3次元流れ解析モデルを用いた交互砂州形成の数値シミュレーション

○京都大学大学院	学生員	安庭	正晴
京都大学大学院	正会員	音田	慎一郎
京都大学大学院	フェロー	細田	尚

1. はじめに

河床形態のうち幅規模のものを砂州と呼ぶ.砂州が 形成すると流れの集中や大規模な流路変動等によって 河川構造物が破壊される可能性がある.したがって, 砂州形成とそれに伴う流路変動を的確に予測すること は,治水・利水・環境保全といったあらゆる面から河 道計画を検討する上で非常に重要である.本研究では, 砂州の形成,及びそれに伴って生じる流路変動を予測 でき,河道計画に役立つ数値モデルの構築を最終目的 とし,その最初のステップとして実験水路での交互砂 州形成の再現計算を行った.形状特性について実験結 果と比較することでモデルの妥当性を検証した.

2. 数値解析モデル

(1) 流れのモデル

流れのモデルには,密度関数法と Porous Media 法を 用いた 3 次元流れ解析モデル ¹⁾適用する.このモデル により表面流と浸透流を同時に予測できることができ る.基礎式は以下のとおりである.

$$\frac{\partial (1-c)\Phi}{\partial t} + \frac{\partial (1-c)u_j\Phi}{\partial x_i} = 0$$
(1)

$$\frac{\partial}{\partial t} \{(1-c)u_i\} + \frac{\partial}{\partial x_j} \{(1-c)u_iu_j\} = (1-c)g_i - \frac{(1-c)}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} (2)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j} \{-(1-c)\overline{u_i'u_j'}\} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \{(1-c)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\} - \frac{\nu(1-c)^2 u_i}{K_d}$$

$$\rho = \Phi \rho_{liq} + (1-\Phi)\rho_{gas} \qquad (3a)$$

$$\mu = \Phi \mu_{liq} + (1-\Phi)\mu_{gas} \qquad (3b)$$

ここに、t:時間、 x_i : デカルト座標系、 u_i : 流速ベクト ルの x_i 方向成分、 Φ : 密度関数、c: 固相の体積濃度、 u_i : 乱れ速度ベクトル、p: 圧力、 ρ : 流体の密度、 ρ_{liq} : 液相の密度、 ρ_{gas} : 気相の密度、v: 動粘性係数、 μ : 流 体の粘性係数、 μ_{liq} : 液相の粘性係数、 μ_{gas} : 気相の粘 性係数、 g_i : 重力加速度ベクトル、 K_d : 固有透水係数で



図-1 計算対象とする側岸固定直線水路

ある.また, $u'_i u'_j$ はレイノルズ応力であり,2次の非 線形 k- ϵ^2)モデルを用いた乱流モデルによって計算する.

(2) 土砂輸送モデル

土砂輸送形態として掃流砂のみを取り扱う.河床変 動の基礎式は,流砂の連続式,および主流方向の掃流 砂量式に Kovacs and Parker 式³,横断方向の掃流砂量 式に長谷川の式を適用する.

(3) 数值解析法

本解析の計算手法について説明する.基礎式の離散 化には有限体積法,運動方程式の移流項の離散化には QUICK スキーム, Φ の移流方程式の離散化には TVD-MUSCL 法をそれぞれ用いる.また, k 及び ε 方程式の 移流項の離散化には Hybrid 法を適用する.数値拡散 による気液界面のぼやけを防ぐため,体積補正 4を行 った.

3. 側岸固定直線水路への適用

3 次元流れ解析モデルと土砂輸送モデルを組み合わ せた数値モデルを図-1 に示す三上⁵⁾の行った実験に適 用し,再現計算を行った.実験から得られた砂州波長 が 3m であったことから,計算対象領域はその 2 倍の 6m とした.その他の水理量等は実験条件にならい,流 量を 0.0023m³/sec,水路幅 0.4m,水路勾配 1/200,平均 粒径 *d* = 0.51mm とした.また,移動床の厚さを 0.03m

キーワード 交互砂州,3次元流れ解析モデル,平衡流砂モデル,形状特性 連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1-3 TEL075-383-3269



0.020 0.022 0.024 0.026 0.028 0.030 0.032 0.034 0.036 0.038 0.040



図-2 河床高コンター図の時間変化



とした. 計算に用いた格子幅は $\Delta x = 0.05$ m, $\Delta y = 0.02$ m, $\Delta z = 0.003$ m であり,格子数は主流方向に 120,横断方 向に 20,鉛直方向に 20 である.今回行った計算条件 は,交互砂州の発生領域に含まれる.

図-2 に河床高コンターを示す. 図より砂州が下流側 へ移動している様子が確認できる. 図-3 に 7200 s のと きの z=0.03m 断面での流速ベクトルを示す. 砂州が形 成している領域を避け,水が蛇行流となっていること が確認できる.実験での最深部を含む河床高横断分布, 及び図-2(b)において x = 2.3m から x=3.7m にかけて形 成している砂州の最深河床を含む断面(x=2.875m)での 河床高横断分布を図-4 に示す.

砂州の形状特性について比較する. 波長については, 図-2 から計算結果として 2.9m が得られた. 実験値は 3.0m であり,計算結果が概ね妥当な値であることが確 認できる. 砂州の波高については,図-4 から計算結果 として 0.027m が得られた. 実験値は 0.032m であり, 概ね一致する結果が得られた. 砂州の移動速度につい ては, $t=1800\sim4200$ s では 6.67×10⁴ m/s から 1.17×10⁻³ m/s までの値を示していたが, $t=4200\sim7200$ s では 5.00 ×10⁻⁴ m/s から 6.67×10⁻⁴ m/s の値を取り,概ね一定速



度となった.このことから *t*=4200 s 前後で砂州の形成 が概ね平衡状態に達したと考えられる.

4. おわりに

本研究は、河道内における砂州の挙動及び砂州形成 に伴って生じる流路変動を的確に予測できる数値解析 モデルの構築を最終的な目標とし、その第一段階とし て3次元流れ解析モデルと土砂輸送モデルを用いて直 線水路における砂州形成に関する数値解析を行い、モ デルの妥当性を検証したものである.砂州の形状特性 (砂州波長,波高)に関しては実験値と概ね一致する結 果が得られた.今後は砂州の移動速度についても実験 結果と比較するとともに、流路変動現象へモデルを適 用したい.

参考文献

- 1) 音田慎一郎,細田尚, JACIMOVIC Nenad,木村一郎:正面越流による堤防浸食過程の数値シミュレーション,土木学会論文集B1(水工学) Vol.69, No.4, pp.1207-1212, 2013.
- Kimura, I. and Hosoda, T.: A non-linear k-ε model with realizability for prediction of flows around bluff bodies, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.42, No. 8, pp.813-837, 2003.
- Kovacs, A. and Parker, G.: A new vectorial bedload formulation and its application to the time evolution of straight river channels, *Journal of fluid mechanics*, Vol.267, pp.153-183, 1994.
- 朝位孝二, 坪郷浩一:密度関数法による自由水表面 流れ解析のための体積補正法に関する研究, 土木学 会論文集 B, Vol.62, No.1, pp.122-127, 2006.
- 5) 三上敦史:部分的拡幅を有する開水路流れの砂州動 態に関する基礎的研究,京都大学,卒業論文,2013.