

越流型水制周辺の流れの 2 次元解析

広島大学大学院 学生会員 ○川口 広司
 広島大学工学部 正会員 渡邊 明英

広島大学工学部 正会員 福岡 捷二
 広島大学大学院 学生会員 安竹 悠

1. はじめに

水制には多様な役割が期待されている。水制の目的に応じた模型実験と数値解析による配置法の検討が互いに補完する形で行われている。水制周辺の 2 次元的な流れ場はある定まった分布特性をもち、数値解析をベースに理論解の形を予測できる可能性がある。本研究では水制周辺の定常な理論解を得ることを最終目標としており、現在はその途中段階である。本論文では、渦度方程式と流れ関数を用いた 2 次元解析結果と福岡・西村らの固定床模型実験、準 3 次元解析結果¹⁾とを比較検討する。

2. 解析方法

解析には福岡・渡邊らのペーン工周りの流れの解析²⁾を参考に水制を包含するように渦度方程式を体積積分し、流体力を導出する。本研究では近似的に水深一定とし、次式により解析を行っている。

$$\int_{\Lambda} \left(\frac{\partial \omega_z}{\partial t} + v_i \frac{\partial \omega_z}{\partial x_i} \right) dA = \int_{\Lambda} \left(\varepsilon \frac{\partial^2 \omega_z}{\partial x_i^2} \right) dA - \frac{1}{\rho h} \int_{\Lambda} \left(\frac{\partial \tau_{by}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{bx}}{\partial y} \right) dA - \frac{1}{\rho h} \int_{\Lambda} \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) dA$$

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g n^2}{h^{1/3}} u \sqrt{u^2 + v^2}, \quad \tau_{by} = \frac{\rho g n^2}{h^{1/3}} v \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$-\omega_z = \nabla^2 \varphi, \quad u = \partial \varphi / \partial y, \quad v = -\partial \varphi / \partial x$$

ここに、 F_x , F_y は水制に作用する単位体積あたりの流体力の各方向成分である。 τ_{bx} , τ_{by} は各方向の底面剪断力であり、Manning の粗度係数には実験値より $n=0.015$ を与えた。

解析の対象は福岡・西村らの固定床模型実験結果¹⁾の流れの平衡区間を対象として周期境界条件を用いる。y 方向は差分法により離散化する。x 方向には Fourier 級数展開を行い、Galerkin 法により離散化する。なお、Fourier 級数は 6 次までの項を用いた。定常な収束解を得るために、Euler の陽解法を用いて $dt=0.001$ で誤差が 1%未満になるまで反復計算を行った。

福岡・西村らの準 3 次元解析では外力は Delta 関数の形でメッシュ内に平均的に与えられている。本 2 次元解析では x 方向に連続的に解くため、外力の縦断方向分布を次の Heaviside 関数 H を用いて表す。

$$F_x = \left\{ H \left(x' - 0.5 + \frac{b}{2L} \right) - H \left(x' - 0.5 - \frac{b}{2L} \right) \right\} \frac{F_D}{h_g b D}, \quad F_y = \left\{ H \left(x' - 0.5 + \frac{b}{2L} \right) - H \left(x' - 0.5 - \frac{b}{2L} \right) \right\} \frac{F_L}{h_g b D}$$

ここに、 $F_D = C_D (h_g D) \rho u |u| / 2$, $F_L = C_L (h_g D) \rho u |u| / 2$, h_g は水制高, D は水制長, b は水制幅, u は各横断方向メッシュ内の水制上流 5cm での接近流速である。川口ら³⁾より抗力係数 $C_D=5.6$, 揚力係数 $C_L=0.2$ とした。

渦動粘性係数 ε は崇田・清水の研究⁴⁾と同様に次式で与える。

$$\varepsilon = \alpha \Delta U D + \kappa u_* h / 6$$

ここに、 $\alpha = 0.004$, $\Delta U = U_{\max} - U_{\min}$, $\kappa = 0.4$ とし、 ε は一定値とし ΔU と h は実験による平均値を与えた。

3. 解析結果

図-1,2 は渦度方程式と流れ関数を用いた 2 次元解析結果と福岡・西村らの模型実験結果を水深平均したものとを縦断、横断方向の各成分ごとに比較したものである。2 次元解析結果は水制先端の水はねや水制域への流入など実験結果の流れの特徴をおおむね再現している。

図-3,4 は 2 次元解析結果の渦度の $\cos$ と $\sin$ の各級数の振幅の横断分布である。ただし、水制先端での渦度の各級数の振幅で無次元化している。 $\cos$ と $\sin$ の各振幅の横断分布は縦断方向の波長とは無関係に決まった形をしており、この分布形を与えて渦度の縦断平均値の横断分布と水制先端での渦度の縦断方向の振幅を解

けば解がおおむね決まると考えられる。

図-5,6は2次元解析結果と福岡・西村らの模型実験結果, 準3次元解析結果の水深平均値を縦断, 横断方向の各成分について比較したものである。ただし, 横断方向成分は右岸方向を正とする。平均流速の縦断方向成分は実験, 準3次元, 2次元解析結果とも同様な値になっている。しかし, 水制先端付近の平均流速の横断方向成分は2次元よりも準3次元の解析結果のほうが実験値に近くなっている。これは, 準3次元解析結果は水制先端付近で発生する2次流の大きさをおおむね再現しているためである。

