

急勾配湾曲水路における流れと河床・河道変動に関する数値解析

京都大学大学院 工学研究科 学生員 ○白井 秀和

京都大学 工学研究科 正会員 音田 慎一郎, 細田 尚

関西電力株式会社 電力技術研究所 有光 剛, 大江 一也

1. はじめに

本研究では急勾配湾曲水路における流れと河床・河道変動について検討し、急勾配での斜面崩壊を伴う流路変動を予測できる数値モデルの開発を研究の目的とする。

2. 基礎式¹⁾

流れの基礎式には、一般座標系における平面 2 次元モデルを用いる。なお、運動量方程式は ξ 方向のみ記載する。

[連続式]

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uh}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vh}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

[運動量方程式]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{UQ^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VQ^\xi}{J} \right) \\ & - \frac{M}{J} \left(U \frac{\partial \xi_x}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_x}{\partial \eta} \right) - \frac{N}{J} \left(U \frac{\partial \xi_y}{\partial \xi} + V \frac{\partial \xi_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x^2 + \xi_y^2}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_b^\xi}{\rho J} \\ & + \frac{\xi_x^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u^2}h) + \frac{\xi_x \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u^2}h) + \frac{\xi_y^2}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{v^2}h) \\ & + \frac{\xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{v^2}h) + \frac{\xi_x \eta_y + \xi_y \eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (-\overline{u'v'}) + \frac{2\xi_x \xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (-\overline{u'v'}) \end{aligned} \quad (2)$$

ここに t : 時間, (ξ, η) : 一般座標, (Q^ξ, Q^η) : 流量フラックスの反変成分, (U, V) : 流速ベクトルの反変成分, (M, N) : 流量フラックスの x, y 方向成分, h : 水深, g : 重力加速度, z_s : 基準面からの水位, ρ : 水の密度, $(\xi_x, \xi_y, \eta_x, \eta_y)$: 変換のメトリックス, J : 座標変換のヤコビアン, $(\tau_b^\xi, \tau_b^\eta)$: 底面せん断応力の反変成分, $-\overline{u'^2}, -\overline{u'v'}, -\overline{v'^2}$: x - y 座標系の水深平均レイノルズ応力である。

土砂輸送形態として掃流砂のみを考え、平衡流砂モデルと非平衡流砂モデルの 2 つの土砂輸送モデルを適用する。平衡流砂モデルでは流線方向に芦田・道上の式、流線と直角の方向に長谷川の式を適用する。

一方、非平衡流砂モデルでは、pick-up rate (p_s) の算定²⁾ に式(3)を用い、deposit rate (p_d) の計算には式(4)で表され

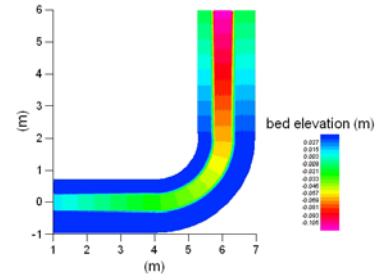


図1 初期河床高コンター図

る step length の確率密度関数に従って堆積するものとして計算を行っている。

$$p_s \sqrt{\frac{d}{(\sigma/\rho-1)g}} = F_0 G_* \tau_* \left(1 - \frac{k_2 \Omega \tau_{*c}}{\tau_*} \right)^m \quad (3)$$

$$G_* = \frac{\cos \psi + k_L \mu_s}{1 + k_L \mu_s}, \quad \Omega = \frac{\mu_s \cos \theta_n - \sin \theta_n \sin \phi}{\cos \psi + k_L \mu_s} \frac{1 + k_L \mu_s}{\mu_s}$$

$$p_{d(j,i)} = p_{s(j)} f_s(s_{(i)}) \Delta s \frac{A_{(j)}}{A_{(i)}}; f_s(s) = \frac{1}{\Lambda} \exp\left(-\frac{s}{\Lambda}\right) \quad (4)$$

ここに、 d : 砂の粒径, σ : 土粒子の密度, τ_* : 無次元掃流力, τ_{*c} : 無次元限界掃流力, ψ : 河床での流速と砂粒の移動方向のなす角, ϕ : 砂粒の移動方向と主流方向とのなす角, θ_n : 横断勾配角, k_L : 抗力と揚力の比, F_0, k_2, m : 定数, Δs : 砂粒の移動軌跡の計算ステップ幅, Λ : 平均 step length である。

さらに、河岸の崩落・堆積を考慮するため、あるセルとそれに隣接するセルにおいて斜面の角度が安息角を越えたとき、土砂を崩落させ、安息角以下になるまで崩落と堆積を繰り返すという簡易モデルを用いた。

数値解析手法には有限体積法を用い、変数はスタッガードスキームで配置する。移流項の離散化は QUICK-scheme を、時間積分には Adams-Bashforth 法を用いる。

3. 単一湾曲水路における河床・河道変動解析

モデルを単一湾曲水路の流れと河床・河道変動に関する既往の実験^{3,4)}に適用した。計算対象とする水路は、河床材料を一樣粒径(粒径 $d=0.18(\text{mm})$)の砂とし、曲率半径

