

固定堰のある複断面蛇行流れと河床変動の数値解析

国土交通省

正会員 ○中須賀 淳

広島大学工学研究科

フェロ-会員 福岡 捷二

東京建設コンサルタント

正会員 三代 俊一

1. はじめに

固定堰のある河道では、堰上流での水位上昇や、堰下流での河岸の洗掘などの問題が懸念されている。これまでの著者らの実験により、固定堰が流れと河床変動に及ぼす影響を明らかにしている¹⁾。本研究では、固定堰のある河道の流れと河床形状を表すことの出来る数値解析モデルを構築し、実験結果と解析結果を比較し、モデルの妥当性を示す。

2. 流れの解析方法

固定堰の設置された河道の流れは、堰自体の影響だけでなく、その河道平面形、横断面形の影響を強く受ける。それらを解析に取り込むため座標系に直交曲線座標(s-n座標系)を選ぶ。基礎式には鉛直方向の流れの変化も考慮できるように、静水圧を仮定した平面多層モデルによる運動方程式(1)を用いた。これはレイノルズ方程式を図-1に示す層ごとに水深積分することにより求められ、連続式(2)とあわせて以下に示す。

$$\frac{\partial u_k h_k}{\partial t} + \frac{\partial u_k^2 h_k}{\partial s} + \frac{\partial u_k v_k h_k}{\partial n} + u_k(w_{k+1/2} - w_{k-1/2}) + 2 \frac{u_k v_k h_k}{r_s} + \frac{u_k^2 h_k - v_k^2 h_k}{r_n} = \frac{F_{sk}}{\rho} - g h_k \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial s}(\epsilon_k h_k \frac{\partial u_k}{\partial s}) + \frac{\partial}{\partial n}(\epsilon_k h_k \frac{\partial u_k}{\partial n}) + \frac{\tau_{sk+1/2} - \tau_{sk-1/2}}{\rho} \dots (1)$$

$$\frac{\partial u_k h_k}{\partial s} + \frac{\partial v_k h_k}{\partial n} + w_{k+1/2} - w_{k-1/2} + \frac{u_k h_k}{r_s} + \frac{v_k h_k}{r_n} = 0 \dots (2)$$

ここに、 u, v, s, n 方向流速、 h :層の水深、 w :層に対して直交する流速、 r_s, r_n :曲率、 F_s :流体力、 g :重力加速度、 H :水位、 ϵ :渦動粘性係数、 τ_s :鉛直方向境界せん断力を示す。添字 k は k 層ということを示す。渦動粘性係数は θ 方程式モデルを用い、層ごとに水深平均したものを用いた。

解析は、式(1)、(2)を差分方程式に変換し数値的に解くこととする。差分方法は、時間項には陽的に2次精度であるHuen法を用いる。複断面蛇行水路の流れ場において、流れの平面構造には移流現象が支配的であるため、移流項には3次精度の風上差分を、その他の項は1次精度の中央差分を用いる。しかし、堰周辺の急変部で3次精度の風上差分は適さないため、これらの区間では1次精度の風上差分を用いる。堰の影響は、堰に該当するメッシュの水路床高を堰の高さ分だけ嵩上げすることと、式(1)の流体力として式(3)の形で与えることにより解析に取り込まれる。

$$F_{weir} = \begin{pmatrix} F_s \\ F_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_D \\ C_L \end{pmatrix} A \frac{\rho u^2}{2} \dots (3)$$

3. 河床変動の解析方法

河床変動量は流砂の連続式と斜面の縦横断勾配が考慮された流砂量ベクトルにより求められる。流砂量は芦田・道上式を用いて求められる¹⁾。河床変動は底面付近の流れ場に依存することから、底面付近の流れを精度良く再現しなければならない。固定床水路の流れの解析は平面2次元解析が用いられたが、ここでは高水敷高さより上層を1層、下層を3層の計4層にわけた平面多層モデルを用いた解析を行う。

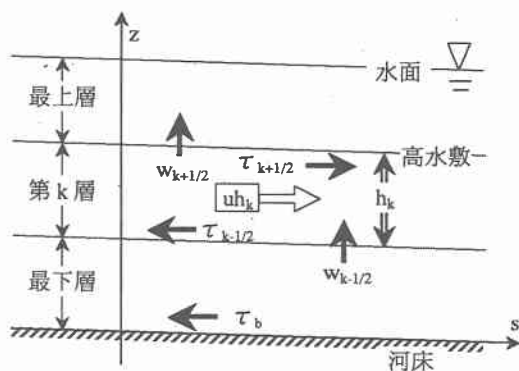


図-1 平面多層モデル

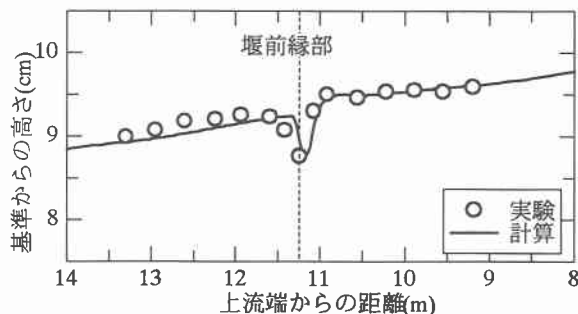


図-2 固定床複断面蛇行水路における縦断水位の解析結果と実験結果の比較

4. 実験結果と解析結果の比較

a) 流れ場

解析の対象は著者らにより行われた複断面蛇行水路に斜め堰が設置された固定床水路の流れ¹⁾である。解析は上流端で流量を、下流端で実験水位を与え、鉛直方向には層を分割しない平面2次元解析である。