本解析は水深一定のもとで行ったが, 水制先端付近では水深分布の影響も大きいと考えられる。今後, 渦度方程式, 流れ関数と共に静水圧近似の圧力方程式により水深分布を解く予定である。

参考文献

- 1) 福岡捷二・西村達也・高橋晃・川口昭人・岡信昌利: 越流型水制工の設計法の研究, 土木学会論文集, No.593, II-43, pp.51-68, 1998.
- 2) 福岡捷二・渡辺明英: ベーン工の設置された湾曲部の流れと河床形状の解析, 土木学会論文集, No.447, II-19, pp.45-54, 1992.
- 3) 川口広司・岡信昌利・福岡捷二: 越流型水制群に作用する流体力の特性, 水工学論文集, 第44巻, pp.1065-1070, 2000.
- 4) 崇田徳彦・清水康行: Reynolds 応力を考慮した水制を含む流れの計算, 水工学論文集, 第37巻, pp.487-494, 1993

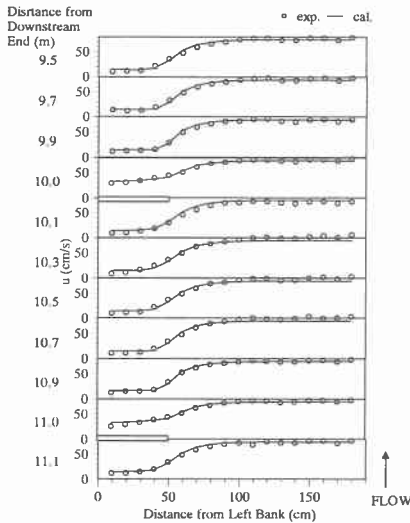


図-1 水深平均流速の縦断方向成分 u

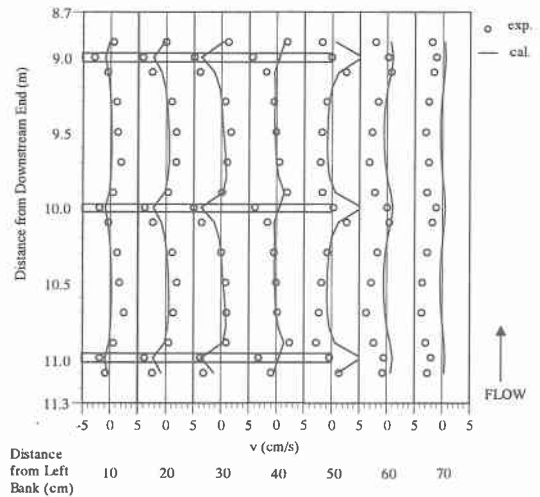


図-2 水深平均流速の横断方向成分 v

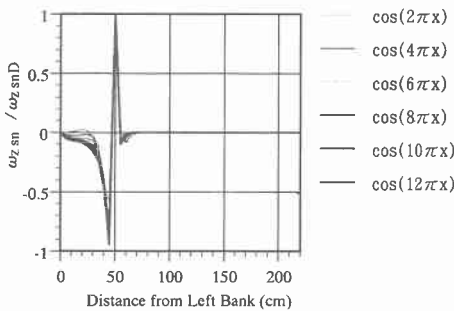


図-3 無次元化した ω_z の cos 級数の振幅

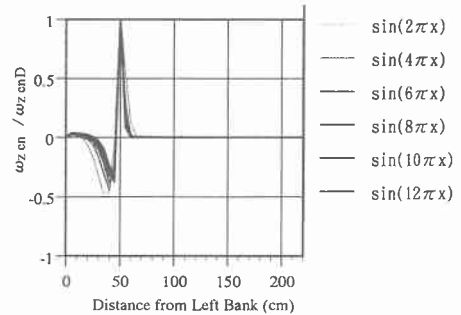


図-4 無次元化した ω_z の sin 級数の振幅

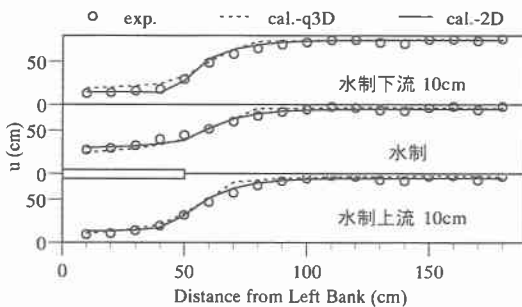


図-5 u の横断分布の比較

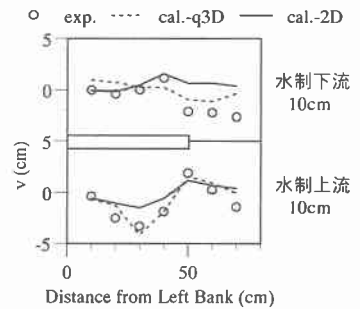


図-6 v の横断分布の比較