

II-161

流出渦の発生と液体の粘性について

山梨大学大学院 学生員 ○本多 重徳
 水資源開発公団 正 員 吉本 尚樹
 山梨大学工学部 正 員 荻原 能男

1. はじめに

ダム、貯水池、水槽から管路により取水する際に、管路の入り口の部分に流出渦という回転流が発生する。この流出渦は、水面に窪みが発生する「窪み渦」と、水面が窪んで空気が流出口に吸い込まれる「空気吸い込み渦」とに分けられる。本研究では、液体の粘性を変えて実験を行い、実験結果をもとに、半径方向レイノルズ数、半径方向フルード数を用いて発生限界を推定し、それをもとに液体の粘性の流出渦への影響を検討した。

2. 流出渦の発生を示す無次元数

まず、半径方向の流速を考える場合、窪み渦の場合は表面流速、空気吸い込み渦の場合は平均流速の影響が大きいと考えられ、それぞれの流速は以下のように表される。

図-1のように、管の外側では水面はほぼ水平である。そこで管内への流入量を Q とすると、半径方向の平均流速 u_m 、表面流速 u_s は次式により与えられる。

$$u_m = -\frac{Q}{2\pi r h} \quad (r \geq r_0) \quad (1) \quad u_s = -\frac{Q}{2\pi} \frac{r}{(r^2 + h_0^2)^{3/2}} \quad (2)$$

となる。よって、半径方向レイノルズ数は、以下になる。

平均流速を用いた場合

$$r \geq r_0 \text{ のとき } R_{r1} = -\frac{u r}{\nu} = -\frac{Q}{2\pi h \nu} \quad (3)$$

となる。表面流速を用いた場合、

管の中心から $h/\sqrt{2}$ 離れたところの半径方向レイノルズ数は、

$$R_{r2} = \frac{Q}{4\pi \nu h} \left(\frac{2}{3} \right)^{3/2} \left(r = \frac{h}{\sqrt{2}} \right) \quad (4)$$

半径方向フルード数の場合は、平均流速を用いた場合は、

・管の中心から r_0 離れたところ(管の縁)の半径方向フルード数

$$F_{rr1} = \frac{Q}{2\pi r_0 h \sqrt{g r_0}} \quad (r = r_0) \quad (5)$$

・管の縁の半径方向フルード数

$$F_{rr2} = \frac{Q}{2\pi r_0 h} \frac{1}{\sqrt{g h}} = \frac{u_0}{\sqrt{g h}} \quad \left(u_0 = \frac{Q}{2\pi r_0 h} \right) \quad (6)$$

となる。表面流速を用いた場合、

管の中心から $h/\sqrt{2}$ 離れたところ半径方向フルード数

$$F_{rr3} = \frac{4\sqrt{2} Q}{3\sqrt{2} \pi \sqrt{g} h_0^{2.5}} \left(r = \frac{h}{\sqrt{2}} \right) \quad (7)$$

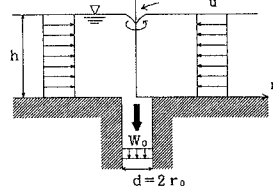


図-1 座標系

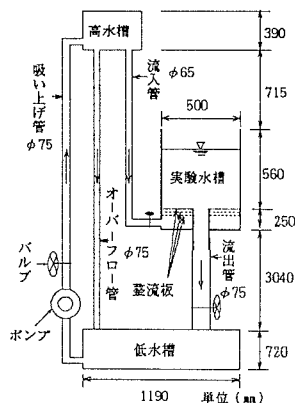


図-2 実験装置

3. 実験装置および実験方法

実験装置は図-2に示すように高水槽、低水槽、実験水槽を管路で結んだものである。水槽底面の中央から鉛直下方に流出管を出し流出渦を発生させるようにしてある。高水槽から実験水槽の横に液体を補給し3枚の整流板により一様に流入するようにした。液体は低水槽→高水槽→実験水槽→低水槽と循環させた。流出管の内径は4.94cm、3.94cm、3.01cmの3種類が設置できるようにした。今回の実験に用いた液体は、水とベントナイトの混合液である。ここでは水とベントナイトの混合割合を変えることによって液体の動粘性係数を変化させた。諸物理量は、「窪み渦」、「空気吸い込み渦」発生時に水深、流量、水温、動粘性係数、重量濃度を測定した。

4. 実験結果

流出渦は水深が浅くなると発生しはじめ、最初に窪み渦が発生しはじめ、さらに水深が浅くなると空気吸い込み渦が発生する。このことからわかるように、窪み渦、空気吸い込み渦ともにその発生領域の中で最も水深が深いところが存在する。ここでは、この状態を「発生限界」とし、またこの時の水深を「発生限界水深」とする。

(1) 流出渦の発生限界

流出渦の発生には慣性力、粘性力、重力の影響が大きいと考えられる。そこでここでは、これらの力の比を表した無次元数として、特性方程式にも関係している半径方向のレイノルズ数 R_r 、半径方向フルード数 F_{rr} を用いて流出渦の発生限界を推定した。今回の実験結果をまとめた

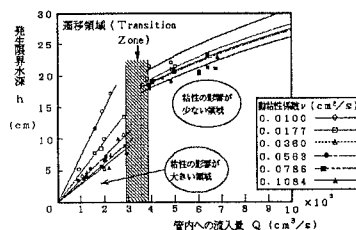


図-3 窪み渦の発生限界(管径4.94cm)

