

II-202

常流中に設置された鉛直平板に作用する圧力について

日本大学短期大学部 正 山 中 康 資

日本大学大学院 学 尾 崎 元 治

日本大学理工学部 正 安 田 陽 一

日本大学理工学部 正 大 津 岩 夫

開水路常流中に設置された鉛直平板に作用する圧力や抗力の解明は、水工構造物に作用する流体力を知るための基礎として重要である。ここでは、開水路中に鉛直薄型平板を設置した場合の平板に作用する圧力について、実験的および数値解析的に検討を行った。すなわち、単純な流入条件・境界条件のもとで、2次元非圧縮性流体のNavier-Stokesの方程式を計算し、平板に作用する圧力分布とその大きさを求めた。また、平板上・下流側の流れが常流で平板周辺の水面の変化が小さい流況(Surface jet¹⁾、図-1)における平板前・後面に作用する圧力分布とその大きさを実験的に示し、計算結果との比較を行った。さらに、計算結果が実験結果に一致するための水理条件を示した。

1. 実験による鉛直平板に作用する圧力のアスペクト比の影響

図-2に実験で得られたアスペクト比 $B/h_1 \geq 3 \sim 4$ の場合と $B/h_1 < 3 \sim 4$ の場合の平板前・後面の水路中央部に作用する流体運動による圧力(dynamical pressure) $p_{dr}/(\frac{1}{2}\rho v_1^2)$ 、 $p_{dr}/(\frac{1}{2}\rho v_1^2)$ を整理した一例を示す。

平板前面については、圧力分布形状が $B/h_1 \geq 3 \sim 4$ の場合と $B/h_1 < 3 \sim 4$ の場合とで違いが認められる。すなわち、 $B/h_1 < 3 \sim 4$ の場合、 $y/S=0.2 \sim 0.3$ 付近で極小値をもつS字型の分布形状を示すが、 $B/h_1 \geq 3 \sim 4$ の場合、S字型の分布形状を示さない。 $B/h_1 < 3 \sim 4$ の場合、平板に接近する流れが三次元的で最大流速の位置がほぼ水深の0.6倍付近にあり、平板直前に顕著な渦が常に形成されるため、圧力分布形状がS字型を示す²⁾。一方、 $B/h_1 \geq 3 \sim 4$ の場合、流れが2次的で最大流速の位置が水面付近にあり、平板直前に渦は存在するものの、その渦の形成は間欠的であり、S字型の圧力分布形状を顕著に示さない³⁾。平板後面については、圧力 $p_{dr}/(\frac{1}{2}\rho v_1^2)$ の大きさは平板を越える流線の曲率の効果のため負の値を示し、 B/h_1 に関わらずほぼ同程度の大きさを示す。これは、与えられたフルード数 $F_1(-v_1/\sqrt{gh_1})$ 、相対平板高 S/h_1 に対して、 B/h_1 に関わらず平板を越える流線の曲率がほぼ同程度であるためと考えられる。また、圧力分布形状に対する平板後方の渦の影響は小さく、直線的である。なお、本実験のレイノルズ数 $Rs(=US/\nu)$ の範囲($2000 \leq Rs \leq 15000$)では、圧力の大きさ、分布形状に対する Rs の影響は認められなかった。

2. 鉛直平板に作用する圧力の数値解析的検討

流れを2次元流と仮定し、図-3に示される流入条件・境界条件のもとで、平板前・後面および底面付近の計算メッシュを特に細かく分割し(一例として $S/h_1=0.1$ の場合を図-4に示す)、2次元非圧縮性粘性流体のNavier-Stokesの式(1)、(2)と連続の式(3)を有限要素法および流速修正法³⁾を用いて計算した。

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

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

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

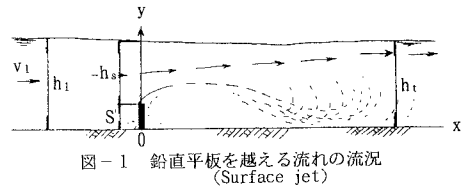


図-1 鉛直平板を越える流れの流況 (Surface jet)

