

開水路の並列らせん流を制御する工夫とその数値計算

金沢大学工学部 正 員 辻本 哲郎
金沢大学工学部 ○松尾 和弘

1. まえがき 近年、河川や都市内水路に様々な機能が求められ、流水の高度な制御が必要になってきている。著者ら¹⁾はこれに鑑み斜めに配置された棧粗度によって並列ら旋流を誘起させる工夫を提案し、水路実験や簡単な水理解析を行なっている。一方、吉川、大同らは斜め棧の側岸への配置で湾曲部の深掘れ対策を提案している^{2), 3)}。このような流れを解析するのに、今回2方程式乱流モデルを適用した流れの数値解析を実施し、開水路で様々な機能を発揮するら旋流の制御を工夫するための手段とする。

2. 基本的な考え方 流れの中に適当な密度（高さ・間隔比）で棧などを配置して均質な乱流場を造るとき、棧の角度によって抗力を偏向させることによりその反力を2次流の駆動力とする。この原理は著者らの簡単な水理モデルで表現され、また水路実験で旋流の出現が確認されている。本研究では壁面から棧粗度の頂部までの層を空間平均された均質な「粗度層」と考え、この層の中では抗力の反力を水流の運動方程式の外力項に加える。こうした考え方は著者ら^{4), 5)}が植生層を伴う流れの解析に用いている。ここでは抗力の偏向を取り込み、また断面内2次流解析を行なうので応力代数モデルを用いた植生層を伴う流れの解析⁵⁾の方法をベースとした。

3. 数値計算 流下方向流れが卓越するとして基礎式に放物形流れの近似を施すと、支配方程式群は次のようである（連続式を除く）。

$$\frac{\partial}{\partial x}(U^2) + \frac{\partial}{\partial y}(VU - \Gamma \frac{\partial U}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(WU - \Gamma \frac{\partial U}{\partial z}) = g \sin \theta - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\rho} \right) - F_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(UV) + \frac{\partial}{\partial y} \left(V^2 - v \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(WV - v \frac{\partial V}{\partial z} \right) = g \cos \theta - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{P'}{\rho} \right) - F_y + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\tau_{yy}}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\tau_{yz}}{\rho} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(UW) + \frac{\partial}{\partial y} \left(VW - v \frac{\partial W}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(W^2 - v \frac{\partial W}{\partial z} \right) = - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{P'}{\rho} \right) - F_z + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\tau_{yz}}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\tau_{zz}}{\rho} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(Uk) + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ Vk - \left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ Wk - \left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right\} = P_k + C_{fk} (F_x U + F_y V + F_z W) - \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(U\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ V\varepsilon - \left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ W\varepsilon - \left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right\} = \frac{\varepsilon}{k} \left[C_{\varepsilon 1} \{ P_k + C_{fk} (F_x U + F_y V + F_z W) \} - C_{\varepsilon 2} \varepsilon \right] \quad (5)$$

ここに、 (U, V, W) ：時間平均の流下方向(x)、鉛直方向(y)、横断方向(z)の流速成分、 P, P' ：断面平均圧力（静水圧近似）とそれからの圧力偏差、 ρ ：水の密度、 g ：重力加速度、 k ：乱れエネルギー、 ε ：乱れエネルギーの散逸率、 ν ：動粘性係数、 $\nu_t = C_{\mu} k^2 / \varepsilon$ ：渦動粘性係数、 $\Gamma = \nu + \nu_t$ 、 P_k ：乱れエネルギーの生成率である。水の単位体積当たりの棧の抗力のx, y, z方向成分(F_x, F_y, F_z)は、路床におかれた主流方向と角度 θ をもって間隔 s で位置された棧粗度の場合、次のように与えられる（ $F_z=0$ ）。

$$F_x = \frac{1}{2} C_D \rho (U^2 + V^2 + W^2) \frac{1}{s} \sin \theta \quad ; \quad F_y = \frac{1}{2} C_D \rho (U^2 + V^2 + W^2) \frac{1}{s} \cos \theta \quad (6)$$

また、せん断応力は次のように速度勾配と関係づける。

$$\frac{\tau_{xy}}{\rho} = \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad ; \quad \frac{\tau_{xz}}{\rho} = \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \quad ; \quad \frac{\tau_{yz}}{\rho} = \nu_t \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\tau_{yy}}{\rho} = -\frac{2}{3} k \quad ; \quad \frac{\tau_{zz}}{\rho} = -\frac{2}{3} k \quad (8)$$

乱流モデルにおける定数は次の標準値を用いた。 $C_{\mu}=0.09$, $C_{\varepsilon 1}=1.44$, $C_{\varepsilon 2}=1.92$, $\sigma_k=0.9$, $\sigma_{\varepsilon}=1.3$ 。