解析結果と実験結果を示す。図-2は低水路中央における縦断水位の実験と解析の比較である。堰上下流で水位が一致していることがわかる。堰直上、下流で若干異なるが、これは堰周辺の3次元性の強い流れを表すことが出来なかったためである。図-3(a)は実験結果、(b)は解析結果の水深平均流速ベクトルである。堰直上、天端上、直下流を除いた部分では、低水路の最大流速は中央寄りを最短距離で直線的に流れている。堰天端上では、解析においても流れは堰軸に直交方向に曲げられている。堰直下流部での高水敷から低水路への流れ込みも表せている。

b) 河床形状

固定堰が設置された複断面蛇行水路の流れと河床変動は、その水路平面形、横断面形の影響を強く受ける¹⁾。このため堰がない場合の河道の特徴を再現できなければならない。そこで、著者らにより行われた石炭粉を用いた蛇行度1.04の複断面蛇行水路を用いた相対水深0.4の実験¹⁾(これをCal-1とする)と蛇行度1.10の複断面蛇行水路を用いた相対水深0.44の実験¹⁾(これをCal-2とする)を解析対象とする。

Cal-1の解析では、河床形状を表すことが出来なかった。これは、石炭粉は砂と比して水中比重が小さく、その流砂特性は流れ場に対して敏感であるため、このような石炭粉の流砂特性をうまく表すことができず、局所的に大きな河床変動が生じたためと考えられる。

低水路が砂からなるCal-2の実験結果と解析結果の通水9時間後の河床変動コンターを図-4(a)、(b)に示す。解析においても複断面的蛇行流れの特徴である蛇行内岸で洗掘が生じ、洗掘、堆積の位置は実験結果を説明している。しかし、その大きさは異なり、解析では過剰に洗掘が進行している。これは、静水圧分布を仮定しているため実際よりも蛇行外岸に流れが集中したためである。また、下層を3層で分けたのでは、洗掘が進行すると底面付近の流れを再現することが難しくなったことも一因と考えられる。

5. おわりに

- ・堰の影響を、水路床の嵩上げと外力の付加の形で平面二次元解析に取り込むことにより、堰のある河道の水位と流れをよく説明できる。
- ・河床変動解析モデルは、低水路が砂からなる複断面蛇行水路の河床変動の特徴を概ね表すことができ、堰のある流れの場に適用可能と考えられる。
- ・石炭粉の移動特性をうまく表すことができる河床変動の解析方法を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 三代俊一, 荒谷昌志, 中須賀淳, 岡田将治, 田中正敏: 堰の位置及び構造の違いによる堰上流, 下流の河道水理量の変化, 水工学論文集, 第45巻, pp.397-402, 2001.
- 2) 福岡捷二, 渡辺明英, 萱場祐一, 曾田英揮: ベーン工が断続的に配置された河道弯曲部の流れと河床形状, 土木学会論文集, No.479/II-25, pp.61-70, 1993.
- 3) 福岡捷二, 小俣篤, 加村大輔, 平生昭二, 岡田将治: 複断面蛇行河道における洪水流と河床変動, 土木学会論文集, No.621/II-47, pp.11-22, 1999.

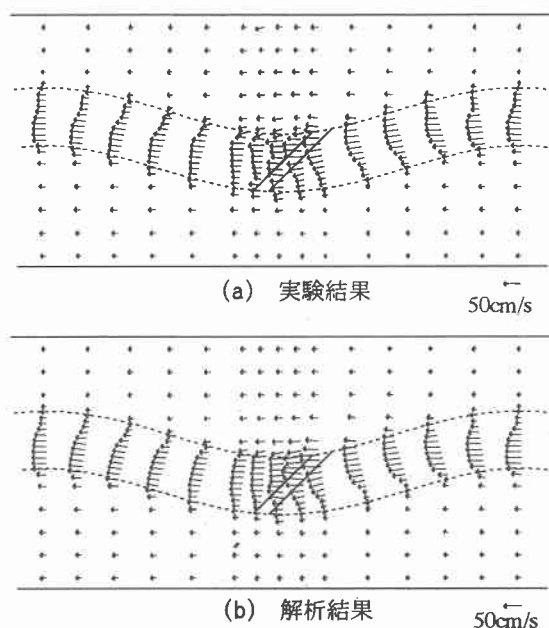


図-3 固定床複断面蛇行水路の水深平均流速ベクトル

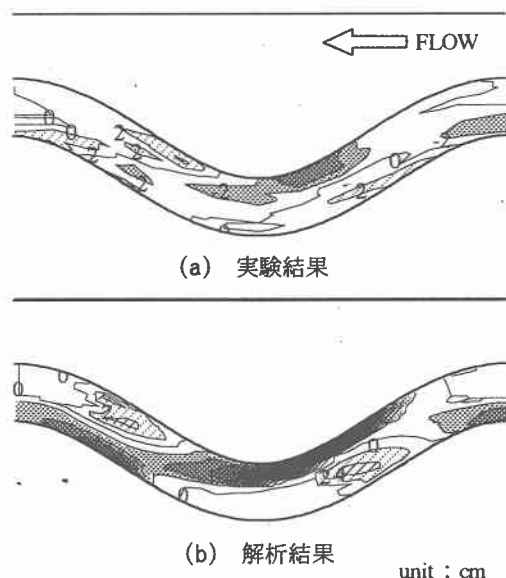


図-4 移動床複断面蛇行水路($s=1.10$)の河床変動コンター