

II-318 鉛直平板に作用する圧力の分布形状について

○ 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

筆者らは、強制跳水中に設置された鉛直連続シル前面に作用する圧力分布がS字型の形状を示すことを見いだした¹⁾。さらに、常流中および射流中に設置された鉛直連続平板前面に作用する圧力分布もS字型の形状を示すことが確認されている^{2), 3)}。ここでは、常流中に設置された鉛直連続平板前面に作用する圧力分布形状について実験的に検討し、これと有限要素法による流れ解析より得られた結果を比較し、平板前面の圧力分布形状がS字型になる理由の定性的説明を行った。

1. 実験

長方形断面水平水路(幅40cm×高さ40cm×長さ640cm)に長方形鉛直連続平板(厚さ1.0cm×高さ3.0cm×長さ40cm)を設置し、平板前面の中央に圧力取り出し孔を設け、それにマンメーターを接続し圧力を測定した。水面形状の一例を図-1に示す。

1-1. 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圧力(流体運動による圧力) p_d (motion pressure or dynamical pressure)を式(1)の關係で整理した一例を図-2に示す。

$$p_d / (1/2) \rho v_1^2 = f(y/S, S/h_1, F_1, Re) \quad (1)$$

ただし、 $p_d = p_t - p_s$, $p_s = w(h_0 + S - y)$

ここに、 v_1 は平板上流の平均流速、 ρ は水の密度($=w/g$)、 y は水路床からの高さ、 S は平板高、 h_1 は平板上流の水深、 F_1 はフルード数($=v_1/\sqrt{g h_1}$)、 Re は流れのレイノルズ数($=v_1 S/\nu$)、 ν は動粘性係数($=\mu/\rho$)、 p_t は平板前面に作用する圧力、 p_s は静水圧、 h_0 は平板設置位置の水深である。

圧力分布は、 $y/S=0.6$ 付近で極大値、 $y/S=0.2$ 付近で極小値をとるS字型の形状を示すことが確認される。なお、強制跳水中のシル前面および射流中の平板前面に作用する圧力についても、 $y/S=0.65 \sim 0.75$ で極大値、 $y/S=0.25 \sim 0.35$ で極小値をとるS字型の形状を示すことが確認されている(図-3)^{1), 3)}。

1-2. 鉛直平板前方の流れ

従来の研究によると、強制跳水中の鉛直シル前方の流れの流況は図-4のように示される¹⁾。すなわち、鉛直シルに接近する主流は、シル前方 $x'/S=0.9 \sim 1.2$ 付近(A点)から剥離し、その流線は下に凸型となる。ここに、 x' はシル前面から上流方向への距離である。また、シル前方 $x'/S < 0.9 \sim 1.2$ における三角形の領域(三角形ABCの領域)で渦が形成される。よって、鉛直シル前方の流れの流況は、主流とシル直前の渦とに分けられ、シル前面の $y/S=0.7 \sim 0.8$ 付近(C点)でよどみ点が生じる。なお、このよどみ点(C点)では、圧力が極大になるものと考えられる。したがって、圧力分布がS字型の形状を示すのは、このよどみ点とシル直前に形成される渦のためと考えられる。なお、常流中の鉛直平板前方の流れの流況についても、強制跳水中の鉛直シルの場合と同様の傾向があることが実験より確認されている²⁾。

2. 数値解析

2-1. 基礎方程式と境界条件

鉛直平板を越える流れを数値解析に解くための基礎方程式として、2次元非圧縮性粘性流体のNavier-Stokesの式(2)、(3)と連続の式(4)を用いる。

$$\partial u / \partial t + u(\partial u / \partial x) + v(\partial u / \partial y) + \partial p / \partial x - (1/Re)(\partial^2 u / \partial x^2 + \partial^2 u / \partial y^2) = 0 \quad (2)$$

$$\partial v / \partial t + u(\partial v / \partial x) + v(\partial v / \partial y) + \partial p / \partial y - (1/Re)(\partial^2 v / \partial x^2 + \partial^2 v / \partial y^2) = 0 \quad (3)$$

$$\partial u / \partial x + \partial v / \partial y = 0 \quad (4)$$

ここに、 x, y は無次元座標値($=x^*/S, y^*/S$)、 u, v は x, y 方向の無次元流速($=u^*/U, v^*/U$)、 p は無次元圧力($=p^*/\rho U^2$)、 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 は初期流入流速、 $*$ は有次元量を示す。数値計算方法は、非定常問題に関する逐次時間積分法として流速修正法⁴⁾を用いた。

本数値解析で用いた境界条件を図-5に示す。

2-2. 計算結果

2-2-1. 鉛直平板前方の流れの流況

レイノルズ数 $Re=5000$ 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 x, 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10~20間の時間平均値である。なお、図中のベクトルの大きさは $\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}$ から計算されたものである。