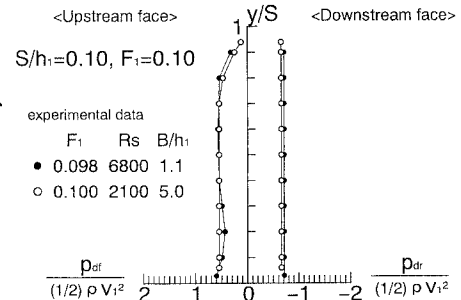


図-2 鉛直平板に作用する圧力分布 (アスペクト比の影響)

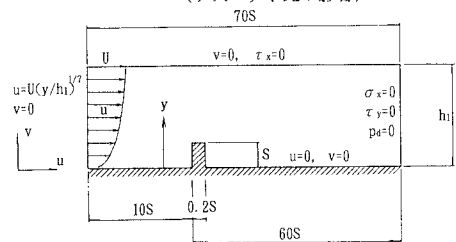


図-3 流入条件・境界条件

キーワード：流体力、数値計算、局所流、開水路流

連絡先：〒274 千葉県船橋市習志野台7-24-1 TEL・FAX 0474-69-5596

流入断面では、乱れを無視し、流速分布を1/7乗則 $(u=\{y/(h_1/S)\}^{1/7})$ 、 $v=0$ とした。底面および平板表面では $u=v=0$ （Non-Slip条件）とし、流出断面では次のように仮定した。

$$p=0, \sigma_x=-p/(2/Rs)(\partial u/\partial x)=0, \tau_y=\partial u/\partial y+\partial v/\partial x=0$$

水面に相当する領域境界は水平に固定し、次のように仮定した。

$$v=0, \tau_x=\partial u/\partial y+\partial v/\partial x=0$$

計算メッシュ数は、 $S/h_1=0.1$ の場合26600要素（図-4）、 $S/h_1=0.2$ の場合17600要素、 $S/h_1=0.3$ の場合15800要素とした。

図-5～7に $Rs=4000$ における $S/h_1=0.1$ 、 $S/h_1=0.2$ および $S/h_1=0.3$ の平板前・後面に作用する時間平均圧力（◇印）を示す。なお、圧力の値は、平板前・後面に作用する圧力の時間平均値である。図-5～7の●印は、実験から得られたアスペクト比 $B/h_1 \geq 3 \sim 4$ における平板前・後面の水路中央部に作用する流体運動による圧力 $p_{dr}/(\frac{1}{2}\rho V_1^2)$ 、 $p_{dr}/(\frac{1}{2}\rho V_1^2)$ である。

平板前面の圧力については、 $S/h_1=0.1$ 、 0.2 の場合、計算値と実験値はほぼ一致している（図-5、6）。 $S/h_1=0.3$ の場合、平板上部を除き計算値は実験値とほぼ一致している（図-7）。なお、計算で得られた流入断面における水深方向の圧力は、実際の圧力（静水圧）にほぼ一致する。平板後面の圧力については、 $S/h_1=0.1$ の場合、計算値と実験値は一致している（図-5）。 S/h_1 が大きくなると、計算値は弓形の分布形状を示すが、実験値とはほぼ一致している（図-6、7）。なお、 $S/h_1=0.4$ の場合、平板前・後面の圧力ともに計算値と実験値は大きな差がある。

図-8は、平板に作用する抗力係数 $Cd(=P/(\frac{1}{2}\rho V_1^2 \cdot S))$ について、実験値（ $(Cd)_x$ ）と計算値（ $(Cd)_{cal}$ ）を比較したものである。図-8より、 $S/h_1=0.1$ 、 0.2 、 0.3 ともに Cd の実験値と計算値はほぼ一致しているが、 $S/h_1=0.4$ の場合は一貫しない。

なお、 $Rs=8000$ の場合の平板に作用する圧力および抗力係数 Cd は、 $Rs=4000$ の場合とほぼ同様の傾向を示す。

3. ま と め

平板に作用する圧力分布とその大きさおよび抗力係数 Cd が、単純な流入条件・境界条件のもとで2次元非圧縮性流体のNavier-Stokesの方程式から計算され、レイノルズ数 $4000 \leq Rs \leq 8000$ 、アスペクト比 $B/h_1 \geq 3 \sim 4$ 、相対平板高 $0.1 \leq S/h_1 \leq 0.3$ の範囲で実験結果とほぼ一致する結果が得られた。