4. 計算結果と実験結果との比較 ここでは著者らの水路実験と比較する形で計算結果を示す。実験は金沢市金

浦用水（浅野川水系）のコンクリート矩形断面直線区間（幅1.5m, 直線区間約30m）で行なわれた¹⁾。棧粗度としては1辺6cmの正方形断面モルタル製角材を用いた。水深40cm, 平均流速60cm/s程度の水利条件で、通常の棧配置のほか、斜め配置、V型・Λ型配置などで設置して小型電磁流速計による流速測定が行なわれたが、ここでは、棧と流向のなす角 θ が 60° で、棧間隔は110cmの例（Run S-2）について実験結果と計算結果の比較を示す。

図1は主流の流速分布、図2は横断方向流速の分布、図3は主流方向・横断方向のReynolds応力の水深方向分布で、図1, 2に示した流速分布を規定するもので、著者らの先の論文¹⁾の水理解析の基礎となっているものである。図4には2次流成分をベクトル表示した。

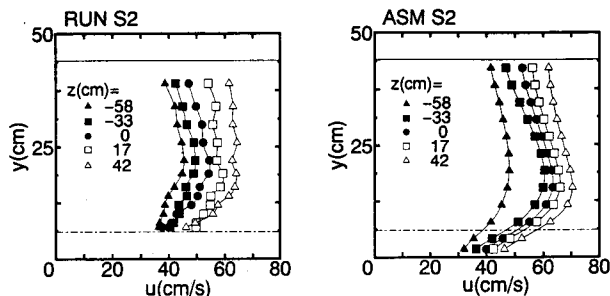


図1 主流方向の流速分布 ($U(y)$) についての実験結果と計算結果の比較

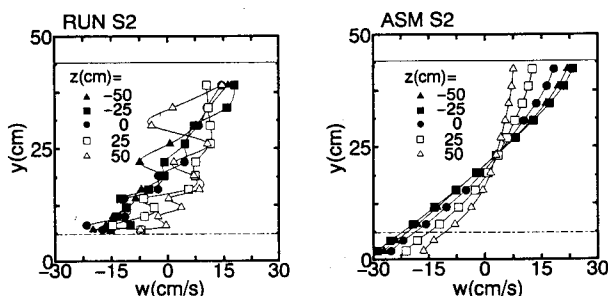


図2 横断方向流速の分布 ($W(y)$) の実験結果と計算結果の比較

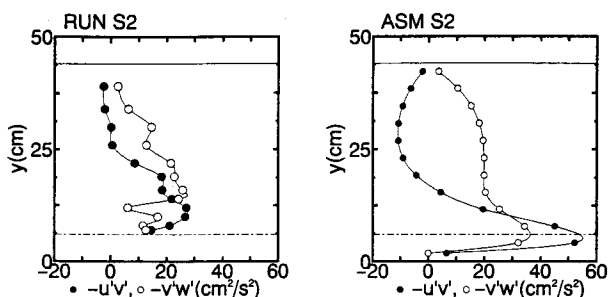


図3 Reynolds応力分布 ($-\overline{uv}$, $-\overline{uw}$) の実験結果と計算結果の比較

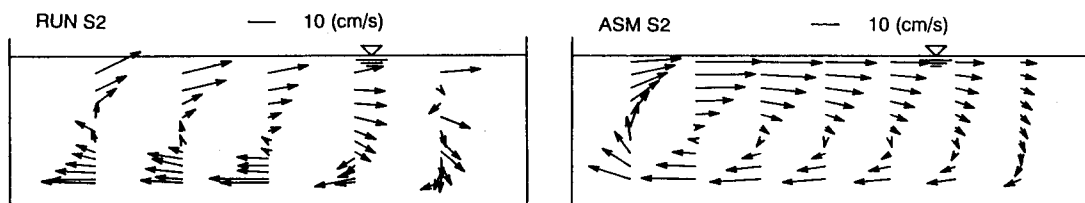


図4 断面内2次流の実験結果と計算結果の比較

5. あとがき 本文では斜め棧粗度の上の流れについての例を示したが、V型・Λ型配置の棧粗度の場合や、側面に斜めに配置した棧粗度による旋流なども同様に計算され、いずれも従来の実験結果との対応は良好である。

参考文献： 1) 辻本・宮垣・森田：棧粗度の斜め配置による開水路流れの制御，水工学論文集，36，1992。 2) 仲村・高松・福井・吉川：河川護岸の設計に関する基礎的研究，水工学論文集，37，1993。 3) 太田・小沢：護岸粗度の制御による局所洗掘の防止，水工学論文集，37，1993。 4) 清水・辻本・中川：直立性植生層を伴う流れ場の数値計算に関する研究，土木学会論文集，447/II-19，1992。 5) 清水・辻本・中川：水路横断面内に植生帯を伴う流れ場数値解析，水工学論文集，36，1992。 6) Launder, B.E. and Ying, W.M.: The prediction of flow and heat transfer in ducts of square cross-section, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, Vol.187, 1973。