図-6より、鉛直平板に接近する主流は、平板前方 $x'/S=2.5$ 付近から剥離し、その流線は下に凸型となる傾向が認められる。また、平板前方 $x'/S < 2.5$ における三角形の領域で渦が形成され、平板前面の $y/S=0.7$ 付近でよどみ点が生じていることが認められる。よって、数値計算より得られた平板前方の流れの流況は、実験で得られた常流中の平板前方の流れの流況、強制跳水中のシル前方の流れの流況(図-4)と同様の傾向を示すことが確認された。

2-2-2. 鉛直平板前面の圧力分布

レイノルズ数 $Re=3000, 5000$ における鉛直平板前面に作用する圧力(dynamical pressure)の時間平均値 $\bar{p}_d$ を式(5)の関係で整理したものを図-7に示す。なお、圧力の時間平均値は無次元時間10~20間の時間平均値である。

$$\bar{p}_d / (\bar{p}_d)_{\max} = f(y/S, S/h_1, F_1, Re) \quad (5)$$

ここに、 $(\bar{p}_d)_{\max}$ は平板前面に作用する圧力の時間平均最大値(よどみ点の圧力)である。

図-7より、平板前面の圧力分布は、 $y/S=0.7$ 付近で極大値、 $y/S=0.3$ 付近で極小値をとるS字型の形状を示し、実験結果と同様の形状を示すことが確認される。

3. ま と め

以上から、2次元非圧縮性粘性流体のNavier-Stokesの式(2)、(3)および連続の式(3)を直接有限要素法で数値解析することにより得られた平板前方の流れの流況は、実験で得られた常流中の平板前方の流れの流況、および強制跳水中のシル前方の流れの流況と同様の傾向を示すことが定性的に確認された。また、数値計算より得られた平板前面に作用する圧力分布は、定性的に実験結果とほぼ同様のS字型の形状を示すことが確認された。したがって、平板前面に渦が形成され、平板前面の高さ $y/S=0.7$ 付近によどみ点が生じ、さらに平板前面の圧力分布がS字型の形状を示す必然性が数値解析からも確認されたものと考えられる。

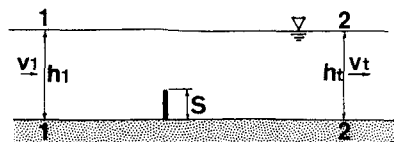


図-1 常流中に設置された鉛直平板を越える流れの水面形状

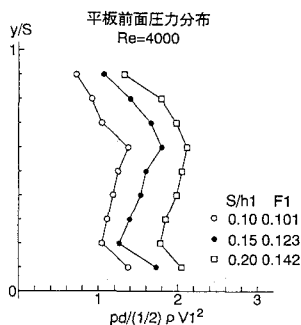


図-2 常流中の鉛直平板前面に作用する圧力分布（実験値）

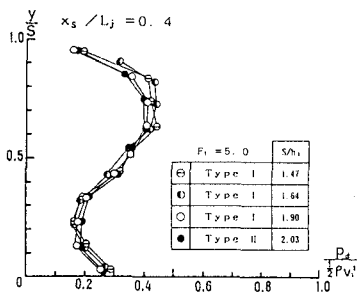


図-3 強制跳水中の鉛直シル前面に作用する圧力分布（実験値）

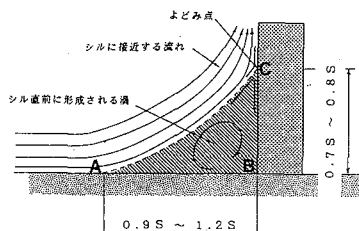


図-4 強制跳水中の鉛直シル前方の流れの内部流況（概念図）

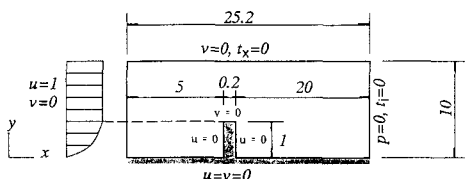


図-5 数値解析で用いた境界条件

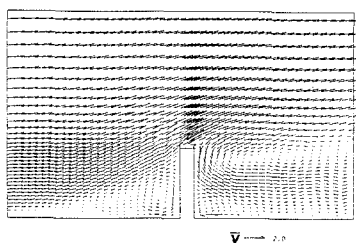


図-6 鉛直平板近傍の時間平均流速ベクトル（計算値）

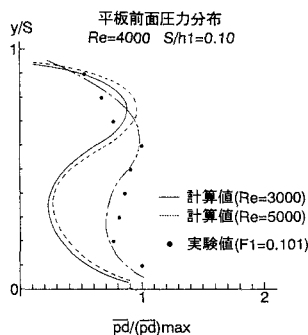


図-7 鉛直平板前面に作用する圧力分布形状（計算値と実験値）

《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) 栗津、大津、山中 : 常流中に設置された鉛直平板に作用する抗力、土木学会第42回年次学術講演会、昭和62年9月、pp. 322~323
- 3) 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
- 4) 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