

斜め棧粗度による螺旋流制御

Cellular-Motion Control by Oblique Arrangements of Strip Roughness in Open Channels

辻本哲郎*・清水義彦**・松尾和弘***

By Tetsuro TSUJIMOTO, Yoshihiko SHIMIZU and Kazuhiro MATSUO

Oblique arrangements of strip roughness cause cellular motion and it brings various type of function desired to rivers and streams. In this paper, flow over oblique arrangements of strip roughness is numerically analyzed by using a $k-\epsilon$ turbulence model particularly to describe cellular motion. The results are consistent to the experimental data obtained in irrigation canal and laboratory flume. The present method can analyze also the flow with oblique strip roughness on the side wall, and it can be applied to design Denil-type fishway.

Keywords: oblique arrangements of strip roughness, cellular motion, numerical analysis, $k-\epsilon$ turbulence model, river environments

1. まえがき

近年の河川整備の理念は、治水、利水、環境のいずれの機能も等しく充実させることとってよいだろう。さまざまな機能を河川に賦与するためにはさまざまな流れを創り出す工夫についての水理学的研究が望まれる。著者らはStuttgart大学でのカヌーのまっすぐな航行をねらってのV型棧粗度についての模型実験にヒントを得て、斜め棧粗度による螺旋流の制御について実験とセル中心を含む断面での簡便な解析による棧粗度の配置と螺旋流の強さの関連について先に研究を行なった¹⁾。この研究では流雪溝において投入された雪塊が側岸に結着して閉塞を引き起こすことを避けること、用水の浮遊塵芥の側方への越流除去などの工夫といった応用面を指摘した。本論文では、数値計算によって主流方向と異なる抗力成分によって駆動される2次流成分が生まれる状況を $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いた数値計算で記述・予測することを試みた。

一般に開水路ではアスペクト比が大きく、潤辺中、底面が斜め棧によってこうした流れを産み出すには最適ではあるが、河川は一般的に路床が移動床であるため、こうした流れでの河床変動制御を図ろうとするならむしろ側岸（護岸）でこうした工夫を試みる^{2), 3)}ということになろう。計算のフレームワークが整えば、斜め棧の配置箇所は何処であっても解析できるので、こうした例についても計算が可能である。後述のように、効果は棧のスケールにも依存するものの側岸粗度での流路全体の螺旋流制御は難しそうであるが、デニ

* 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科
(〒920 金沢市小立野2-4 0-2 0)

** 正会員 工博 Visiting Researcher, IHW, ETH-Zurich (群馬大学助手 工学部建設工学科)

*** 石川県土木部河川開発課

ール式魚道⁴⁾のように斜め棧に相当する阻流板の幅及び水深が水路幅に比べて充分小さくない場合は一對の螺旋流が形成され、魚道として好ましい流れの形成されることが数値計算によって確認され、こうしたタイプのモデル魚道での水理条件の制御が予測でき、設計に供することができる。

2. 数値解析の方法

棧粗度周辺の流れは微視的にみると局所的であるが、均質に空間平均された流れとして解析する。とくに粗度の間隔・高さ比が10～20程度では均質な粗度層が形成される。計算では粗度の存在する層を一種の透水層として扱い、棧の形状抵抗をその層で均質に受け持つような流れに置き換えて解析する。粗度の付け根の壁面では摩擦抵抗を考慮している。こうした離散的物体の存在する透水層としての解析に、それぞれの障害物の形状は無視し形状抵抗とそれがもたらすエネルギー損失が乱れエネルギーの生成と散逸を通して行なわれることを想定して、流れの基礎式にこれらについての付加項を加えて解析する工夫⁵⁾をここでも踏襲した。

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⁶⁾は次のようである。

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial x}(UV) + \frac{\partial}{\partial y}\left\{V^2 - v\frac{\partial V}{\partial y}\right\} + \frac{\partial}{\partial z}\left\{WV - v\frac{\partial V}{\partial z}\right\} = -g \cos \theta - \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{P''}{\rho}\right) + \frac{F_y}{\rho} + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\tau_{yy}}{\rho}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\tau_{yz}}{\rho}\right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(UW) + \frac{\partial}{\partial y}\left\{VW - v\frac{\partial W}{\partial y}\right\} + \frac{\partial}{\partial z}\left\{W^2 - v\frac{\partial W}{\partial z}\right\} = -\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{P''}{\rho}\right) + \frac{F_z}{\rho} + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\tau_{yz}}{\rho}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\tau_{zz}}{\rho}\right) \quad (4)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial x}(U\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial y}\left\{V\varepsilon - \left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right\} + \frac{\partial}{\partial z}\left\{W\varepsilon - \left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right\} = \frac{\varepsilon}{k}\left[C_1\left\{P_k + C_{fe}\left(\frac{F_x U + F_y V + F_z W}{\rho}\right)\right\} - C_2\varepsilon\right] \quad (6)$$

