

II-304 常流中の鉛直平板前面に作用する圧力の特性

日本大学短期大学部 正 山中 康資
日本大学短期大学部 正 畑中 勝守
日本大学理工学部 正 大津 岩夫

従来、開水路中の鉛直平板に作用する圧力の大きさ、分布形状についてはほとんど検討がなされていない。筆者らの射流中、および強制跳水中の鉛直平板を越える流れの研究によると、平板直前に渦が形成され、この渦のために平板前面の圧力分布がS字型の形状を示すことが見いだされた^{1), 2)}。

ここでは、常流中に鉛直平板を設置した場合について、平板直前の渦の存在を実験的に見だし、Navier-Stokesの式を直接数値計算することにより説明した。さらに、平板前面の圧力の大きさと分布形状について実験的に検討し、数値計算から説明した。

1. 鉛直平板前方の流況

レーザー流速計(L.D.V)で測定した常流中の鉛直平板前方のx方向流速を式(1)の関係で整理した一例を図-2に示す。

$$u/u_m = f(y/h_1) \quad (1)$$

ここに、 u は y におけるx方向流速、 u_m は u の最大値、 y は水路床からの高さ、 h_1 は平板上流の水深、 x' は平板前面から上流方向への距離、 F_1 はフルード数($=v_1/\sqrt{gh_1}$)、 g は重力加速度、 Re はレイノルズ数($=v_1S/\nu$)、 v_1 は平板上流の平均流速、 ν は動粘性係数($=\mu/\rho$)である。

図-2より、流れは平板前方 $x'/S=1.0$ 付近から剥離し、平板直前にマイナスの流速が認められる。よって、常流中の平板直前にも射流中、および強制跳水中の場合^{1), 2)}と同様に渦の存在が確認された。

2. 鉛直平板前面に作用する圧力分布

常流中の鉛直平板前面に作用する流体運動による圧力(dynamical pressure) p_{af} は、次元解析的考察から式(2)の関係で示される。

$$p_{af}/(1/2)\rho v_1^2 = f(y/S, S/h_1, F_1, Re) \quad (2)$$

ただし、 $p_{af} = p_f - p_{st}$, $p_{st} = \rho(h_{of} + S - y)$

ここに、 ρ は水の密度($=w/g$)、 p_f は平板前面に作用する圧力、 p_{st} は平板前面に作用する水の重量による圧力、 h_{of} は平板前面の水深である(図-1)。

平板前面の圧力 p_{af} の実測値を式(2)の関係に基づき整理した一例を図-3、4に示す(図中の白色印)。

図-3、4より、与えられた S/h_1 、 Re に対して、平板前面の圧力分布は、 F_1 に関わらずほぼ同様な大きさを示す。また、 $S/h_1=0.1$ と $S/h_1=0.2$ の場合を比較すると、平板前面の圧力は、 $S/h_1=0.2$ の場合の方が幾分か大きい傾向を示す。圧力分布形状は $y/S=0.6$ 付近で最大値、 $y/S=0.2$ 付近で最小値をとるS字型を示す。このように平板前面の圧力分布形状がS字型を示すのは、平板前面高さ $y/S=0.6$ 付近に生じるよどみ点と平板直前に形成される渦のためである¹⁾。

3. 数値計算

3.1 基礎方程式と境界条件

鉛直平板を越える流れを解くための基礎式として、2次元非圧縮性粘性流体のNavier-Stokesの式(3)、(4)と連続の式(5)を用い、これらを直接数値計算した。

$$\frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{t}} + \hat{u} \left(\frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{x}} \right) + \hat{v} \left(\frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{y}} \right) + \frac{\partial \hat{p}}{\partial \hat{x}} - (1/Re) \left(\frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial \hat{x}^2} + \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial \hat{y}^2} \right) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{t}} + \hat{u} \left(\frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{x}} \right) + \hat{v} \left(\frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{y}} \right) + \frac{\partial \hat{p}}{\partial \hat{y}} - (1/Re) \left(\frac{\partial^2 \hat{v}}{\partial \hat{x}^2} + \frac{\partial^2 \hat{v}}{\partial \hat{y}^2} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{x}} + \frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{y}} = 0 \quad (5)$$

ここに、 $\hat{x}$ 、 $\hat{y}$ は無次元座標値($=x/S$ 、 y/S)、 $\hat{u}$ 、 $\hat{v}$ は $\hat{x}$ 、 $\hat{y}$ 方向の無次元流速($=u/U$ 、 v/U)、 $\hat{p}$ は無次元圧力($=p/\rho U^2$)、 $\hat{t}$ は無次元時間($=Ut/S$)、 Re はレイノルズ数($=US/\nu$)である。また、 U は初期流入部代表流速である。

境界条件を図-5に示す。初期流入部流速分布は $1/7$ 乗則とした。底面および平板表面では $\hat{u}=\hat{v}=0$ (Non-Slip条件)、流出断面では

$$\hat{p}=0, \quad \sigma_x = -\hat{p} + (2/Re) \left(\frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{x}} \right) = 0,$$

$$\tau_y = \frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{y}} + \frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{x}} = 0,$$

水面では領域境界を水平とし、

$$\hat{v}=0, \quad \tau_x = \frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{y}} + \frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{x}} = 0$$

