

京都大学大学院工学研究科 フェロー会員 瀬津家久
京都大学大学院工学研究科修士課程 学生員 〇矢野勝士
京都大学大学院工学研究科 正会員 鬼東幸樹

1. はじめに

近年、河川改修工事を行うにあたって、治水・利水効果はもとより環境面への影響が念頭に置かれるようになった。このような環境面における生態系への人工的助力として、木曽川や淀川などで見られる「わんど」と呼ばれる水制構造物の設置が一例として挙げられる。このような水制流れ周辺での流れ特性を解明することは今後の河川改修工事への貢献という観点から重要である。わんどを単純にモデル化すると側壁に凹部を有する開水路流れとなる。これまでにアスペクト比による流れ場への影響はある程度解明されてきている¹⁾。しかし、フルード数の効果に関する研究はほとんど行われていないのが現状である。本研究では、側壁に凹部を有する開水路乱流に及ぼすフルード数の影響を PIV(Particle Image Velocimetry)を用いて検討したものである。

2. 実験装置および実験条件

表-1 に実験条件を示す。本研究では水深 H 、凹部奥行き長さ B_w 、開口部長さ L を固定し、主流のフルード数 $Fr = U_m / \sqrt{gH}$ を 0.2, 0.5, 0.8, 1.2 と 4 通り変化させた。この流れにおいて、粒径 $100\mu\text{m}$ のナイロン 12 粒子を一様に散布し、レーザーライトシートを水路水平面内に照射し、映し出されたトレーサの挙動を、水路上方に設置された CCD カメラにより 1/30 秒毎に 60 秒間レーザーディスクに録画した。こうして得られた可視化画像から相互相関法により瞬間流速を計測した。実験装置や PIV 法に関しては文献 1) を参照されたい。

3. 実験結果および考察

(1) 時間平均流速分布

図-1 に平均流速ベクトル ($U/U_{\max}, W/U_{\max}$) を示す。 $U_{\max}$ は流入部における最大主流速である。両ケースにおいて、わんど内部の比較的下流付近に循環渦の存在が確認できる。この循環渦の中心はやや異なるが、フルード数の変化に対して系統的な特徴を特定するには至らなかった。一方、わんど内の上流域では、フルード数の低いケース F02 では流速がかなり微小で死水域となっているが、フルード数が増大するにつれて逆流速が増加していくことが観察される。つまり、フルード数の増加によって循環渦のパターンはほとんど変化しないが、その強度は増加することが明らかとなった。

(2) 乱れエネルギーおよびその発生率

乱れの発生率 $G = -\overline{u_i u_j} dU_i / dx_j$ (アインシュタイン縮約を使用) および乱れエネルギー $k = \overline{u_i u_i} / 2$ をわんど内部全域にわたって積分し、図-2 および図-3 に示した。

$$GI = \frac{1}{LB_w} \int_0^L \int_0^{B_w} \frac{GB_w}{U_{\max}^3} dx dz$$

(1)

$$K = \frac{1}{LB_w} \int_0^L \int_0^{B_w} \frac{k}{U_{\max}^2} dx dz$$

(2)

図-2 より、わんど内全域での乱れの発生率はフルード数の上昇とともに増加し、 $Fr=0.8$ で極大値をとることがわかる。その後、射流に遷移した $Fr=1.2$ では逆に乱れの発生率は小さ

表-1 水理条件

CASE	H (cm)	L (cm)	B_w (cm)	L/B_w	Fr
F02	4.0	20.0	4.0	5.0	0.20
F05					0.49
F08					0.80
F12					1.20

L : 開口部長さ, H : 流入部平均水深, $Fr = U_m / \sqrt{gH}$

U_m : 流入部断面平均流速

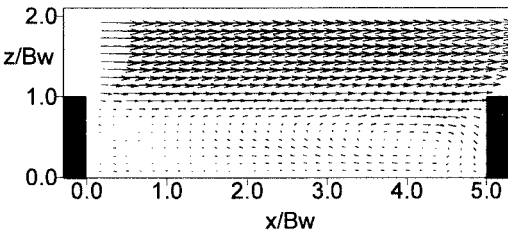


図-1(a) 平均流速ベクトル (F02), $Fr = 0.2$

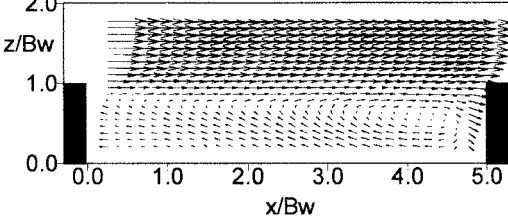


図-1(b) 平均流速ベクトル (F12), $Fr = 1.2$

くなっている。ただし、これはフルード数の増加に伴い摩擦レイノルズ数も増加し、壁面のシアによる乱れの発生位置が壁面近傍に近づくにもかかわらず、本解析では平面二次元計測であり、壁面近傍における乱れの発生率は評価されていない。一方、図-3 よりわんど全域での乱れエネルギーはフルード数が0.2から1.2までの範囲でほぼ線形的に増加することが確認できる。そこで、乱れエネルギーの積分値とフルード数の関係を次式の回帰式を提案する。

$$K = (0.0168Fr + 0.0064) \quad (3)$$

この乱れエネルギーの増加は、境界部付近において乱れの散逸率よりも乱れの発生率の方が卓越することだけでなく、流れが下流壁にぶつかった後に循環渦によって乱れが上流側に移流する効果がフルード数の増加に伴い顕著となったことも一因として考えられる。

