

## 遡上流れに置かれた円柱に作用する抗力特性

防衛大学校建設環境工学科 正会員 ○大井邦昭  
 防衛大学校建設環境工学科 正会員 多田 毅  
 防衛大学校建設環境工学科 正会員 林建二郎

### 1. 目的

洪水流やダムや堤防の決壊流れ、および津波・高潮の来襲による非定常な遡上流れによる構造物や植生・樹木等に作用する流体力特性の把握は、これら柱状物体が有する耐流特性や抵抗則の評価において重要である。一様流速分布を有する定常流中の静止物体に作用する流体力特性の把握に比べて、自由表面や底面境界を有する開水路流れに置かれた3次元物体である柱状体に作用する流体力特性の把握は不十分である。本研究は、開水路中に非水没状態で鉛直設置した円柱に作用する抗力の計測評価を、常流と射流域で行ったものである。

### 2. 実験方法

実験には、長さ40m、幅0.8m、高さ1mの回流装置付き2次元水槽内の一部4m区間を嵩上げた水平床の開水路を用いた。本開水路に広幅堰を設けその下流に射流を発生させた。広幅堰を取り除き常流の擬似等流を発生させた。開水路幅の中央に外径 $D=3\text{cm}$ 、長さ30cmの亚克力パイプ製円柱を鉛直設置した。本直円柱の上端を3分力計に設置し、円柱に作用する全抗力 $F_x$ を計測した。円柱パイプの一箇所に圧力計を設置し、円柱を回転し円柱表面の圧力分布を計測した。圧力孔の位置は水路床面から上方4cmである。

レーザー流速計と超音波水位計を用いて、直円柱の真横27cmの位置で水深方向流速分布と代表水深 $H$ を計測した。流れ水深 $d$ の4割の位置での流速を断面平均流速 $U_m$ とし、代表主流速とした。実験に用いた $Fr$ 数 $(=U_m/(gd)^{1/2})$ の範囲は0.5~3である。水深と円柱径の比 $H/d$ は1.25~4である。

### 3. 結果および考察

流れの $Fr$ 数と全抗力 $F_x$ が作用する非水没円柱の全抗力係数 $C_d$ を(1)式、(2)式で定義する。

$$F_r = U_m / (gd)^{0.5} \quad (1)$$

$$C_d = 2F_x / (\rho g d D U^2) \quad (2)$$

式中、 $U$ =代表主流速度、 $g$ =重力加速度、 $\rho$ =水の密度である。円柱径 $D$ と水深 $d$ の積 $Dd$ は、水中にある円柱部の投影面積である。代表主流速 $U$ は、床面から約 $0.4d$ の高さに主流速の時間平均値である。

開水路中に置かれた非水没円柱の全抗力係数 $C_d$ と $Fr$ 数の関係を $d/D$ をパラメーターとして図-1に示す。図中には、 $d/D=2.5$ のHsiehの実験結果<sup>1)</sup>を緑実線で示す。本実験値の水深・円柱径比が小さい $d/D=1.1\sim 4.5$ の場合においては、 $Fr=0.5\sim 0.8$ 付近でHsiehの結果と同様にピーク値を示している。Hsiehはこのピーク値の出現は造破抵抗に起因すると指摘している。

一方、本実験値の $d/D=4.5\sim 35$ の場合においては、このようなピーク値の出現は認められない。 $Fr > 1$ となる射流領域では $C_d < 1$ となり、 $Fr$ の増加に伴い減少している。この原因としては、 $Fr > 1$ となる射流中に置かれた非水没円柱の背面では、円柱後流渦による圧力低下により水位低下が生じ、大気と接する円柱背面積部分(=空洞部)が相対的に増える結果と考えられる。 $Fr=\sqrt{2}$ になると、円柱後縁空洞部の厚さは床面に達する。

非水没円柱まわりの流況の概略図を図-2に示す。流れのよどみ点となる円柱前縁部では、動圧 $\rho=u^2/2$ の増加が生じる結果、水表面は盛り上がる。盛り上がり高さを $\alpha U_m^2/(2g)$ とすると $\alpha$ は約1以下である。

