

VOF 法による水理構造物周辺流れの数値解析に関する研究

(株) ニュージェック 正会員 尾上 博則
岡山大学大学院 学生員 宮内 洋介
岡山大学環境理工学部 正会員 前野 詩朗

1. はじめに

河川にはダムや堰だけでなく、様々な水理構造物が設置されている。これら水理構造物周辺の流れは自由表面を含んだ大変複雑な流況を呈しているため、その水理機能を詳細に知るためには水理実験を行う必要がある。しかし、実際には費用や時間の制約により、経験的な判断により水理構造物が設置されることが多く、必ずしも水理学的にみて問題がないと言えるものばかりではない。したがって、これら水理構造物周辺の流れを得る手段を構築することは工学上重要な課題である。そこで、本研究では、自由表面の形状を最もよく再現しうるとされている VOF 法を用いた鉛直 2 次元数値解析を用いて、水理構造物周辺の複雑な流況を精度良く再現可能な解析モデルを確立することを目的として、VOF 関数 F の取り扱い、移流項の差分スキームや乱流モデルの導入に関する検討を行うものである。

2. 数値解析の概要

本研究で用いる 2 次元非圧縮性流体の基礎式は、運動方程式、連続式および VOF 関数 F の移流方程式である。また、 k - ε 乱流モデルを導入した際には、 k -方程式および ε -方程式を含めるものとする。これらの基礎式を右に示す。 x, y は水平、垂直座標、 u, v は x, y 方向の流速成分 g_x, g_y は重力加速度、 ν は動粘性係数、 ρ は流体密度、 k は乱流エネルギー、 ε は乱流エネルギー散逸率である。また、自由表面を有する流れの解析に最も重要な自由表面形状の表現方法として VOF 法を用いている。VOF 法では、流体の存在比率を VOF 関数 F として表し、自由表面形状を F の値と、差分セル内での自由表面の向きによって表現するものである。また、数値解析法としては、圧力 P および VOF 関数 F などのスカラー量をセルの中央で、流速ベクトルをセル界面で定義するスタッガード格子における有限差分法を用いている。運動方程式、 k および ε 方程式の移流項には、一次風上差分を用い、粘性項には二次中心差分を用いている。なお、運動方程式の移流項には、一次風上差分の他に、二次中央差分および QUICK 法を用いて数値計算を行った。また、圧力は SMAC 法を用いて時間積分を行う収束計算で求めている。VOF 関数 F の移流方程式には、セル境界からの流出入量をセルの種類や向きなどを考慮して定めるドナー・アクセプタ法と呼ばれる移流方法を用いている。

《運動方程式》

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g_x + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right]$$
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + g_y + \nu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right]$$

《連続式》

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

《 F の移流方程式》

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} = 0$$

《 k -方程式》

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \left[\frac{\partial k}{\partial x} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \left[\frac{\partial k}{\partial y} \right] \right) + G_k - \varepsilon$$

《 ε -方程式》

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}$$

3. 解析条件

図 1 は解析対象モデルを示している。メッシュ間隔を 1cm とした解析領域内に幅 2cm、高さ 20cm の平板隔壁を障害物として設置した。初期条件は図 1 に示すように、水を満たしておき解析領域全体の流速を 0 としている。上流端からは実験によって得られた流量を一定に与えた。下流端は一定圧力条件とし、壁面にはノンスリップ条件

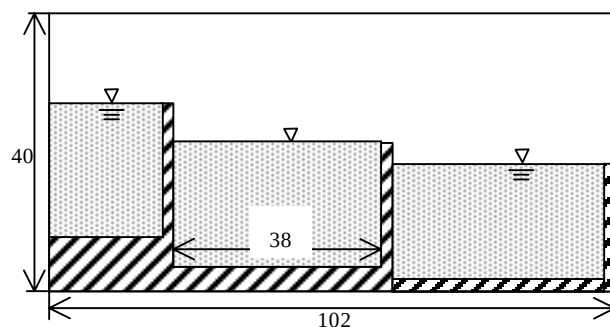


図 1 2次元解析対象モデル

キーワード：数値解析，自由表面，VOF 法

連絡先：〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1 TEL086-251-8151 FAX086-251-8257

を採用している。また、連続するプールタイプ魚道の1つを取り上げ、その解析領域の上下流端に周期境界条件を適用し、連続するプール内の流況解析についても行った。

4. 解析結果の考察

まず、従来のVOF関数 F の決定アルゴリズムに補正処理を加えて数値解析を行った結果、実験値に対する数値解の再現性が良くなったことから、VOF関数 F の補正処理は、本解析法の精度を高める有効な手段であることがわかった。

次に、運動方程式における移流項の差分スキームの適否を検討してみると、自由水面形状に関しては、すべてのケースにおいて実験値をほぼ再現することができた。流況については、一次風上差分のみを用いて数値解析を行うと、流速が実験値に比べてやや少なく、プール内の渦があまりはっきり再現できなかったが、流量の増減に関わらず、かなり安定した流況を得ることができた。また、二次中央差分およびQUICK法を用いると、流量が少ない場合については、プール内の流況をより現実近く再現することができた。しかし、流量が多くなると、一次風上差分の解析結果に比べて激しい渦が発生し、かなり乱れた流況となり定常状態には至らなかった。そこで、乱流場に適応させるために渦動粘性係数の代わりに標準型 $k-\varepsilon$ 乱流モデルを導入すると、定常状態になるのは難しいと考えていた二次中央差分およびQUICK法を用いた解析手法についても、ある程度、安定した数値解を得ることができた。

図2は、流量が多い場合における実験値の流況分布と、移流項にQUICK法を用いた場合の解析値の流況分布を比較したものである。これらの図を見ると、下流側のプール内の流況は実験値をよく再現できているが、上流側のプールでは、表面流となっており、実験値のような落下流を再現することはできなかった。これは、数値解析では、上流端に一定流入流速を与えているが、実際には、鉛直方向に対して、一定ではないことが影響しているのではないかと考えられる。

図3は標準型 $k-\varepsilon$ モデルを導入した上で、移流項の差分スキームにQUICK法を用いて数値解析を行った連続するプール内の流況分布と実験値を比較したものである。これらの図を見ると、実験値の流速よりも若干、解析値の流速が小さいが、プール内の流況については、流量の増減に関わらず非常によく再現できていると言える。

5. おわりに

以上の結果から、現時点では、標準型 $k-\varepsilon$ モデルを導入することによって、数値解の安定性が増加したことから、本研究で用いた差分スキームの中では、風上側に加え、風下側の流速の影響も考慮することのできるQUICK法を用いた数値解析法が、より現実に近い流況を再現することができるのではないかと考えられる。

今後の課題としては、VOF関数 F の決定アルゴリズムにより精度の高い補正処理を加える。また、移流項の差分スキームおよび $k-\varepsilon$ 乱流モデルに関しては、壁面境界や自由表面境界条件だけでなく差分スキームおよび乱流モデルの適用範囲条件を再検討する必要がある。

〈参考文献〉1)富士総合研究所編：凡用流体解析システム—FUJI-RIC/ α -FLOW—

2)磯部雅彦：数値波動水路の開発に関する研究，海岸工学論文集第46集，pp.36-40，1999。