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、 v ：動粘性係数、 v_t ：渦動粘性係数、 F_x, F_y, F_z ：流体が棧から受ける単位体積当たりの力のx, y, z方向成分、 k ：乱れエネルギー、 ε ：乱れエネルギーの散逸率、 P_k ：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。乱れエネルギーの生成率 P_k は次のように書ける。

$$P_k = v_t \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

また、渦動粘性係数は乱れエネルギーと散逸率と次式で関係づけられ、 C_μ は数値パラメータである。

$$v_t = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

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る。すなわち、 $C_1=1.44, C_2=1.92, C_\mu=0.09, \sigma_k=0.9, \sigma_\varepsilon=1.3$ ⁷⁾。数値定数 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⁸⁾の比較から $C_{fk}=1.0, C_{fe}=1.3$ と定めた。

F_x, F_y, F_z は棧に作用する抗力のx, y, z方向成分 D_x, D_y, D_z （単位幅当たり）と次のように関係づけられる。

$$F_x = \frac{D_x}{sK}; \quad F_y = \frac{D_y}{sK}; \quad F_z = \frac{D_z}{sK} \quad (9)$$

ここで、 s ：棧の流下方向の配置間隔、 K ：棧高である。 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。

$$D_x = \frac{1}{2} C_D \rho (U \sin \theta \sin \varphi + V \cos \varphi + W \cos \theta) \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} K \sin \theta \sin \varphi \quad (10)$$

$$D_y = \frac{1}{2} C_D \rho (U \sin \theta \sin \varphi + V \cos \varphi + W \cos \theta) \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} K \cos \varphi \quad (11)$$

$$D_z = \frac{1}{2} C_D \rho (U \sin \theta \sin \varphi + V \cos \varphi + W \cos \theta) \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} K \cos \theta \quad (12)$$

ただし、 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。

Reynolds応力は平均流特性と次のように結び付ける。

$$\frac{\tau_{xy}}{\rho} = \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right); \quad \frac{\tau_{zx}}{\rho} = \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right); \quad \frac{\tau_{yz}}{\rho} = \nu_t \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right); \quad \frac{\tau_{yy}}{\rho} = 2\nu_t \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{2k}{3}; \quad \frac{\tau_{zz}}{\rho} = 2\nu_t \frac{\partial W}{\partial z} - \frac{2k}{3} \quad (13)$$

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（TEACH-Tコード）⁹⁾。壁面（棧は
透水層とモデル化され棧の表面摩擦は考えていない）での境界条件は流速について壁関数を適用、乱れエネルギー
について局所平衡が成立するとした。すなわち壁に最も近い格子点（添字 p を付ける）で次式が成立するとした。

$$\frac{U_p}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{u_* y_p}{\nu} + 5.3; \quad \frac{k_p}{u_*^2} = \frac{1}{\sqrt{C_\mu}}; \quad \varepsilon_p = \frac{u_*^3}{\kappa y_p} \quad (14)$$

