

II-170

水制工による急縮流の数値計算に関する研究

岐阜大学 正員 中谷 剛

岐阜大学 学生員 ○増田 尚弥

1. 研究目的 実河川において、橋脚、水制工、岩などの流れに対する遮蔽物の下流には再循環流(死水域)が形成される。流量、遮蔽物の大きさによっては、流れが急縮され死水域の影響で局所的に主流部の流速が増し、射流域を伴う複雑な流れが生じることもある。そこで本研究では、死水域を伴う流れとして水制工周辺の流れを考え、水制工によって生じる死水域と主流部に生じる射流域を再現する計算法を開発すると共に、死水域が射流域に与える影響を、実験と計算から検討したものである。

2. 実験方法 全長(L)15(m)、幅(B)0.47(m)、勾配1/1000、Maninngの粗度係数0.01の木製水路を用いて上流から2.02(1/s)の流量を流して実験を行った。長さ0.10(m)、幅0.01(m)の亚克力板を非越流型水制工として上流から7.5(m)の位置に流れ方向に直角に一基設置した。測定は水路横断方向に0.02(m)刻みに24点、水路幅(B)を基準に縦断方向に12測線とし、平均流速を超小型正逆プロペラ流速計、水深をサーボ式水位計を用い、10Hzで30秒サンプリングをして測定した。

3. 数値計算法 流れを再現する支配方程式として、式(1)~(3)で表される2次元浅水流方程式を用いた。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(u^2 h + \frac{1}{2} g h^2 + g h z \right) + \frac{\partial uvh}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial uh}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial uh}{\partial y} \right) - \frac{n^2 g u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial uvh}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(v^2 h + \frac{1}{2} g h^2 + g h z \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial vh}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial vh}{\partial y} \right) - \frac{n^2 g v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + \frac{\partial u \kappa}{\partial x} + \frac{\partial v \kappa}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial y} \right) + G + P_{\kappa\omega} - \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial v \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + C_1 \varepsilon G / \kappa + P_{\varepsilon\omega} - C_2 \varepsilon^2 / \kappa \quad (5)$$

$$\nu_t = C_\mu \kappa^2 / \varepsilon, \quad G = \nu_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right]$$

$$P_{\kappa\omega} = C_\mu u^2 / h, \quad C_\mu = 1 / \sqrt{C_r}, \quad P_{\varepsilon\omega} = C_\mu u^4 / h^2, \quad C_\varepsilon = 3.6 C_\mu \sqrt{C_r} / C_\mu^2, \quad u_* = [C_r (u^2 + v^2)]^{1/2}$$

ここで、z:河床高、h:水深、u:x方向流速、v:y方向流速、g:重力加速度、n:粗度係数、 ν_t :渦動粘性係数、 κ :乱流エネルギー、 ε :エネルギー逸散率

常、射流の混在した流れを計算する方法としてMacCormackスキームが知られているが、跳水のように水理学的に不連続な点で数値振動が生じる。そこで、浅水流方程式((1),(2),(3)式)の差分には、不連続点前後に発生する数値振動を制御するためにTVD¹⁾形式のMacCormackスキームを用いた。時間分割法によりプログラムなどの簡略化を行った。ここで、時間分割の演算子の組み合わせは、 $L_x(1/2\Delta t) L_y(\Delta t) L_x(1/2\Delta t)$ である。

乱流モデルとして(4),(5)式で表される水深平均 $\kappa - \varepsilon$ モデル²⁾と0方程式モデルによって渦動粘性係数を求め、そして他のケースとして渦動粘性係数に一定値($\nu_t = 0.00001 \text{ m}^2/\text{s}$)を与える計3種類の方法で計算を行った。 $\kappa - \varepsilon$ モデルの輸送方程式中にみられる定数は次に示すものを用いた。

$$C_\mu = 0.09, \quad C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad \sigma_\kappa = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

初期条件に等流水深、ポテンシャル流を与え、水路側壁、水制工の壁面の流速、乱流エネルギー、エネルギー

ギー逸散率に壁関数を用い、下流端は限界水深となるよう条件を与えた。

4. 結果と考察 図1, 図2に流下方向流速とFroude数分布の等高線図を示す。x軸は水制工設置位置を $x=0$ とし、下流側を正とした。y軸の値, x軸の値は水路幅 B で無次元化し、流速分布は平均流速($\bar{u}=0.23$ m/s)で無次元化した。

