遡上流れに置かれた非水没柱状体に作用する抗力特性

林 建二郎¹・多田 毅²・大井 邦昭³

¹ 正会員 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)
E-mail: hayashik@nda.co.jp

² 正会員 防衛大学校准教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)
E-mail: tada@nda.co.jp

³ 正会員 防衛大学校理工学研究科後期課程 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

洪水流やダム・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等による構造物や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柱状体(円柱と直方体)に作用する遡上流れの抗力計測を、常流と射流域で行ったものである。フルード数 Fr の増加に伴い、柱状体の後流域には空洞部が増加し、柱体背面での圧力低下が小さくなる結果、抗力係数 C_d は、フルード数 $Fr > 1$ の射流域では Fr の増加に伴い減少することを明らかにした。

Key Words : cylindrical structures, drag coefficient, Froude number, inundation flow, surge

1. はじめに

ダム・堤防の決壊流れや津波・高潮による遡上流れに置かれた各種陸上構造物や植生・樹木等に作用する流体力の把握は、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。

主流の流速分布が円柱軸方向に一樣な定常流中に置かれた無限長の円柱(円柱長さ $l \gg$ 円柱径 D)や角柱のような2次元の静止物体に作用する流体力については、多くの実験的研究がなされ、抗力係数 C_d とレイノルズ数 Re の関係が明らかにされている¹⁾。

流れの横断方向長さが水深に比べて十分に長い2次元構造物に作用する津波遡上流れによる波力特性を調べるために、朝倉ら²⁾は水路幅ほぼ全域に構造物模型を設置し全波力と構造物前面での圧力分布計測を行なっている。

松富、大向³⁾、チャルレスシマモラら⁴⁾、榊山⁵⁾、渋谷ら⁶⁾は、横断方向長さが水深に比べて有限となる家屋や柱等の3次元構造物に作用する、津波遡上流れの波力特性を調べるために、水路幅の一部に柱体模型を設置し全波力と模型前面での圧力分布計測等を行なっている。

これら柱状体を非水没状態で開水路中に鉛直に設置した場合、流速が水深方向に変化する主流の流速分布は、自由表面や底面境界の影響を受ける。しかし、自由表面

や底面境界を有する開水路流れ中に置かれた3次元物体である柱状体に作用する流体力特性の把握や評価法の確立は不十分である。

Hsieh⁷⁾ や Chaplin and Teigen⁸⁾ は、開水路内に非水没状態で鉛直設置された円柱の抗力係数 C_d は、 $0.5 < Fr$ 数 < 1 の常流域では造波抵抗の出現により増加し、 $1 < Fr$ 数の射流域では Fr 数の増加に伴い減少する実験結果を報告している。

林ら^{9)~13)}は、河道内の洪水流や、ダムや堤防の決壊および津波・高潮の来襲による非定常な遡上流れによる海岸林や樹林帯に作用する流体力特性を調べるために、開水路内に非水没状態で鉛直設置された単独円柱や円柱群、および樹木・植生模型に作用する流体力計測を行なっている。これら研究の成果として、開水路内に比水没状態で鉛直設置された円柱群中の単独円柱の抗力係数は、円柱群密度の増加に伴い増加する現象^{9), 11)}を明らかにするとともに、 Fr 数の増加に伴い減少する結果を報告している^{9), 11), 13)}。

本研究は、開水路中に非水没状態で鉛直設置した単独円柱および単独平板に作用する抗力の計測を、常流と射流域で行った上記の研究で得られた実験結果¹³⁾に対する更なる整理を行い、柱状構造物の Fr 数に対する変化特性に対する確認を行うと共に、柱状物体の抗力係数に関す

るする提案モデル式に対する詳細な検討説明を行い、その評価精度を調べたものである。

2. 実験装置および方法

実験には、長さ40m、幅0.8m、高さ1mの回流装置付き2次元造波水槽内の一部4m区間を嵩上げた水平床の開水路を用いた(図-1, 図-2 参照)。本開水路床に広幅堰を設けその下流に射流を発生させた。流量と堰高さを調整し Fr 数を変化させた。広幅堰を取り除き常流の擬似等流を発生させた。開水路幅の中央に鉛直設置した柱状体の上端を6分力計に設置し、柱状体に作用する全抗力 F_x を計測した。