ものが図-3~4である。図中の点は発生限界の点をプロットしたもので、線は発生限界を示しており、線の左上の領域では渦は発生せず、右下の領域で渦は発生する。発生限界の際の、 R_{r2} または F_{rr3} を調べた結果、窪み渦においては、 $Q < 2900$ での R_{r2} 、 $Q > 3800$ での F_{rr3} 、空気吸い込み渦においては、 R_{r1} 、 F_{rr1} が、ほぼ一定の値をとることがわかった、つまり、 R_{r1} または F_{rr1} がある値より大きくなった場合に流出渦が発生するというのである。空気吸い込み渦の場合は図-4からわかるように粘性の影響を受けているということからも、発生限界の推定には、無次元数に動粘性係数が含まれている R_{r1} を用いたほうが妥当である。以上より発生限界の際の R_{r1} (式(3),(4))、 F_{rr1} (式(7))の式を変形すると、水深と流量の関係は以下になる。

$$\text{・ 窪み渦} \quad h = \frac{1}{4\pi\nu R_{r2}} \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{3}{2}} Q \quad (Q < 2900) \quad (4')$$

$$h = \left(\frac{4\sqrt{2}Q}{3\sqrt{2}\pi\nu\sqrt{g}F_{rr3}} \right)^{0.4} \quad (Q > 3800) \quad (7')$$

$$\text{・ 空気吸い込み渦} \quad h = \frac{Q}{2\pi\nu R_{r1}} \quad (3')$$

(2) 流出渦への粘性の影響

窪み渦の場合は、管内への流入量が小さい範囲では粘性の影響を受けて発生限界水深が浅くなり、管内への流入量が大きい範囲では粘性が変化しても発生限界水深はあまり変化しない。この粘性の影響が大きい領域から小さい領域に移る領域で粘性の影響による遷移領域(Transition Zone)が存在する。図-3を例に考えてみると、管の中心から $h/\sqrt{2}$ 離れたところでは $Q < 2900$ においては半径方向レイノルズ数が一定になっており、 $Q > 3800$ になると半径方向レイノルズ数は一定にはならず少しずつ増加する、一方で半径方向フルード数が一定になっている。これは、流量が小さい場合は慣性力と粘性力の影響が大きく、流量が大きくなると粘性力に対して慣性力の影響が大きくなり、慣性力と重力が影響しているということである。 $Q > 3800$ での粘性の影響を表したものが図-6である。半径方向フルード数は、慣性力と重力の影響を考えたものであるから、粘性の影響を受けていればその値も変化すると考えられる。ここでは、粘性が大きくなってもその値にあまり変化していない。つまり、 $Q > 3800$ においてはあまり粘性の影響を受けていないということである。空気吸い込み渦の場合は、図-4からわかるように粘性が大きくなるにつれて発生限界水深が浅くなる。また窪み渦にみられたような遷移領域は今回の実験の範囲においてはみられない。

4. まとめ

本研究では、液体の粘性を変えて実験を行い、それをもとに、流出渦の発生限界の推定、流出渦への液体の粘性の影響について検討した。それをまとめると、以下になる。

1) 発生限界の推定

- ・ 窪み渦 $Q < 2900$ においては半径方向レイノルズ数、 $Q > 3800$ においては半径方向フルード数を用いて発生限界を定められる。
- ・ 空気吸い込み渦 半径方向レイノルズ数を用いて定められる。

2) 流出渦への液体の粘性の影響

- ・ 窪み渦($Q < 2900$)、空気吸い込み渦ともに粘性が大きくなると水深が浅くなる。
- ・ 窪み渦は $Q > 3800$ においてはあまり粘性の影響を受けない。
- ・ 窪み渦においては粘性の影響による遷移領域が存在する。

【参考文献】

- 1) 荻原能男：流出渦の発生と液体の粘性について，土木学会水工学論文集 第37巻，1992年3月
- 2) 荻原能男：空気吸い込み渦に関する研究，土木学会論文報告集 第215号，1973年7月，pp.15~25
- 3) 荻原能男：空気吸い込み渦の発生を示す新たな係数の提案，日本機械学会論文集 B編59巻559号，1993年3月，pp.32~37
- 4) 奥村幹男：液体の粘性を考慮した流出渦に関する研究，修士論文，1992年2月
- 5) 吉本尚樹・荻原能男・野村浩正：空気吸い込み渦に関する研究，土木学会第49回年次学術講演会論文集，1994年9月，II-177，pp.354~355

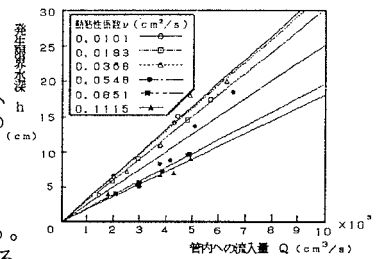


図-4 空気吸い込み渦の発生限界
(管内径3.94cm)

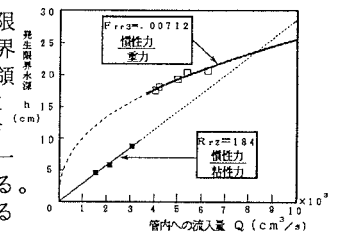


図-5 窪み渦の発生限界
管内径3.94cm
動粘性係数0.0836cm²/s

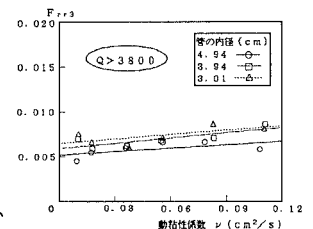


図-6 F_{rr1} と動粘性係数の関係