

底面や側岸への斜め棧粗度の配置による開水路流れの制御

金沢大学工学部 正員 辻本 哲郎
金沢大学工学部 ○丹羽 要樹

1. まえがき

河川整備が治水・利水・環境機能のいずれも等しく向上させるべきとの考え方が浸透してきた中で、さらにこれらの機能が多岐にわたっていることに鑑みると、流れの制御は複雑化かつデリケート化して来ると考えられる。こうした背景で、2次流を制御して好ましい流れの状況を得るという試みは魅力的である。著者ら¹⁾は、水路床に斜め棧を配置して2次流を誘起することで主として流れによる浮遊物の輸送形態を制御することを提案したし、吉川ら²⁾や大同ら³⁾は斜め棧を側岸に配置して螺旋流を誘起、河床変動制御を指向している。こうした2次流の生起は棧に作用する抗力が流れが当たる面に直角（摩擦を無視したとき）であることから、異なる方向成分を持つことになり、この反力が2次流の駆動力となっていることによる。著者ら⁴⁾は、斜め棧が適度に配置され、棧と棧の間での流れが流下方向に近似的に均質に保たれているとき（当然棧の周辺では局所流的性質が強いが、棧と棧の間の区間平均流的性質がその流れを代表していると考えられるとき）について、棧を空間的に平均して散在する運動量吸い込みと乱れエネルギーの生成源とした数値解析を提案し、底面に斜め棧を配置した場合の螺旋流形成が的確に記述され予測できることを示した。ここでは、モデルを一般化して流れに対して様々な方向に面をもつ棧（抵抗要素）を持つ流れの解析を行い、その多機能水路の設計等への有効性を検討する。

2. 斜め棧をもつ流れの数値解析

流下方向流れが卓越するとして放物形流れの近似を施した流れの基礎式は次のようである（連続式は省略）。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(U^2) + \frac{\partial}{\partial y}\left\{VU - (v + v_t)\frac{\partial U}{\partial y}\right\} + \frac{\partial}{\partial z}\left\{WU - (v + v_t)\frac{\partial U}{\partial z}\right\} &= g \sin \theta - \frac{d}{dx}\left(\frac{P}{\rho}\right) - \frac{D_x}{\rho s K} \\ \frac{\partial}{\partial x}(UV) + \frac{\partial}{\partial y}\left\{V^2 - v\frac{\partial V}{\partial y}\right\} + \frac{\partial}{\partial z}\left\{WV - v\frac{\partial V}{\partial z}\right\} &= -g \cos \theta - \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{P''}{\rho}\right) - \frac{D_y}{\rho s K} + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\tau_{yy}}{\rho}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\tau_{yz}}{\rho}\right) \\ \frac{\partial}{\partial x}(UW) + \frac{\partial}{\partial y}\left\{VW - v\frac{\partial W}{\partial y}\right\} + \frac{\partial}{\partial z}\left\{W^2 - v\frac{\partial W}{\partial z}\right\} &= -\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{P''}{\rho}\right) - \frac{D_z}{\rho s K} + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\tau_{yz}}{\rho}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\tau_{zz}}{\rho}\right) \\ \frac{\partial}{\partial x}(Uk) + \frac{\partial}{\partial y}\left\{Vk - \left(v + \frac{v_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial y}\right\} + \frac{\partial}{\partial z}\left\{Wk - \left(v + \frac{v_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial z}\right\} &= P_k + C_{fk}\left(\frac{D_x U + D_y V + D_z W}{\rho s K}\right) - \varepsilon \\ \frac{\partial}{\partial x}(U\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial y}\left\{V\varepsilon - \left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right\} + \frac{\partial}{\partial z}\left\{W\varepsilon - \left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right\} &= \frac{\varepsilon}{k}\left[C_1\left\{P_k + C_{fk}\left(\frac{D_x U + D_y V + D_z W}{\rho s K}\right)\right\} - C_2\varepsilon\right] \end{aligned}$$