ここに κ ：Karman定数、 u_* ：摩擦速度である。

上記の数値計算によって断面内の流速、Reynolds応力分布及び dP/dx （これよりエネルギー勾配を算定）
が得られる。

3. 斜め棧粗度に誘起される螺旋流についての実験の概要

底面に棧を斜めに配置した開水路流についての実験については既
に発表済み^{1), 10)}であるが、ここではその概要をまとめて記す。

主な実験は浅野川水系金浦用水（金沢市）の直線区間（長さ約30m）に
おいて行なった（写真1）。同水路は水路幅1.5mの矩形断面水路で、一辺
が6cmのモルタル製角材を棧（ $K=6\text{cm}, \varphi=90^\circ$ ）として用いた。計測は図1
に概略的に示すような棧の中間断面で、小型電磁流速計（KENEK VM201）
を用いて行なった。プローブは直径8mm、長さ3cmの円柱型でL型サポー
トで水路床に水平にそれぞれ、 x, y 成分、 y, z 成分が測定できるよう設置し
た（図1中○、●はそれぞれ x, y 成分、 y, z 成分測定点）。各測定点で20Hz
で約1分のサンプリングとした。これに
より時間平均流速、乱れ強度、Reynolds
応力の各成分が得られた。実験はほぼ等
流になるよう下流端で調整し、水深 h （
路床から水面までの距離）は流速測定断
面で実測した。エネルギー勾配 I_e は棧粗

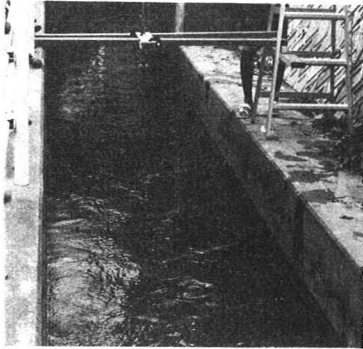


写真1 用水でのV型棧粗度の実験

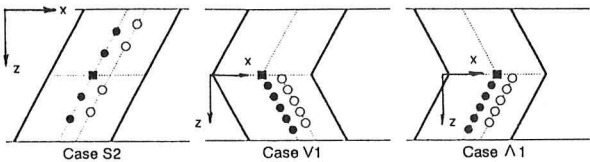


図1 斜め棧粗度を伴う流れの測定断面

表1 実験の水利条件

Run	K (cm)	s (cm)	θ°	Type	h (cm)	U_{ave} (cm/s)	I_e	Note
S1	6.0	110	70	oblique	44.0	58.5	0.00092	field
S2	6.0	110	60	oblique	44.0	57.0	0.00091	field
S3	6.0	90	70	oblique	38.0	71.0	0.00178	field
V1	6.0	110	120	V	46.0	56.5	0.00085	field
V2	1.0	10	105	V	10.9	28.9	0.00097	laboratory
Λ1	6.0	110	60	Λ	42.0	38.0	0.00447	field
Λ2	1.0	10	75	Λ	11.2	28.4	0.00122	laboratory
VE	1.0	10	105	VE	10.5	32.9	0.00120	laboratory
ΛE	1.0	10	75	ΛE	9.7	28.5	0.00096	laboratory

度の影響を受けない領域のReynolds応力分布より推定した。Case Sは棧を水路幅一杯について斜めに配置したもので、Case V、Case Aは水路中心を対象軸として棧の角度を変えたもので上流側から見て平面形状がV型、A型に配置したものである。また、一部の実験は実験室水路（幅0.4m、長さ12m）で補足的に行なったもので、ここでは一辺が1cmの正方形断面を持つ木製の角材を棧として用いた。さらに、野外水路での観察中、路床に沿っての流下物が棧の鋭角部に堆積する傾向が見られ、そのスムーズな流下のためその部分の棧に開口部を設けた場合の実験を行なった。これらがRun VE、AEである。表1に実験の水力条件を示す。ここで U_{ave} ：断面平均流速である。

4. 棧粗度を伴う流れ ($\theta \neq 90^\circ, \varphi = 90^\circ$) の数値解析と実験結果との比較

上記の実験を対象に数値解析を行なった。

図2は斜め棧粗度上の流れ (Case S) について主流速分布 $U(y)$ 、横断方向流速分布 $W(y)$ 及びこれらにかかわるReynolds応力分布 ($-\overline{uv}(y)$, $-\overline{vw}(y)$) について実験結果と計算結果を比較した例である。また図3には断面内二次流をベクトル表示したもののについて実験結果と計算結果を比較した。これらによると斜め棧によって螺旋流が形成され強い横断方向流が産み出され主流流速分布も下方にはらんだものに変質している。前報¹⁾では主流がなお対数則に従うとしてセル中心断面での簡便な二次流の解析を示したが、斜め棧によって容易に強い螺旋流が誘起されるのでこうした仮定の成立する条件は限られていることがわかる。さらに図4、5にはそれぞれV型配置及びA型配置の棧粗度を伴う流れの流速、Reynolds応力の分布について、図6にはこれらの流れでの二次流ベクトルについて実験結果と計算結果を比較した。これらの結果によると、棧粗度のV型あるいはA型配置によって容易に一對の螺旋流が形成され、主流速分布もかなり歪まされる。図2～6で計算結果を実験結果を比較することから、棧の斜め配置によって誘起される二次流やそれによって歪まされる主流速分布など、今回提案した方法での数値計算によって良く表現できるものと判断される。