死水域の範囲を流下方向流速が0($u=0$)の範囲と定義すると、図1-(1)から実験の死水域の長さは3.0である。流速分布の最大値は1.80であり、水制工から1.0下流の位置に生じている。Froude数分布(図2-(1))では水制工から1.0下流の位置に最大値1.20が生じた。

図1-(2)~(4)から計算される死水域のサイズは、0方程式モデルが最も長く、次に渦動粘性係数一定、 $\kappa-\epsilon$ モデルは最も小さく実験値の60~70%の再現率であった。0方程式は最大流速1.80の値を再現している。図2-(2)(3)(4)から射流域を再現できたのは、0方程式モデル、渦動粘性係数一定のケースであったが、前者はFroude数の最大値は1.1、後者は1.0であり、実験値と比較して両者とも小さい。しかし、両者ともに発生位置に関しては、実験値と同様に水制工から下流1.0の位置で現れ良好に再現できた。

以上から、0方程式モデルによる計算法で射流域の位置を捉えることができた。射流域の再現性については、0方程式モデルが対数則に従う流れに用いるものであるため、死水域内部の流況の再現性に問題があると思われる。また乱流モデルである標準 $\kappa-\epsilon$ モデルの場合、死水域が短いため射流域が存在しない流れとなった。つまり、射流域は死水域の長さばかりでなく内部流況にも影響を受ける。射流域を精度良く再現するためには、剥離した流れでも再現できる乱流モデルが必要である。

参考文献 1) SWEETBY, R. K. (1984), "High Resolution Finite Volume Schemes and Computational Aerodynamics, Nonlinear Hyperbolic Equation-Theory", Computation Methods, and Applications, Notes on Numerical Fluid Mechanics, Vol. 24, p. 63-74, 2) A. K. RASTOGI and W. RODI (1978), "Predictions of Heat and Mass Transfer in Open Channels", Journal of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 104, No. HY3, pp. 397-420

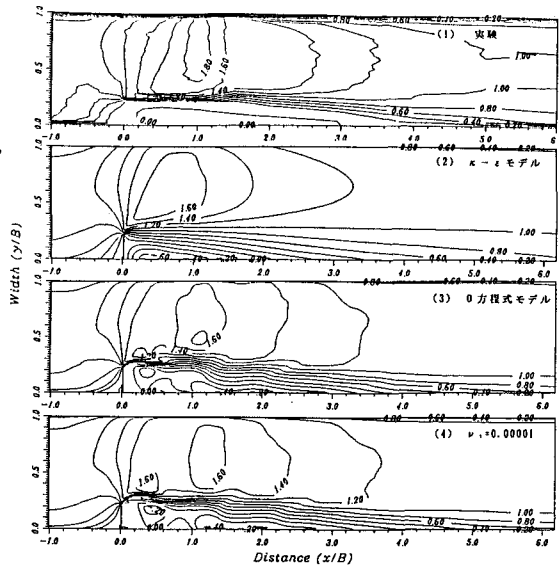


図1 流下方向流速分布図

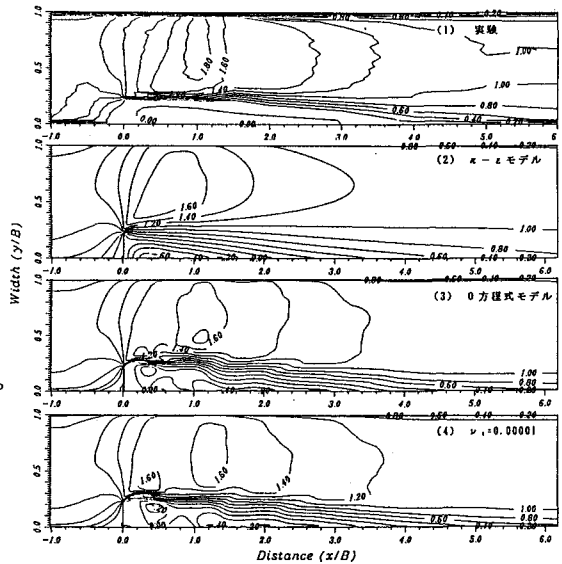


図2 Froude数分布図