ここにおいて、 (U, V, W) : 時間平均の流下 (x) 、鉛直 (y) 、横断 (z) 方向の流速成分、 P, P'' : 断面平均圧力（静水圧近似）とそれからの偏差、 g : 重力加速度、 ν : 動粘性係数、 ν_t : 渦動粘性係数（ $\nu_t = C_\mu k^2/\varepsilon$ ）、 D_x, D_y, D_z : 棧に作用する抗力の x, y, z 方向成分、 s, K : 棧の間隔及び高さ、 k : 乱れエネルギー、 ε : 乱れエネルギーの散逸率、 P_k : 速度勾配に起因する乱れエネルギーの生成率、 $C_1, C_2, C_{fk}, C_{fe}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$: 数値パラメータ、 τ_{ij} : Reynolds応力の各成分である。

抗力 D_x, D_y, D_z は抗力係数 C_D を用いて次のように書ける。

$$D_x = \frac{K}{2} C_D \rho \bar{U} \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \sin \theta \sin \varphi; \quad D_y = \frac{K}{2} C_D \rho \bar{U} \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \cos \varphi; \quad D_z = \frac{K}{2} C_D \rho \bar{U} \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \cos \theta$$

ただし、 $\bar{U} \equiv U \sin \theta \sin \varphi + V \cos \varphi + W \cos \theta$ 、 θ : 棧前面と水路床面の交線が x 軸となす角度で水路軸に直交する場合が $\theta=90^\circ$ であり、 φ : 棧の前面と水路床面のなす角度で棧前面が水路床と直交するとき $\varphi=90^\circ$ とする。底面に配置された矩形断面の斜め棧では $\varphi=90^\circ$ であり（ $D_y=0$ ）、側岸に配置された矩形断面の斜め棧では $\theta=90^\circ$ である（ $D_z=0$ ）。

Reynolds応力は平均流特性と次のように結び付ける。

$$\frac{\tau_{xy}}{\rho} = \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right); \quad \frac{\tau_{xz}}{\rho} = \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right); \quad \frac{\tau_{yz}}{\rho} = \nu_t \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right); \quad \frac{\tau_{yy}}{\rho} = -\frac{2k}{3}; \quad \frac{\tau_{zz}}{\rho} = -\frac{2k}{3}$$

支配方程式はstaggered格子で離散化し、SIMPLEアルゴリズムによって解く。壁面での境界条件は流速について壁関数を用い、乱れエネルギーについて局所平衡が成立するとした。棧の抵抗力に関連させて導入した付加項に関わるパラメータ C_{fk}, C_{fe} 以外の数値定数には標準モデルでの推奨値を用い、 C_{fk}, C_{fe} は、植生層を伴う流れについての数値計算⁵⁾と水路実験の比較から $C_{fk}=1.0, C_{fe}=1.3$ と定めた。

3. 底面または側岸に斜め棧をもつ流れ

底面に斜め棧をもつ流れ ($\theta=60^\circ, \varphi=90^\circ$; $s=10\text{cm}, K=2\text{cm}, h=10\text{cm}, B=40\text{cm}$; h : 水深, B : 水路幅) と片側側岸に斜め棧 ($\theta=90^\circ, \varphi=\pm 60^\circ$; $s=10\text{cm}, K=2\text{cm}, h=10\text{cm}, B=40\text{cm}$) を持つ流れについて計算を行なった (前者については前報で計算結果と実験結果がよく一致することを示している). 結果を主流速のコンターと2次流のベクトル表示を併せて示した (図1) が, 路床斜め棧による旋流は明確で水路全体にわたって制御できるが, 側岸斜め棧では旋流が側岸周辺水深スケール程度の領域に限られる.

4. デニール型魚道への適用

デニール式魚道 (図2参照⁶⁾) を始めストリーム型とよばれる魚道は阻流板が巧みに配置され, それに起因される旋流を利用して流速分布を変化させ, 魚の通行に配慮したものといえ, 阻流板を斜め棧と見做すと上記と同じ原理の流れの制御によって流路に機能を与えるものと言える. デニール