さらに図7には路床に沿う流下物のスムーズな流送のため路床近傍で流れの集中する箇所を棧に開口部を

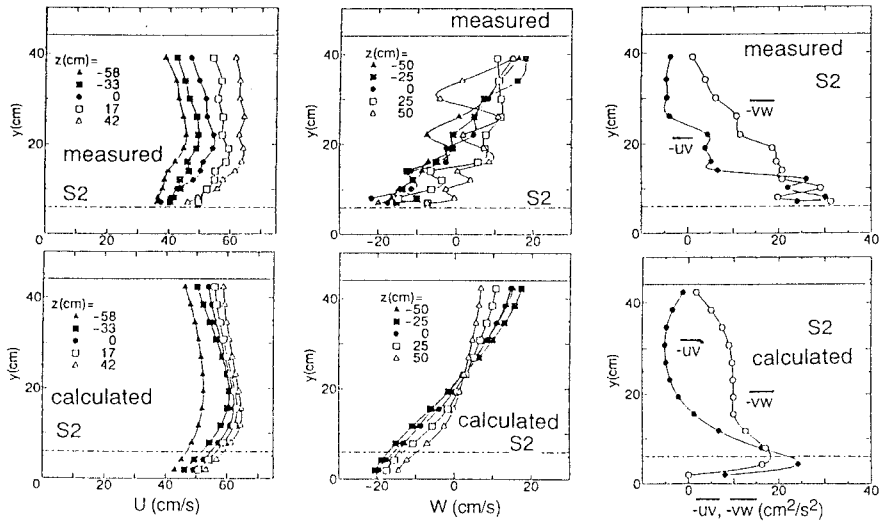


図2 斜め棧粗度上の流れの流速及びReynolds応力分布

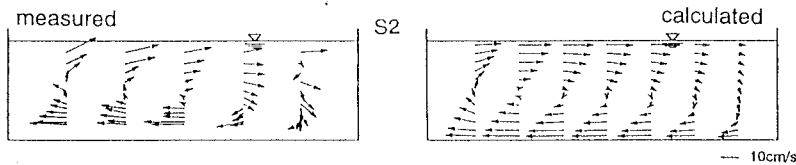


図3 斜め棧粗度上の流れに誘起される二次流の断面内分布

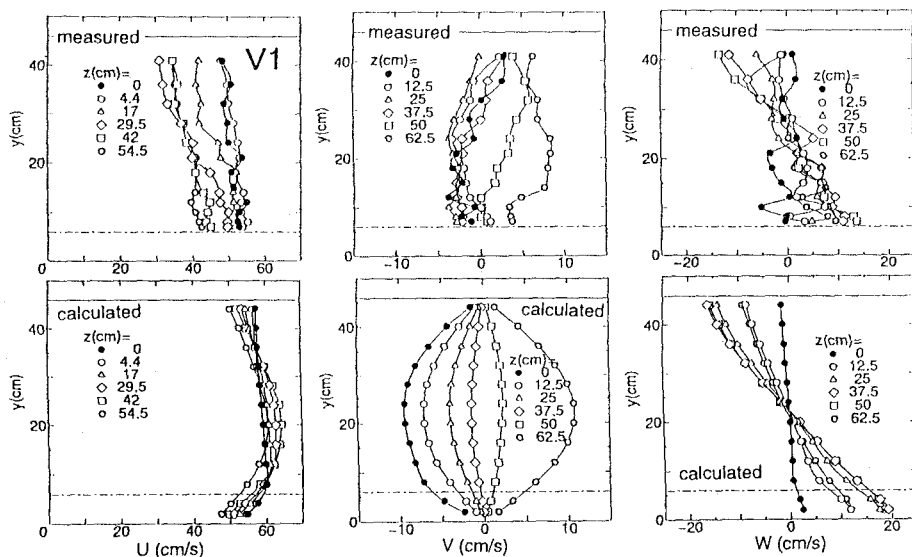


図4 V型に配置された栈粗度上の流れの流速及びReynolds応力分布

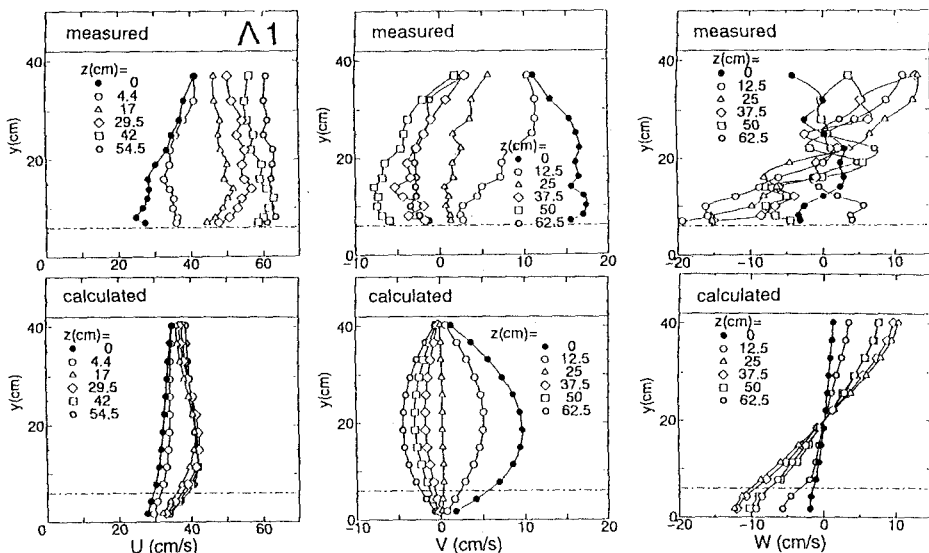


図5 A型に配置された栈粗度上の流れの流速及びReynolds応力分布

