1907 空気充填空洞における長方形水流路の圧力損失特性 Characteristics of Pressure Loss of Water Flow in Cavity of Rectangle Pipe

○学 村尾 昌紀 (青学大) 学 完戸 岳浩 (青学大院)
正 姜 東赫 (青学大) 正 横田 和彦 (青学大)

Masanori MURAO, Aoyama Gakuin University, 5-10-1 Fuchinobe, Chuo-ku, Sagami-hara
Takahiro SHISHIDO, Graduate School, Aoyama Gakuin University, 5-10-1 Fuchinobe, Chuo-ku, Sagami-hara
Donghyuk KANG, Aoyama Gakuin University, 5-10-1 Fuchinobe, Chuo-ku, Sagami-hara
Kazuhiko YOKOTA, Aoyama Gakuin University, 5-10-1 Fuchinobe, Chuo-ku, Sagami-hara

The pressure loss characteristics were investigated for the water flow with the water and the air cavities in the rectangular duct. The pressure loss coefficients obtained by the experiments were compared with the total loss based on the typical minor losses. The semi-empirical losses of the friction, the sudden expansion, the sudden contraction and the hydraulic jump are considered as the typical minor losses. The semi-empirical total losses show differences of 24-27% from the experimental ones. For the case with the air cavity, the hydraulic jump loss increases as the Reynolds number increases. At relatively low Re , the loss coefficients with the air cavity become lower than those with the water cavity. On the other hand, at relatively high Re , the ones with the air cavity are almost same as those with the water cavity.

Key Words: Cavity Flow, Pressure Loss Coefficient, Hydraulic Jump

1. 諸論

エネルギー資源の有限性から、省エネルギーは常に最重要課題の一つと見なされてきた。流体輸送において省エネルギーを実現する方法の一つとして、流動損失の低減が挙げられる。そして流動損失低減法を研究開発する前段階として、流動損失の把握が重要な課題となる。流動損失のうち摩擦損失以外の損失は、流路の形状に起因する損失であり局所損失(minor loss)と呼ばれている。代表的なものとして、急拡大損失、急縮小損失、ディフューザ損失、バンド・エルボー損失が知られており、半経験的(半理論的)な計算式が存在する。複雑な形状の流路を含む管路系全体の損失は、流路を代表的な形状でモデル化し、摩擦損失と各種の局所損失の和で代用し、補正されたものが用いられ実用的には一定の効果を上げている。一方で、より複雑な形状の流路に対して、より予測精度の高い計算法の開発も期待されており、様々な形状の流路に対する損失に関する研究も行なわれている。

本研究では、流路途中にキャビティを持つ流路について、その圧力損失特性を実験的に調べることにした。これは、急拡大流路と急縮小流路の組み合わせと見なす事が出来るので、実験の結果と、これらの損失の重ね合わせとを比較検討して、流路損失予測の精度を検討することにした。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図1に示す。回流水槽となっている。矩形ダクトはアクリル製で、断面は一辺 $D=50\text{mm}$ の正方形ダクトに、幅 $D=50\text{mm}$ 、高さ $2D$ 、長さ $20D$ のキャビティ部からなる。キャビティ上流部及び下流部の長さがそれぞれ $25D$ である。キャビティ上部には空気注入口を設け、キャビティに空気を注入する事が出来る様になっている。

キャビティ上流端を $x=0$ として、 $x=-1D$ 、 $45D$ の位置に圧力測定孔を設け(それぞれ p_1 、 p_2 とする)、差圧変換機 PD-100GA ((株)共和電機)によって圧力差を測定した。ポンプ回転数をインバータ制御することにより流量を制御し、流量計 RHStyle (大阪フローメーター株式会社)により流量を計測した。水温は、温度計 AD-5624 ((株)エー・アンド・ディー)によって測定した。

