状では実河川への適用は困難である。そこで、本研究では最終的に剥離予測のモデル化を目指し、まず粗礫周辺の流れ場と浮遊砂の動態（堆積）を再現できる数値モデルの構築を行った。ここでは、粗礫床における浮遊砂の堆積過程に関する水理実験¹⁾を対象とし、実験結果との比較から本モデルを評価した。

2. 数値計算モデルについて

本数値モデルでは、基礎的に複雑な境界形状でも滑らかに境界条件を課することができる FAVOR 法を導入した。FAVOR 法では格子中に流体部分と境界部分とが混在すると考え、任意の格子で流体の占める体積率を V 、各方向に垂直な断面で流体の占める面積率を A_i と定義する。図 1 に面積率の定義方向を、また、鉛直 2 次元における連続式、運動方程式および浮遊砂濃度連続式をそれぞれ示す。ここで、各記号については慣用に従うものとするが、渦動粘性係数 ν_t については Smagorinsky 定数モデルを採用し $C_s=0.18$ とした。また、計算格子には図 2 に示すコロケート格子を採用し、基礎式の離散化には移流項に QUICK 法を、時間積分には Adams-Bashforth 法を適用した。圧力偏差の収束計算にはコロケート格子における C-HSMAC 法を適用した。

3. 計算条件と境界条件

今回行った数値シミュレーションでは、図 3 に示すように、粒径 7.2cm の河床礫を等間隔に 6 個設置し、上流端から 0.17mm の細砂を投入した。河床礫の大きさは、水理実験と同様の値を用いた。上流端から流入させた細砂濃度は水理実験結果より $3.235 \times 10^{-4}(\text{ppm})$ とし、鉛直方向に一樣に与えた。また、下流端では自由流出条件とした。表 1 に水理実験を基に設定した計算条件を示す。その他境界条件として、上流端では流量を、下流端では所定の水位を与え、固体壁面および底面では対数則に従う摩擦抵抗を与えた。

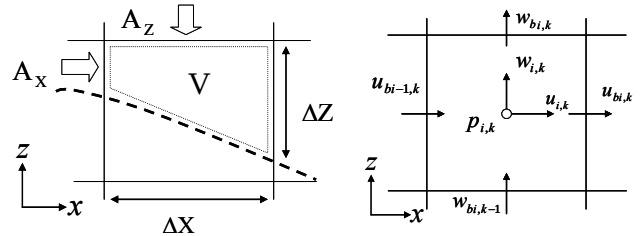


図1 面積率の定義方向 図2 2次元におけるコロケート格子の概略図

【鉛直2次元流れの基礎方程式】...

『連続式』

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

『x方向運動方程式』

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V} \left\{ \frac{\partial(A_x u u)}{\partial x} + \frac{\partial(A_z u w)}{\partial z} \right\} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{V} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[2A_x \nu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[A_z \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \right\} \\ \nu_e = \nu_t + \nu, \quad P = p + \frac{2}{3} q, \quad q = \frac{\nu_t^2}{(C_k \Delta)^2} \end{aligned}$$

『水面形の式』

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u_s \frac{\partial \eta}{\partial x} = w_s$$

【2次元の浮遊砂濃度連続式】...

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

表1 計算条件

水路長 (cm)	50	計算時間間隔: dt (sec)	0.002
水路幅: B (cm)	40	メッシュ間隔: dx (cm)	0.36
水路勾配: I	1/80	メッシュ間隔: dz (cm)	0.36
流量: Q (m ³ /sec)	4.63×10^{-3}	人工粘性係数: K_v	5.0
下流端水深: h_0 (cm)	0.025	最小体積率: Vmin (%)	5
マンニングの粗度係数: n	0.012	細砂濃度: C_0	3.235×10^{-4}

4. 計算結果と考察

計算結果として、まず、図4に水面形の比較図を示す。図より、計算値は全体的に実験値より水面が高いことが分かる。これは、実験では浸透流量が全流量の30%を占めているのに対し、計算では鉛直2次元で礫を底面に密着させ、浸透流量が発生していないためと考えられる。また、図5には実験水路の5m～6m区間の流速分布との比較を示しているが、上記のような理由から、計算値は全体的に流速が小さく、水面と河床礫付近との流速とにあまり差がないことが分かる。次に、図6(a)、(b)に給砂開始から500秒後と1900秒後の浮遊砂濃度分布を示す。ここで、500秒後は浮遊砂の堆積開始時間、1900秒後は堆積終了時間であり、河床礫間の白い部分が堆積部分である。図6(a)をみると、給砂地点側である上流端(5cm地点)から堆積し始めていないことが分かる。これは、5cm地点は大きな礫で構成された河床の始点に当たるため、水流の急激な乱れにより堆積が促されなかったものと考えられる。図7(a)、(b)は、各時間の流速ベクトルを示しているが、両時間での主流速はほぼ不変である。また、図8に堆積の進行に伴う時間変化を示しているが、堆積終了時の1900秒後をみると、4cm～6cm付近まで堆積しており、実験より堆積高は少し低い結果となった。ただし、実験は2個以上の河床礫が積み重なって構成されているが、今回の計算では河床礫が積み重なっておらず、1つの河床礫が隣り合って構成されていることを考慮すると、実験と近い結果が出たと考えられる。