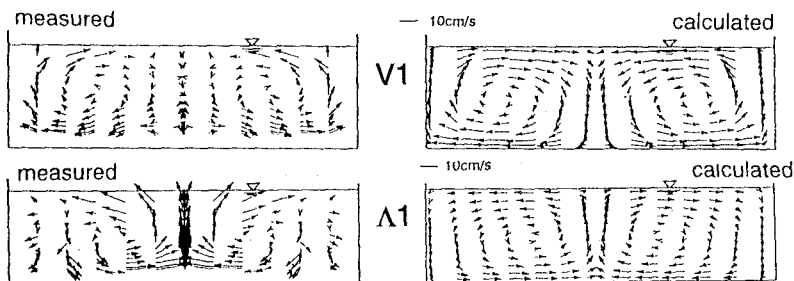


図6 V型あるいはA型に配置された栈粗度上の流れの二次流の断面内分布

設けた実験での二次流ベクトルを計算結果と比較したものである。全幅の15%程度の開口に対して二次流の強度はそれほど低下しないことがわかる。図8は水路全幅に対する開口幅の割合によるV, A型栈粗度の効果の低減を横断方向最大流速の低下で見たものである。

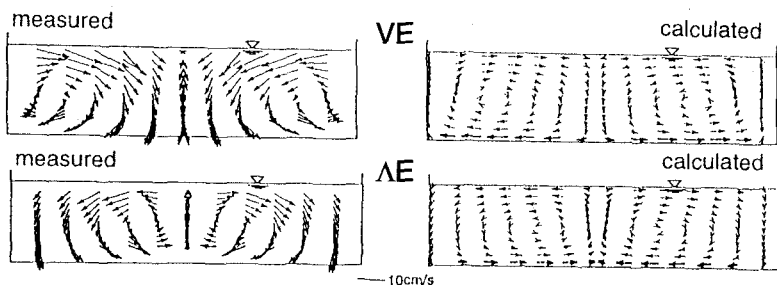


図7 開口部を持つV型・A型棧粗度上の流れの二次流の断面内分布

5. 護岸に斜め棧を伴う流れ ($\theta=90^\circ$, $\phi \neq 90^\circ$)