本研究では、キャビティに水を満たした場合(以下、水キャビティ)、キャビティに空気を満たした場合(以下、空気キャビティ)の2つのケースについて、実験を行った。

Fig.1 Experimental apparatus

3. 実験結果およびその考察

以下に用いる、レイノルズ数における代表流速及び代表長さは正方形流路の断面平均流速 U_R 及び正方形流路の相当直径(等価直径) D として、

$$Re = U_R D / \nu \quad (1)$$

で計算した。

図2に、空気キャビティの場合のキャビティ内の水面挙動の写真を示す。図2(a)は静止状態で、 Re の増加に伴って、図2(b)のように拡大部($x=0$)から盛り上がるように流れる(①)。 $Re=5.0 \times 10^4$ を過ぎると(c)のように拡大部から射流となり、下流で跳水が生じる(②)。この Re では跳水してもキャビティ上部まで水は届いていない。 Re が増加して $Re=6.6 \times 10^4$ 程度になるとキャビティ部上部に水が届く様になる。更に Re が増加すると、キャビティの空気は下流へ流される様になり、空気量が低くなると共に、射流長さが短くなる。なお、 $Re \geq 5.8 \times 10^4$ 以降では、空気注入または排出により射流長さが $x=10D$ となるように調節した(d)。

Fig.2 Test section for air cavity

次に、圧力損失特性を調査するために、損失係数を調べた。損失係数の実験値は、次式で計算した。

$$\lambda = (p_1 - p_2) / \frac{1}{2} \rho U_k^2 \quad (2)$$

ここで、一般的な流体力学の教科書に掲載されている摩擦損失や各種の局所損失の計算式は、理論的に導出した数学的形式に、実用に堪える様の実験によって係数などの補正を加えたものであるから、半経験式である。そこで本研究では、これらに基づいて計算した損失和の値を半経験値と呼ぶことにする。

キャビティは急拡大部と急縮小部で構成されていることから、局所損失としては、急拡大損失、急縮小損失を考慮し、これらの和を半経験値とした。また空気キャビティの場合には更に跳水損失を加えた。これらの損失の詳細については、参考文献(1)および(2)を使用したの、そちらを参照されたい。

図3に、水キャビティにおける圧力損失係数の実験値と半経験値のグラフを示す。水キャビティでは、 Re の影響はあまり見られない。また実験値と半経験値の差は24~27%であり、流路損失として半経験値を使用する場合にはこの程度の誤差が含まれている事を考慮する必要がある。また、 Re の増加に伴って、損失係数はわずかに減少している。急拡大損失と急縮小損失は Re によらずほぼ一定と考えられるので、摩擦損失係数の挙動に起因した為である。

図4に、空気キャビティにおける圧力損失係数の実験値と半経験値のグラフを示す。図4を見ると、実験値と半経験値はほぼ同じ挙動を示している。 $Re=5.0 \times 10^4$ 付近から $Re=9.7 \times 10^4$ 付近までともに右上がりになっている。図2で説明した様に、 $Re > 5.0 \times 10^4$ でキャビティでは射流と跳水が生じており、また図4での跳水損失の半経験値もこの範囲で Re が上がるにつれ著しく上昇している。従って、跳水損失の増加により全体の損失が増加すると考えられる。つまり高レイノルズ数では、跳水損失の割合が大きくなる。

図3と図4を比べると、 $Re \leq 8.0 \times 10^4$ では、空気キャビティは水キャビティに対して損失が小さくなっている。一方、 $Re \geq 8.0 \times 10^4$ では、空気キャビティと水キャビティの損失はほぼ同じくらいである。

Fig.3 Loss coefficients for water cavity

Fig.4 Loss coefficients for air cavity

4. 結論

- (1) キャビティにおける損失は、急拡大損失、急縮小損失の和とは、25%程度の差がある。
- (2) 空気キャビティでは高レイノルズ数になるにつれ跳水損失が占める割合が大きくなる。
- (3) $Re \leq 8.0 \times 10^4$ では、空気キャビティの損失は小さくなるが、 Re が大きくなると、空気キャビティ及び水キャビティの圧力損失はほぼ同じになる。

参考文献

- (1) 佐藤恵一・ほか3名、流れ学 (2009)、朝倉書店
- (2) 古屋善正・ほか2名、流体工学 (1967)、156、朝倉書店