(3) 質量交換率と運動量交換率

池田ら²⁾は、わんど上下流端を結ぶラインを境界線とし、この境界線における質量交換率 M および運動量交換率 θ を次式のように提案した。

$$M = \frac{1}{\rho U_{\max} L} \int_0^L \rho |\bar{u}| dx \quad (4)$$

$$\theta = \frac{1}{\rho U_{\max}^2 L} \int_0^L \rho u \bar{u} dx \quad (5)$$

ここで、 ρ は水の密度である。なお、運動量交換率はわんど内部から主流域へ向かう輸送を正としている。

図-4 および図-5 に質量交換率 M および運動量交換率 θ をそれぞれ示した。なお、図中には連続水制を対象とした池田ら²⁾の実験結果および池田ら³⁾のLESによる数値計算結果も併示した。ただし、池田ら^{2,3)}は断面平均流速 U_m で無次元化している。本実験結果は、フルード数が増加するに従い質量交換率が増加する結果となった。これは、循環渦の強度が増加することに起因していると考えられる。フルード数1.2のケースは増加傾向にないが、これは瞬間渦のスケールが小さくなったためと考えられる。運動量交換率についてはフルード数に対してそれほど大きな変化は見られない。また、 θ 値が負をとっているため運動量が主流からわんど内へと輸送されていることがわかる。

4. おわりに

開水路凹部流れわんどモデルにおいて、フルード数を系統的に変化させてPIV法を用いて乱流計測を行った。その結果以下のことが解明された。フルード数が増加しても循環渦のパターンはほとんど変化しないが、その強度は増加傾向にある。そのため、わんど内の上流側ではフルード数が小さい場合にはほとんど流れのない死水域となっているが、フルード数が大きくなると、逆流域となりその流速値が増加する。質量交換率はフルード数の増加に従い大きくなることがわかった。運動量交換率に関してはフルード数の影響をあまり受けないこと、フルード数にかかわらず常に主流からわんど内へと運動量が輸送されていることがわかった。今後、三次元構造を解明していきたい。

参考文献

- 1) 瀬津家久, 鬼束幸樹, 高橋俊介, 土木学会論文集, No.684/II-56, pp.11-20, 2001.
- 2) 池田駿介, 吉池智明, 杉本高, 水工学論文集, 第43巻, pp.281-286, 1999.
- 3) 池田駿介, 杉本高, 吉池智明, 土木学会論文集, No.656/II-52, pp.145-155, 2000.

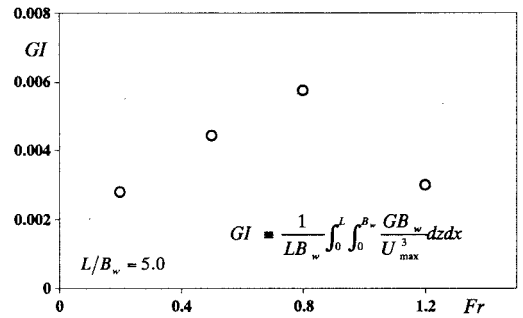


図-2 わんど内全域での乱れの発生率

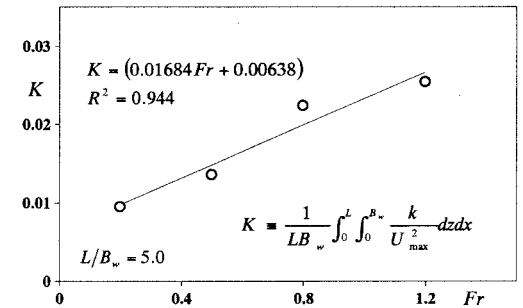


図-3 わんど内全域での乱れエネルギー

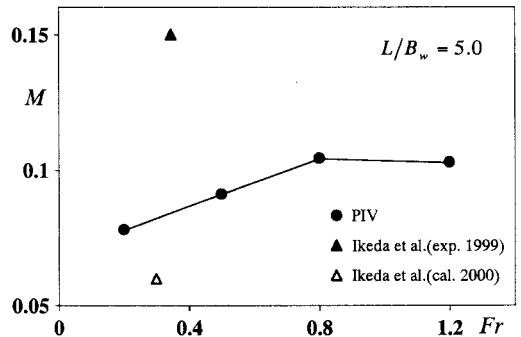


図-4 質量交換率 M

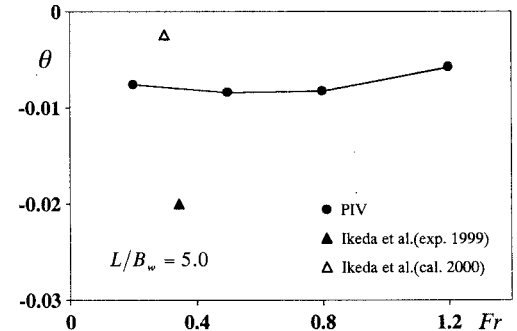


図-5 運動量交換率 θ