キーワード 湾曲水路, 急勾配, 流路変動, 非平衡流砂モデル, 数値解析

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-3 号棟 TEL 075-383-3269

$r=2.0(m)$, 川幅 $b=0.5(m)$, 河床勾配 $1/80$, 法面勾配 40° の台形断面の単一湾曲水路である。境界条件には上流端で一定流量 $0.0085(m^3/s)$, 一定水位 $0.0215(m)$ を与えて、まず流れの計算のみを行い、流れが安定し定常状態になった状態を初期条件とし、そこから河床変動計算を始めた。

表 1 再現ケース

	水中安息角	流砂モデル
Cal-1	25°	平衡
Cal-2	20°	非平衡

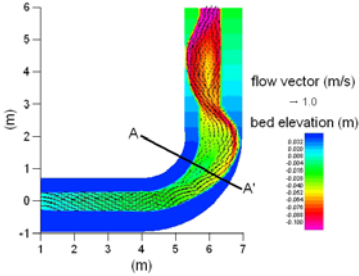


図 2 河床コンターと流速ベクトル図(Cal-1)

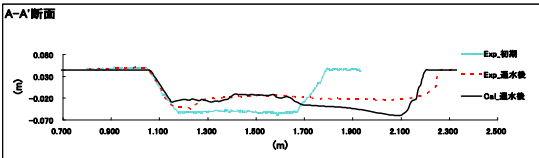


図 3 河床高横断面図(Cal-1)

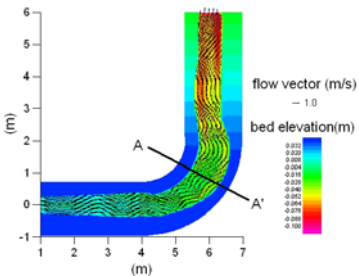


図 4 河床コンターと流速ベクトル図(Cal-2)

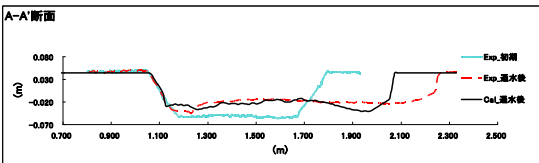


図 5 河床高横断面図(Cal-2)

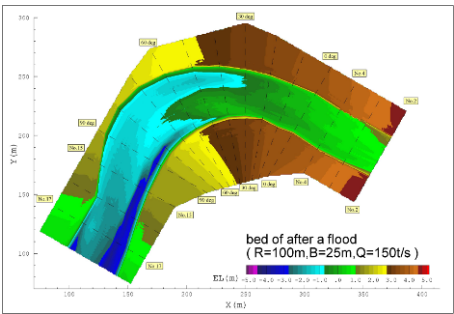


図 6 河床高コンター図 (実験結果)

図 2 から図 5 は Cal-1, Cal-2 における河床高コンター

図と流速ベクトル図, 及び湾曲部 70° での河床高断面図を示したものである。また, 図 6 は実験での通水後の河床コンター図である。図 2 を見ると, 河床が比較的に低くなっている水みちで流速が大きくなっていることがわかる。また, 水中安息角を調整することで, 図 3 のように各断面での侵食の位置は, 実験の結果とある程度近い結果となった。しかし, 湾曲部 70° 以降での河床形状が実験では内岸側で河床が低くなるのに対して Cal-1 での計算結果では外岸側で河床が低くなるという結果となった。一方で Cal-2 の結果である図 4, 図 5 を見れば, Cal-1 よりも側岸侵食が進まないが, 湾曲部 70° 以降で内岸側での河床が外岸に比べて低くなっており, 実験結果と同様な横断形状が得られた。これは非平衡流砂モデルの方が平衡流砂モデルよりも流砂の移動方向を適切にモデル化しているからではないかと考えられる。

4. まとめ

- 水中安息角, 水際安息角を調整することで平衡流砂モデルでもある程度流路変動を再現できることを示した。しかし, 間欠的な土砂の崩落を再現されず, 土砂の崩落モデルの高精度化が今後の課題である。
- 平衡流砂モデルよりも非平衡流砂モデルの方が流砂の移動方向をより正確に再現できていることがわかった。

参考文献

1) 長田信寿, 細田 尚, 村本嘉雄, Rahman, Md. Munsur: 河岸侵食過程における流砂の非平衡性を考慮した流路変動解析, 水工学論文集, 第 41 巻, pp.889-894, 1997.

2) 中川博次, 辻本哲郎, 村上正吾: 側岸における非平衡流砂過程, 第 29 回水理講演会論文集, pp.561-566, 1985.

3) Arimitsu, T., Kageyama, M., Deguchi, T., Fujita, I. and Moriyama, Y.: Experimental Study on Flow and Bank Erosion in Steep and Curved Trapezoidal Channels, Advances in Hydro-Science and Engineering, Proc. of the 8th Int. Conf. on Hydro-Science and Eng., (CDROM), 2008.

4) 有光 剛, 大江一也, 出口恭, 森山陽一, 藤田一郎: 急勾配河川湾曲部における流れと側岸侵食に関する実験的研究, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.775.-780. 2009.