計測装置の配置を図-2に示す。水槽の上部に設置した6分力計(日章電機(株)、容量5kgf(50N)、固有振動数500Hz)に、柱状物体を鉛直に取り付け作用流体力の X 方向成分 F_x 、鉛直上方向(=Z方向)成分 F_z 、ならびに6分力計内にあるモーメント計測点での Y 軸まわりの曲げモーメント M_y を測定した。モーメント計測点は柱状体下端より46cm上方の6分力計内にある。流体の流下方向の水平成分を F_x の正值、鉛直方向上向きを F_z の正值とする。モーメントは、流下方向を左から右に見る場合の反時計回りを M_y の正值とする。

試験柱状体には、a)直径 $D=3$ cm、長さ30cmの亚克力製円柱、b)横幅 $B_w=5$ cm、縦幅2cm、長さ33.5cmのアルミ製溝型鋼、c)横幅 $B_w=4$ cm、縦幅1cm、長さ25cmの木製長方形断面柱体を用いた。亚克力製円柱とアルミ製溝型鋼には小型圧力計(ST研究所、容量1kgf/cm²)を設置した。

レーザー流速計と容量線式波高計を用いて、柱状体の真横27cmでの水深方向流速分布を計測した。この位置における水深 d を代表水深 H とした。代表水深 H の4割の高さでの流速の時間平均値 U_m を断面平均流速とし、代表主流速とした。使用した Fr 数($=U_m/(gH)^{1/2}$)の範囲は0.5~3である。代表水深 H と柱状体幅 D の比は $H/D=1.25\sim4$ の範囲である。

次に、柱状物体の上流 $x=8.35$ mの造波水槽床面にヒンジ設置した堰板を流れ方向に転倒させ、ダム決壊に伴い発生する段波による遡上流れを柱状物体に作用させ、同様な計測を行った。

3. 結果および考察

(1) 開水路定常流中に置かれた非水没円柱の抗力係数

開水路流れの Fr 数および非水没円柱の抗力係数 C_d を

図-1 実験装置の概略

図-2 計測装置の配置(流れ方向から見た図)

(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 は代表主流速度であり床面から約 $0.4d$ の高さにおける流れ方向流速成分の時間平均値である。 g =重力加速度、 ρ =水の密度である。円柱径 D と水深 d の積 $d \times D$ は、水中にある非水没円柱部の投影面積である。開水路の定常流中に置かれた非水没円柱の抗力係数 C_d と Fr 数の関係を d/D をパラメーターとして図-3に示す。図中には、 $d/D=2.5$ のHsiehの実験結果⁷⁾を緑実線で示す。水深・円柱径比が小さい $d/D=1.1\sim4.5$ の場合においては、 $Fr=0.5\sim0.8$ 付近でHsiehの実験結果⁷⁾と同様にピーク値を示している。Hsieh⁷⁾やChaplin and Teigen⁸⁾は、 d/D が小さい場合に生じるこのピーク値の出現は、造波抵抗に起因すると指摘している。一方、本実験値の $d/D=4.5\sim35$ 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。

$Fr > 1$ となる射流の領域では $C_d < 1$ となり, C_d の増加に伴い $C_d = 0.5$ に向かって漸次的に減少している. この原因としては, $Fr > 1$ となる射流中に置かれた非没水円柱の背面では, 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面積部分が相対的に増える結果, 円柱背面での圧力低下が没水時に比べて減少するためと考えられる.

円柱径 D に対する水深 d の比が小さい石油タンク模型に作用する津波の圧力分布計測より評価した津波波力の算定結果においても, $Fr = 1$ 近くで抗力係数が大きく増加する現象が報告されている¹⁴⁾.

(2) 段波流れに置かれた非水没円柱の抗力係数

ダム決壊に伴う段波流れに置かれた非水没円柱(直径 $D=3\text{cm}$)に作用する流体力 F_d , 流速 U , 水位 d の時間変化を計測した¹³⁾. 水深 d の計測位置は, 円柱の上流端 $x=-1.5\text{cm}$, 円柱の真横 $y=12\text{cm}$ である. 代表主流速 U の計測位置は, $x=-1.5\text{cm}$, $y=12\text{cm}$, 床面からの高さ $z=2\text{cm}$ である. 水路勾配は $i=0$ である.