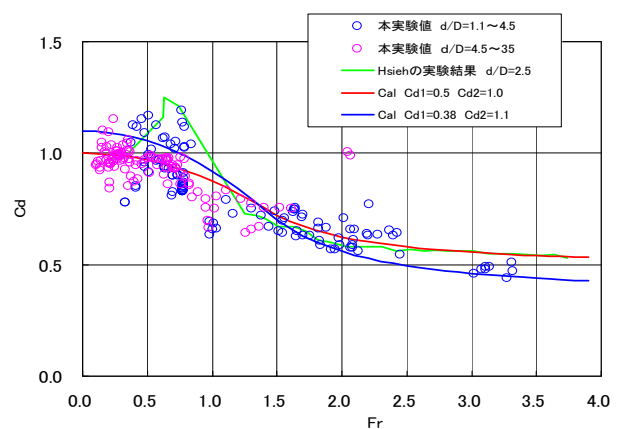


図-1 開水路中の非水没円柱の全抗力係数 $C_d$ と $Fr$ 数

キーワード 円柱 抗力係数 射流 フルード数 圧力分布 空洞域

連絡先 〒239-8686 横須賀市走水1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 TEL 046-841-38 10 E-mail: hayashik@nda.ac.jp

一方、円柱表面からの境界層剥離により円柱後面部には、渦流を含む死水領域が生じ、圧力  $p$  は減少し、円柱後方の後流域での水面は低下する。円柱後縁部で低下高さを  $\beta u^2/(2g)$  とすると、垂臨界領域の流れにおいては、 $\beta \approx 1.2$  である。 $Fr = \sqrt{2}$  になると、円柱後縁空洞部の厚さ ( $=d \times Fr^2/2$ ) は床面に達する。

$Fr=0.53$  における非没水円柱まわりの圧力分布例を図-3 に示す。図中に示す  $C_p$  は、(2)式で示される圧力係数であり、円柱表面圧力  $p$  を主流部の圧力  $p_0$  と主流速度  $U$  を用いて無次元化したものである。

$$C_p = (p - p_0) / (0.5\rho U_m^2) \quad (2)$$

図中には、剥離渦が生じないポテンシャル流れの  $C_p$  の分布を黒色実線で、一様流中に円柱を設置した場合の  $C_p$  の分布を赤色の×印で示している。

図中の B) は、空洞部の中間位置(高さ)での  $C_p$  の分布を示している。この  $C_p$  を円柱表面周りに積分して求めた局所抗力係数は  $C_{ds} = 0.71$  であった。C) は円柱後面空洞部の自由水面の位置(高さ)での  $C_p$  の分布を示している。この  $C_p$  を円柱表面周りに積分して求めた局所抗力係数は  $C_{d2} = 1.1$  であった。

主流の水面  $z=0$  で計測した局所抗力係数を  $C_{d1}$  とする。円柱後縁の空洞部の水面およびその下方の水没部で計測した局所抗力係数を  $C_{d2}$  とする。空洞部区間での局所抗力係数  $C_{ds}$  は、水深方向に  $C_{d1}$  から  $C_{d2}$  へと直線変化する。これら局所抗力係数  $C_{ds}$  を水深方向に積分すると、円柱没水部の全抗力係数  $C_d$  は、(3)、(4)式で示される<sup>2),3)</sup>。

$$0 < Fr < \sqrt{2} \quad C_d = (C_{d1} - C_{d2}) Fr^2/4 + C_{d2} \quad (3)$$

$$\sqrt{2} < Fr \quad C_d = C_{d1} + (C_{d2} - C_{d1}) / Fr^2 \quad (4)$$

円柱没水部の全抗力係数  $C_d$  の、(3)、(4)式による計算値と、実測値の比較を図-1 に示す。図中、赤・青色実線で示す本モデル式は、 $Fr$  数の増加に伴い全抗力係数  $C_d$  が減少する特性を、上手く評価している。

