

密度関数法による段落ち流れの数値計算

山口大学大学院 学○坪郷浩一

東亜建設工業株式会社 正 野村明弘

山口大学工学部 正 朝位孝二

1. 緒論

段落ち流れを検討する場合、模型実験や数値シミュレーションを用いる。特に、近年急速に発達した計算機による数値シミュレーションが有力な検討手法となっている。既往の研究としては、内田ら¹⁾が水理構造物を越流する水面形と流線の曲がりによって生じる圧力場の表現法を検討し、二次元水理構造物を越流する流れの数値解析モデルを構築している。また、梶川ら²⁾は、局所洗掘現象を解析するモデルの基本となる、常射流混在場における段落ち部の流況を再現できる鉛直二次元数値モデルを構築している。

本研究では、VOF法に代表される界面獲得法の一つである密度関数法³⁾を用いて開水路段落ち流れの再現シミュレーションについて検討を行う。

2. 解析手法

気液二相流の基礎方程式は、連続式、運動量方程式および密度の保存則から構成される。液相・気相ともに非圧縮性流体として取り扱う。したがって基礎式は次式で表せる。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla(\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) = \frac{1}{\rho} (\mathbf{F} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

ここで $\mathbf{u}$ は流速ベクトル、 p は圧力、 μ は粘性係数、 $\mathbf{F}$ は体積力である。

密度場は式(3)から直接求めるのではなく、密度関数 ϕ ($0 \leq \phi \leq 1$) の保存式を解くことで求める。 $\phi=0$ で気相、 $\phi=1$ で液相、 $\phi=0.5$ で気液界面を表す。密度関数 ϕ と密度および粘性係数の関係は式(4)で示す。

$$\begin{cases} \phi < 0.5 & \text{気相} & \rho_{i,j}^{n+1} = \rho_{air}, & \mu_{i,j}^{n+1} = \mu_{air} \\ \phi = 0.5 & \text{気液界面} & \rho_{i,j}^{n+1} = \frac{\rho_{water} + \rho_{air}}{2}, & \mu_{i,j}^{n+1} = \frac{\mu_{water} + \mu_{air}}{2} \\ \phi > 0.5 & \text{液相} & \rho_{i,j}^{n+1} = \rho_{water}, & \mu_{i,j}^{n+1} = \mu_{water} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 ρ_w は液相の密度、 ρ_a は気相の密度、 μ_w は

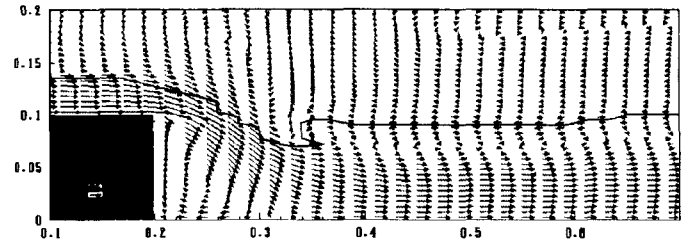


図-1 段落ち流れ(潜り噴流)のベクトル図

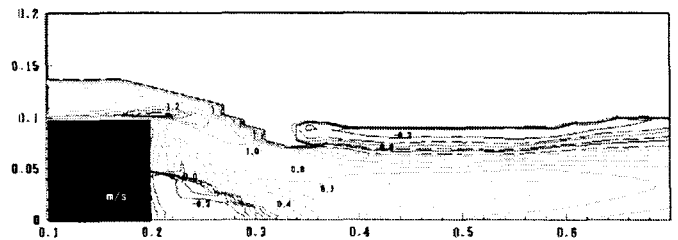


図-2 段落ち流れ(潜り噴流)の等値流速線図

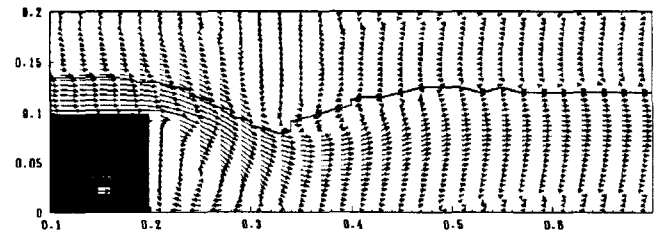


図-3 段落ち流れのベクトル図(下流端水深 12.5cm)

液相の粘性係数、 μ_a は気相の粘性係数である。

3. 開水路流れのシミュレーション

開水路流れの計算領域を 200×50 とし $\Delta x=0.02\text{m}$, $\Delta y=0.005\text{m}$, $\Delta t=0.0002\text{sec}$ で最終計算時間 60sec まで計算を行った。水路勾配 $I=1/300$ 、物性値は、移流項の検討に用いた値と同じである。左辺境界より単位幅流量 $q=0.04\text{m}^2/\text{s}$ を与えるが、 $t=10\text{sec}$ までは数値発散を避けるために、徐々に流入量増やすように設定している。右辺下流流出境界は、仮想の堰を配置し、水深を調節し、この堰を 4.5cm より 1cm ずつ上げて行き潜り噴流状態から波状跳水状態への移行の再現計算を行う。なお、運動方程式の移流項に3次精度