各時刻 t におけるこれら数値を, (1), (2)式に代入し求めた C_d と Fr 数の関係を図-4 に青丸印で示す. 本洪水流実験における水深と円柱径の比は $d/D=0\sim 4$ の範囲である. 図中には, 定常流中に置かれた $d/D=3$ の非水没円柱の C_d と Fr 数の関係(図-3 参照)を赤丸印で示す. $Fr > 1$ となる射流領域における両者の一致はほぼ良好である.

(3) 定常流れに置かれた非水没円柱まわりの圧力分布

定常流れに置かれた非水没円柱まわりの水位, 流速, 圧力分布計測¹³⁾より得られた, 非水没円柱まわりの流況概略図を図-5 に示す. 流れのよどみ点となる円柱の前縁部の圧力 p は, 動圧 $\rho u^2/2$ の増加が生じる結果, 円柱前面部での水面は盛り上がる. 盛り上がり高さを $\alpha u^2/(2g)$ とすると, α は 1 以下である. 一方, 円柱表面上に発達する境界層の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 は減少する. その結果, 円柱後方の後流域での水面は低下する. この水面の低下が生じる領域を空洞部と呼ぶ. 円柱後縁部で水面低下高さを $\beta u^2/(2g)$ とすると, Re 数 ($=UD/\nu$: ν : 水の動粘性係数) が $300 < Re$ 数 $< (2\sim 3.8) \times 10^5$ の亜臨界領域の流れにおいては, β は約 1.2 である.

非水没円柱まわりの圧力分布に対する簡単なモデル化を行なうために, 以下の仮定を行なう.

- 主流流速 u の分布は, 水深方向に様な代表主流速度 U と近似する.
- 非水没円柱前縁部での盛り上がり高さは $U^2/(2g)$ と近似する. 後縁部での水面低下高さを $U^2/(2g)$ と近似する.

図-3 非水没円柱の C_d と Fr 数との関係 (定常流の場合)

図-4 定常流中および非定常流(段波の場合)に置かれた非水没円柱の C_d と Fr 数との関係

- 円柱の床面近傍に存在する馬蹄形渦の影響は小さ

図-5 定常流れに置かれた非水没円柱まわりの流況

いと仮定する (無視する).

- 水面の盛り上がり部前面での圧力は大気圧と等しいので, この領域での円柱前面に生じる圧力は $P=0$ と近似する.
- 水面低下部 (=空洞部) での圧力は大気圧と等しいので, この領域での円柱後面に生じる圧力は $P=0$ とする.

本モデル化により、定常流れにおける非水没円柱前縁部の圧力(= 静水圧+ 動圧), および円柱後縁部の圧力(= 静水圧) の水深方向分布は(3), (4)式で示される。

$$P = \rho g(z + u^2/(2g)) \quad 0 < z < d \quad (3)$$

$$P = \rho g(z - u^2/(2g)) \quad u^2/(2g) < z < d \quad (4)$$

これらモデル式による圧力分布の概要を図-6 に示す。Fr 数の増加に伴い、円柱後縁部の水面低下高さ $u^2/(2g)$ は増加する。Fr 数 $=\sqrt{2}$ になると円柱後縁部の水表面は床面まで低下する。

次に、常流である Fr 数=0.53 の場合における非水没円柱まわりの圧力分布を、図-7 にそれぞれ示す。図中に示す C_p は(5)式で示される圧力係数であり、円柱表面の時間平均圧力 p と同じ高さ位置の円柱から遠く離れた主流部の圧力 p_0 との差を主流速度 U を用いて無次元化したものである。

$$C_p = (p - p_0) / (0.5 \rho U_m^2) \quad (5)$$

図-7 には、剥離渦が生じないポテンシャル流れにおける C_p の分布¹⁵⁾ を黒実線で示している。ポテンシャル流れにおける C_p の分布は、流れ方向およびその横断方向に対称である。従って、円柱表面の圧力 p の分布も流れ方向およびその横断方向に対称である。円柱の前方および後方のよどみ点 ($\theta=0^\circ$ and $\theta=180^\circ$) では流速=0 となる結果、 $C_p=1$ となっている。円柱の側方 $\theta=90^\circ$ および 270° では流速が増加する結果、 $C_p=-3$ と低下している。図中には、一様流中に円柱を設置した場合の C_p の分布を桃色の×印と桃色実線で示している。レイノルズ数が $Re=110000$ の亜臨界領域での結果である¹⁵⁾。