とした。

計算手法としては、有限要素法と流速修正法³⁾を用いた。

3.2 計算結果

3.2.1 鉛直平板前方の流れの流況

$S/h_1=0.20$ 、 $Re=4000$ における鉛直平板近傍の時間平均流速ベクトル($\bar{u}$, $\bar{v}$)を図-6に示す。ここに、 $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ は $\hat{x}$ 、 $\hat{y}$ 方向の時間平均流速を示す。また、流速の時間平均値は無次元時間150~182の時間平均値である。図中のベクトルの大きさは $\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}$ から計算した。

図-6より、平板前方 $x'/S < 1.0 \sim 2.0$ における三角形の領域で渦が形成され、平板前面の $y/S=0.7 \sim 0.8$ 付近でよどみ点が生じている

ことが認められる。

図-2の実線は u/u_m の計算値を示すが、平板近くの断面では実験値とほぼ一致していることが認められる。

3.2.2 鉛直平板前面の圧力分布

$Re=4000$ において、 $S/h_1=0.1$ と $S/h_1=0.2$ の場合の平板前面に作用する圧力の時間平均値 $\overline{p_{di}}$ を式(2)の関係で整理したものを図-3、4に示す(図中の黒丸)。圧力の時間平均値は、 $S/h_1=0.1$ の場合無次元時間150~187、 $S/h_1=0.2$ の場合無次元時間150~182の時間平均値である。

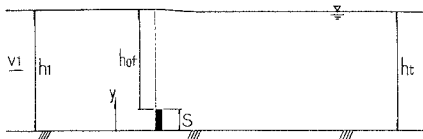


図-1 常流中に設置された鉛直平板を越える流れ

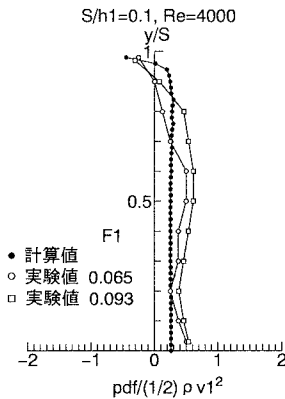


図-3 常流中の鉛直平板前面に作用する圧力分布(実験値・計算値)

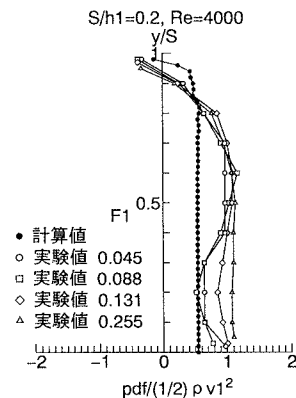


図-4 常流中の鉛直平板前面に作用する圧力分布(実験値・計算値)

$S/h_1=0.1$ の場合、平板前面の圧力分布の実験値と計算値はほぼ同程度の大きさを示す。しかしながら、 $S/h_1=0.2$ の場合、実験値の方が計算値より幾分大きい傾向を示す。

これより、本実験範囲においては、数値計算から得られた平板前面の圧力分布は、平板高が小さく $S/h_1=0.1$ の場合、実験値とほぼ同程度の大きさを示す。また、平板高が大きくなり $S/h_1=0.2$ 程度になると、実験値の方が計算値より幾分大きくなる傾向がある。これは、数値計算では自由水面の影響、流れの3次元性等を考慮していないためと考えられる。

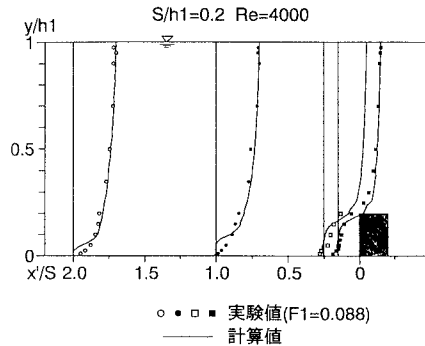


図-2 常流中の鉛直平板前方のx方向流速分布(実験値・計算値)

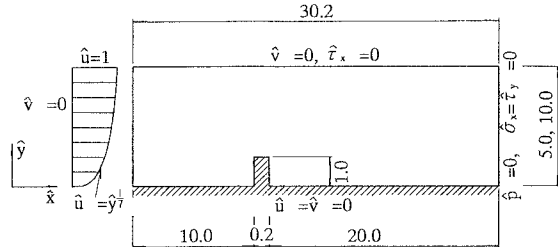


図-5 数値計算で用いた境界条件

$S/h_1=0.20$, $Re=4000$, $t=150.0 \sim 182.2$ の時間平均値

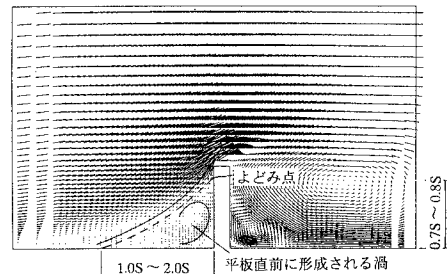


図-6 鉛直平板近傍の時間平均流速ベクトル(計算値)

《参考文献》

- 1) OHTSU, I., YASUDA, Y. and YAMANAKA, Y. : Drag on vertical sill of forced jump, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 29, No. 1, 1991, pp. 29~47
- 2) OHTSU, I., YASUDA, Y. and YAMANAKA, Y. : Discussions 'Drag on vertical sill of forced jump', Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 30, No. 2, 1992, pp. 280~288
- 3) 保原、大宮司編 : 数値流体力学 - 基礎と応用 -, 東京大学出版会、pp. 96~101