ダム決壊に伴う遡上流れに置かれた円柱<sup>3)</sup>の  $C_d$  と  $Fr$  数の関係を図-4 に示す。図中には、図-1 で得られた  $d/D=3$  の定常流中に置かれた円柱の  $C_d$  と  $Fr$  数の関係を白丸印で示す。両者の一致はほぼ良好である。

参考文献

- 1) Hsieh, T.: Resistance of cylindrical piers in open-channel flow, ASCE, Vol.90, No. HY1, pp. 447-465, 1964.
- 2) 林建二郎, 浅野敏之, 多田 毅, 寺本行芳: 海岸林に作用する流体力と抵抗則評価, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 68, No. 2, pp. I114-I119, 2012.
- 3) 林建二郎: 柱状物体に作用する遡上流れの流体力評価, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 69, No. 2, 2013.

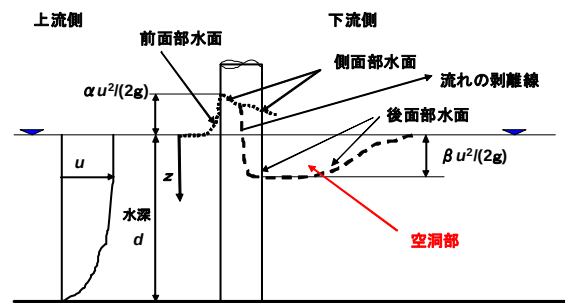


図-2 定常流れにおける非水没円柱まわりの流況

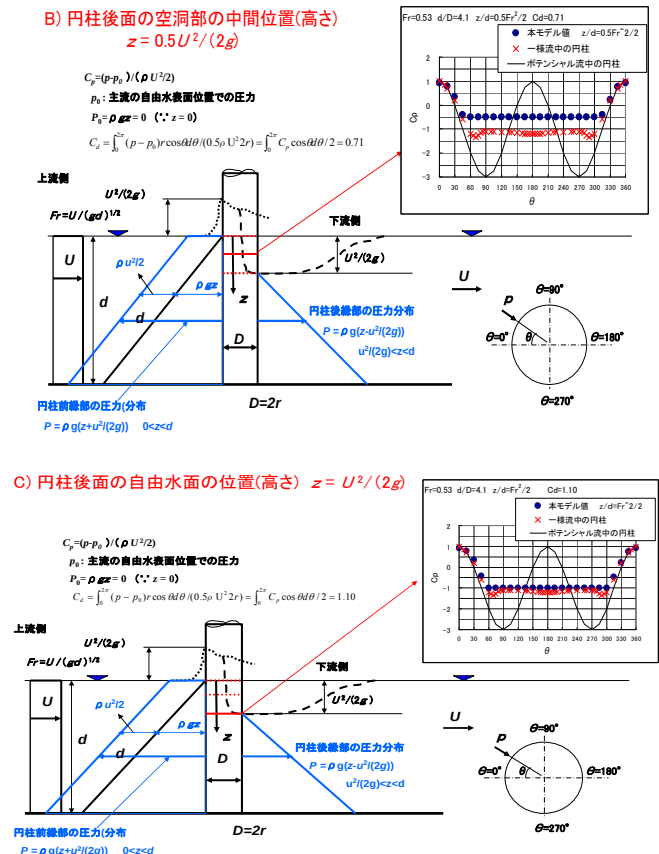


図-3 開水路中の非水没円柱まわりの圧力係数  $C_p$

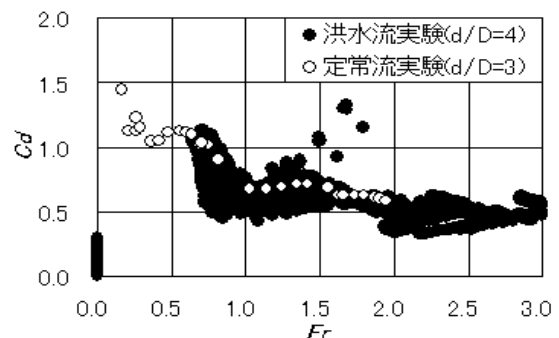


Fig. 4 遡上流中に置かれた非水没円柱の  $C_d$  と  $Fr$