水路全体にわたって螺旋流が生じるように両側岸に斜め棧を配置して実験 ($B=38\text{cm}$, $h=7.82\text{cm}$, $K=1\text{cm}$, $s=10\text{cm}$, $Q=7.72\text{l/s}$, $\theta=120^\circ$) を行ない、計算結果と比較した。この結果を図9に示す。斜め棧を水路側岸の片方の側岸に設置する場合は、アスペクト比によっては流路全体の螺旋流の生起には至らないが護岸脚部の洗掘防止といった意味での効果は充分である。

護岸に配置した斜め棧はデニール式魚道の阻流板の働きをする（側岸部で下降する向きに棧が配置される）ことに着目、このタイプの魚道の流れを計算した。標準デニール型魚道のアスペクト比では図10に示すように顕著な一対の螺旋流が形成され、水路中心軸での主流流速分布について中村⁴⁾の実験結果と良く一致した直線的な分布が計算されている。こうした数値解析は魚道設計の代替案づくりに利用できると考えられる。

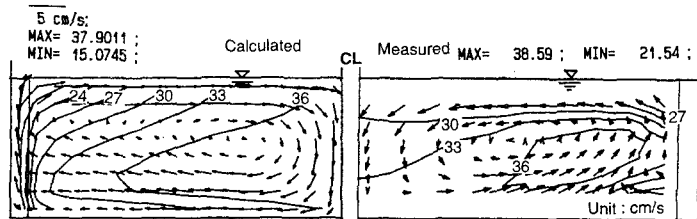


図9 側岸に斜め棧粗度をもつ流れ

6. あとがき

本研究は流路に様々な機能を付与できる螺旋流制御を棧粗度の斜め配置で行うことを想定、こうした流れを計算で記述・予測しようとするもので、こうした工夫を数値解析で定量的に検討できるようになった。

なお、文部省科学研究費・一般研究(C) (代表：辻本) の補助を受けた。

参考文献

- 1) 辻本・宮垣・森田：斜棧粗度の配置の工夫による開水路流制御，水工学論文集，第36巻，pp.259-264, 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，第37巻，pp.569-574, 1993.
- 3) 大同・小澤：二次流の制御による河川曲線外縁部の局所洗掘防止，水工学論文集，第37巻，pp.555-562, 1993.
- 4) 中村：魚道：二次流に関する夏期研修会講義集，土木学会水理委員会，A-6，pp.1-24, 1991.
- 5) 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，No.447，pp.35-44, 1992.
- 6) 清水・辻本・中川：植生帯を伴う流れ場の数値計算，水工学論文集，第36巻，pp.265-272, 1992.
- 7) Rodi, W.: *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics*, IAHR, 29p., 1984.
- 8) 清水・辻本・中川・北村：直立性植生層を伴う流れ場の構造に関する実験的研究，土木学会論文集，No.438，pp.31-40, 1991.
- 9) Patanker, S.V. and Spalding, D.B.: A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows, *Int. Jour. Heat Mass Transfer*, Vol.15, pp.1787-1806, 1972.
- 10) Tsujimoto, T., Saito, A. and K. Okamoto: Secondary flow induced by V and A type arrangements of strip roughness in open channel, *Memoirs, Fac. of Tech., Kanazawa Univ.*, Vol.22, No.2, pp.79-91, 1989.

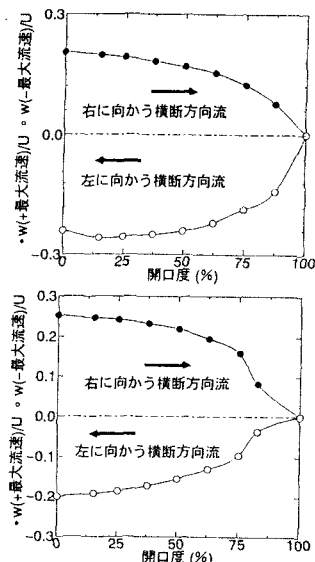


図8 開口度によるV・A型棧粗度の効果の低減

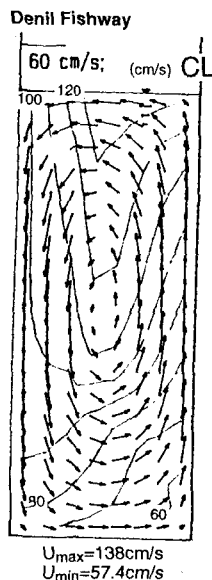


図10 標準デニール魚道の流れ