終わりに、本数値計算を行うにあたりご指導を賜った日本大学短期大学部 畑中勝守専任講師 に心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Ohtsu, I., Yasuda, Y. and Yamanaka, Y.: Discussion of 'Submerged flow regimes of rectangular sharp-crested weirs', Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 10, October, 1997, pp. 927~929.
- 2) 山中、大津：常流中の鉛直平板に作用する圧力の特性、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集、第2部、1996年9月、pp. 270~271.
- 3) Kawahara, M., Yoshimura, N., Nakagawa, K. and Osaka, H. (1976). "Finite element analysis of density flow using the velocity correction method.", Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol. 5, 981-993.

記 号

B : 水路幅 Cd : 平板に作用する抗力係数 F_1 : 平板上流のフルード数
 h_1 : 平板上流側の水深(計算領域の高さ) h_s : 平板上の水深 p_s : dynamical pressure
 P : 平板に作用する抗力 $p_t(=p_s/\rho U^2)$ p_{dr} : (p_t-p_s) p_{dr} : (p_t-p_s)
 p_{dr} , p_{dr} : 平板前・後面の水路中央部の y の位置に作用する圧力
 p_s : 平板設置位置の静水圧($=w(h_s+S-y)$) Rs : レイノルズ数 S : 平板高
 t : 無次元時間($=Ut/S$) u : $(=u/U)$ U : 平板上流の断面最大流速 v : $(=v/U)$
 v_1 : 平板上流の断面平均流速 y : 水路床からの高さ x : $(=x/S)$ y : $(=y/S)$



図-4 計算メッシュ図 ($S/h_1=0.1$)

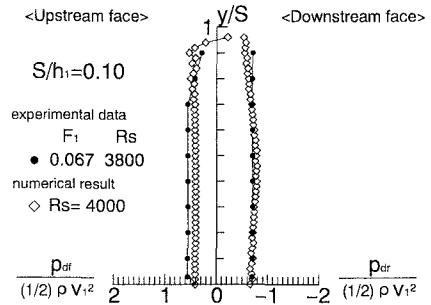


図-5 鉛直平板に作用する圧力分布 ($Rs=4000$, $S/h_1=0.1$)

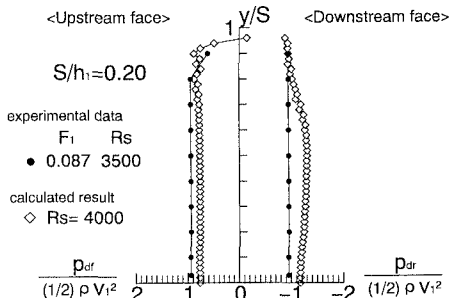


図-6 鉛直平板に作用する圧力分布 ($Rs=4000$, $S/h_1=0.2$)

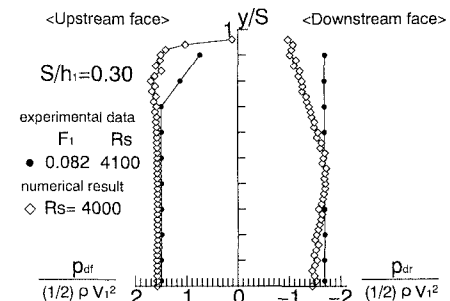


図-7 鉛直平板に作用する圧力分布 ($Rs=4000$, $S/h_1=0.3$)

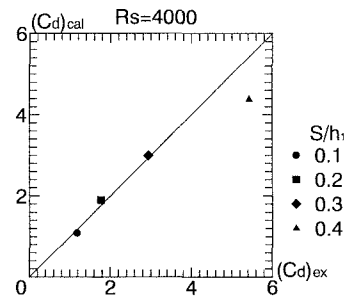


図-8 平板に作用する抗力係数 Cd の実験値と計算値の比較