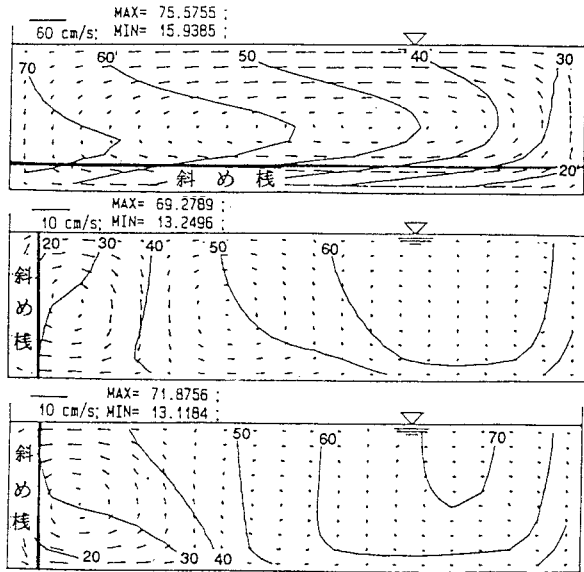


図1 底面と側岸にそれぞれ斜め棧を配置した水路の流れ

式魚道は図2にあるように阻流板が路床ではつながっているが (この場合も計算が可能), この部分がないものとした流路での流れの特徴を調べるため計算を行なった (阻流板は両岸に配置, よって対象軸を使って半幅のみ計算). すなわち側岸に $\theta=90^\circ, \varphi=45^\circ$ の棧を設置した場合について計算結果を主流速コンター, 2

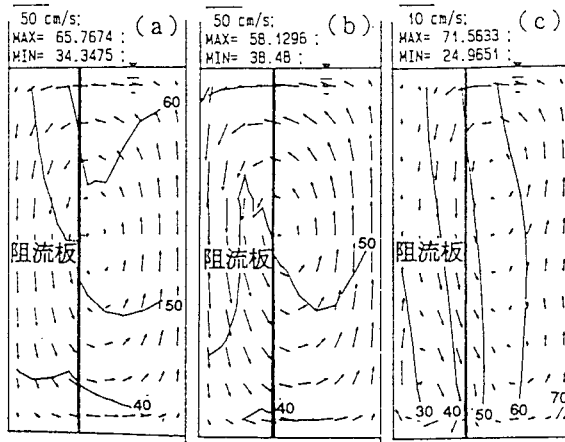


図3 阻流板の角度による断面内2次流の変化

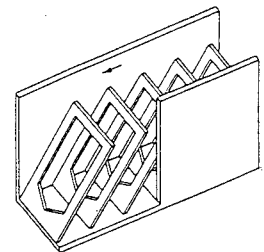


図2 デニール式魚道

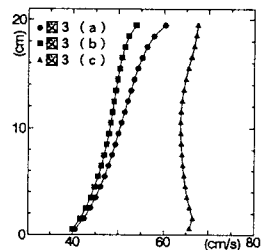


図4 中心軸に沿う主流速分布

次流ベクトルで表示したのが図3(a)で, ほぼデニール式と同様の流れが再現されている. すなわち水路中心で上昇流が現われ, 主流速は鉛直方向に直線に近い分布となっている. 次に, 阻流板を流軸方向にも斜めにし ($\theta=10^\circ, \varphi=45^\circ$) ら旋流の効果を強めてやった結果を図3(b)に, さらに流軸方向の傾きを逆にした ($\theta=-10^\circ, \varphi=45^\circ$) 例についての結果を図3(c)に示して比較した. 阻流板の鉛直軸・流軸に対する角度を変化させることによる流れの変化がよくわかる. 図4は断面中心軸に沿う主流速の鉛直方向分布で, 阻流板の角度によって大きく流れの流速分布を变ることのできる事が認識される.

5. あとがき

本研究では旋流を制御するために提案した著者らの斜め棧流れについての数値計算を一般化し, 流れに対して様々な角度の阻流板 (棧) を配置した流れを予測することを試みた. 今後こうしたものの組み合わせで, 魚道を含め機能水路の考案・設計について検討を進めたい.

参考文献: 1) 辻本・宮垣・森田: 水工学論文集, 第36巻, 1992, 2) 仲村・高松・福井・吉川: 水工学論文集, 第37巻, 1993, 3) 大同・小沢: 水工学論文集, 第37巻, 1993, 4) 辻本・松尾: 土木学会中部支部年次研究発表会, 1994, 5) 清水・辻本・中川: 土木学会論文集, No.447/II-19, 1992, 6) たとえば, 中村: 水工学シリーズ91-A-6, 1991.