4. まとめ

本研究では、粗礫周辺の流れ場と浮遊砂の動態(堆積過程)を再現できる数値モデルを構築し、数値計算を行った。結果、今回の数値シミュレーションでは概ねその堆積過程を再現することができた。今後は、本研究モデルの更なる発展を目指し、3次元モデルによる粗礫床周辺の流れ場および浮遊砂の堆積過程に関する数値モデルの構築を行う。さらに、現地へ適用できるような水流と粒砂による剥離予測モデルの構築を行う予定である。

【参考文献】

1) 道上正規, 藤田正治, 北川豊広, 三村光太郎: 空隙の大きな河床への浮遊砂の沈み込み過程と非平衡浮遊砂, 水工論文集, 第38巻, pp. 609-614.

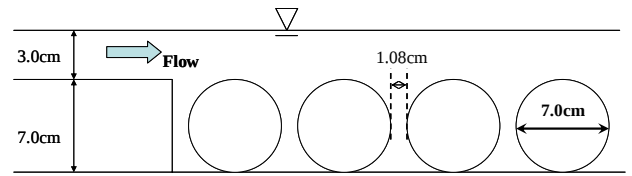


図3 モデル流路

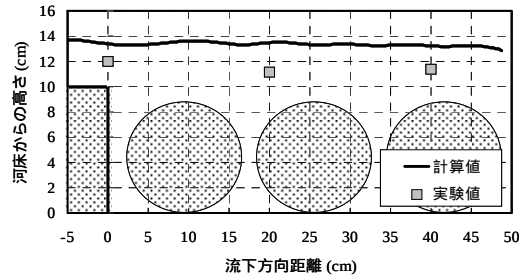


図4 水面形における計算値と実験値との比較

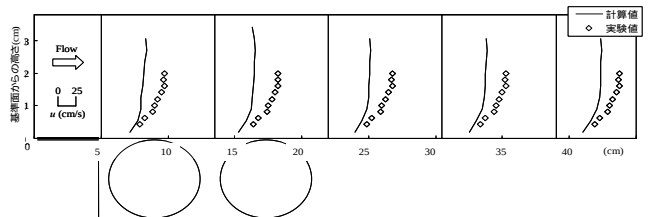


図5 流下方向の流速分布

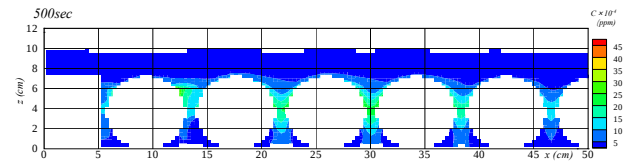


図6(a) 浮遊砂濃度コンター図

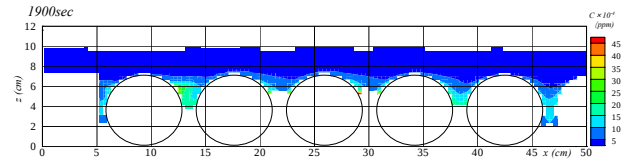


図6(b) 浮遊砂濃度コンター図

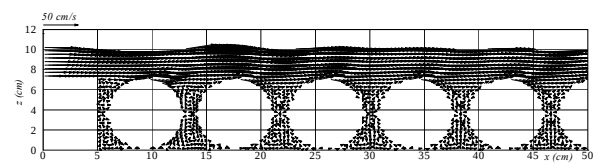


図7(a) 初期状態における流速ベクトル図

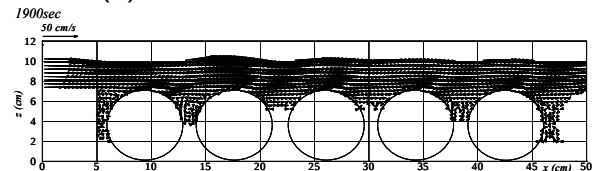


図7(b) 流速ベクトル図

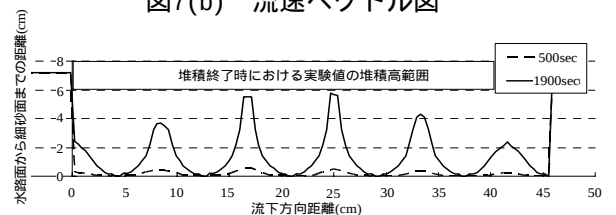


図8 堆積による時間的变化