TVD-MUSCL scheme⁴⁾，密度関数の保存則の移流項に3次精度6-point scheme⁵⁾を用いて検討を行う。

図-1～図-6は，計算区間中の0.1～0.7m区間のベクトル図と等速度線図を示す．図中の太線は界面の位置を示している．図-1,2は末端堰4.5cm，下流水深が約11.0cmの状態を示しておりこのときには潜り噴流状態となっており，速い流れが底面に沿って流れ水面付近に逆流する流れが見られる。

図-3,4は下流水深約12.5cm時のベクトル図と等速度線図である．この水深条件下では，潜り噴流から波状跳水へと遷移している状態である．段落ち部より，流れが底面に向かうが，底面付近の遅い流れもしくは滞留している流れの影響を受け，流れは上方に流れが向いている．しかし，一部の底面に衝突する流れが底面の流れを挿流するため，波状跳水とはならず，また潜り噴流の状態でもない。

図-5,6下流水深約14.0cm下流堰7.5cmであり，このときは波状跳水状態を示している．速度の遅い流体の上部を通過していることがわかる．一般的に段落ち部の水位差が小さくなると波状跳水となり，逆に潜り噴流状態になることが知られどおり，本計算モデルでも計算可能であることがわかる．図-7は流出部の流出量と水深を示したものである．末端水深はほぼ一定となるが，流出量は概ね2割弱の誤差を有している。

上記の結果で段落ち上部の流れが早くなっているのは，固体部との境界をすべり有りで計算したためであると思われる．梶川ら²⁾が行った実験および数値計算の結果と比較すると，本計算は実際の現象を良好に再現できているといえる。

4. 結語

開水路モデルに関しては実際の現象を良好に再現できた．しかしながら，流出量は概ね2割弱の誤差があり改善を行う予定である．

参考文献

- 1) 内田龍彦，福岡捷二ら：二次元水理構造物を越流する流れの数値計算，水工学論文集，第47巻，pp817-822，2003．
- 2) 梶川勇樹，檜谷治ら：段落ち部における常射流混在流れの数値計算，水工学論文集，第47

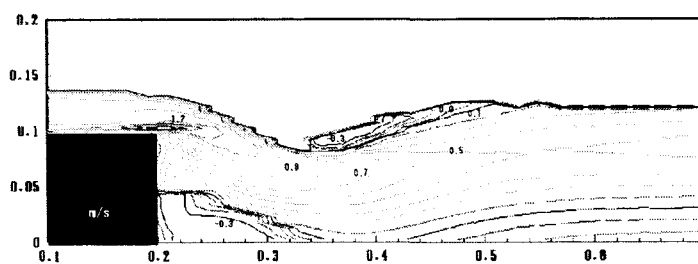


図-4 段落ち流れの等値流速線図(下流端水深12.5cm)

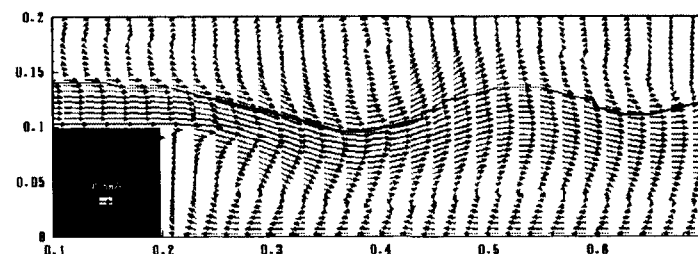


図-5 段落ち流れ(波状跳水)のベクトル図

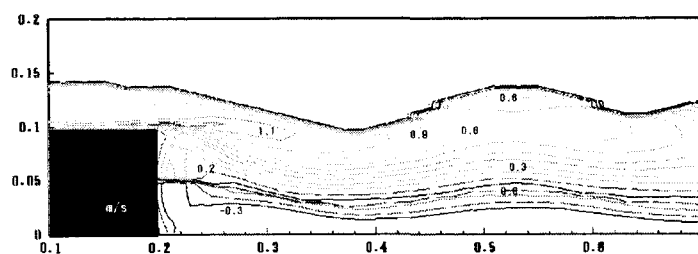


図-6 段落ち流れの(波状跳水)の等値流速線図

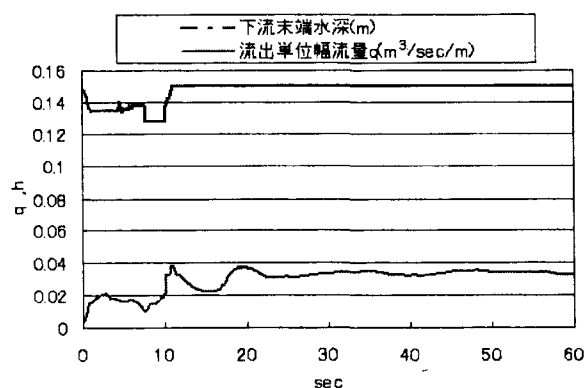


図-7 末端堰7.5cm時の流出部流量と水深の時系列変化

巻，pp823-828，2003．

- 3) 川崎浩司，中辻啓二：気液相・固気液相流動場の数値実験に関する研究，水工学論文集，第46巻，pp1049-1054，2002．
- 4) 藤井孝蔵：流体力学の数値計算法，東京大学出版会，pp.72-76，1994．
- 5) 朝位孝二ら：3次精度6-point schemeの開発，土木学会第59回年次講演会，2004(投稿中)．