亜臨海領域の場合、 $\theta=80^\circ$ 付近の円柱表面で層流剥離が生じ、 $C_p=-1.4$ の最小値を示している。それより下流では、境界層の剥離後に生じる渦流を含む死水領域が生じる結果、円柱の後方(下流側)においては $C_p=-1.2$ 程度になっている。従って、圧力分布は円柱の前後で非対称となっている。

図中の a) は、主流の自由水表面 $z=0$ 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抗力係数は $C_d=0.38$ であった。

b) は、空洞部の中間位置(高さ) $z = 0.5U^2/(2g)$ 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抗力係数は $C_{d1}=0.71$ であった。

c) は、円柱後面空洞部の自由水表面の位置 $z = -U^2/(2g)$ 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抗力係数は $C_{d2}=1.1$ であった。

図-6 定常流中の非水没円柱の前・後縁部の圧力分布

図-7 定常流中の非水没円柱まわりの圧力係数 C_p の分布

図-8 非水没円柱の抗力係数 C_d の水深方向分布 ($0 < Fr < \sqrt{2}$ の場合) 図-9 定常流中に置かれた非水没円柱の抗力係数 C_d の実測値と計算値の比較

図-7 で求めた非水没円柱の抗力係数 C_d の水深方向分布の概要を図-8 に示す。主流速度 U が一定の場合、水深 d の増加に伴い Fr 数は減少し、 d の低下に伴い Fr 数は増加する。 $Fr = \sqrt{2}$ になると、円柱後縁空洞部の厚さ $\Delta (= U^2/(2g) = d \times Fr^2/2)$ と水深 d が等しくなる (=空洞部の厚さ (=深さ) は床面に達する)。

主流の水表面 $z=0$ での抗力係数を C_{d1} とする。円柱後縁の空洞部での水面 $z = U^2/(2g) = d \times Fr^2/2$ での抗力係数を C_{d2} とする。主流水深 d の開水路定常流中に鉛直設置した非水没円柱の抗力係数 C_{dt} を(6)式で定義する。

$$C_{dt} = \text{全作用抗力} / (0.5 \rho D d U^2) \quad (6)$$

図-8 に示す抗力係数 C_d の分布を水深方向に積分すると、抗力係数 C_{dt} は、(7)、(8)式で示される。

$0 < Fr \text{ 数} < \sqrt{2}$ の場合

$$C_{dt} = (C_{d1} - C_{d2}) Fr^2/4 + C_{d2} \quad (7)$$

$\sqrt{2} < Fr \text{ 数}$ の場合

$$C_{dt} = C_{d1} + (C_{d2} - C_{d1})/Fr^2 \quad (8)$$

図-3 に示した抗力係数 C_{dt} の実測値と、(7)、(8)式によるモデル計算値との比較を図-9 示す。青色線で示す計算値は、本実験で得られた主流の自由水表面 $z=0$ での抗力係数を $C_{d1}=0.71$ 、円柱後面空洞部の自由水表面の位置 $z = -U^2/(2g)$ での抗力係数を $C_{d2}=1.1$ としたものである (図-7、図-8 参照)。赤色線で示す計算値は、実測値 C_{d1} 、 C_{d2} のモデル計算値 C_{dt} への影響を示すために、 $C_{d1}=0.5$ 、 $C_{d2}=1.0$ と仮定したものである。 Fr 数 > 1 の射流域では、 Fr 数の増加に伴い抗力係数 C_d が減少する特性を、モデル式は上手く評価している。

(4) 遡上流れおよび定常流れに置かれた非水没平板の抗力係数

平板を流れ方向に直角に置いた場合、流れの剥離点はレイノズル数に関係なくその両縁端にある。従って、平板周りの圧力分布は、上記の円柱に比べて単純である¹⁾。

一様流中に置かれた無限長の平板の前面および後面での風圧分布係数の実測値¹⁾を積分すると、水表面 $z=0$ での抗力係数は $C_{d1}=0.7$ と推定できる。平板後縁の空洞部での水表面 $z=U^2/(2g)=d \times Fr^2/2$ での抗力係数は、 $C_{d2}=2$ と推定できる。これら $C_{d1}=0.7$ および $C_{d2}=2$ を(7)式、(8)式に代入すると、定常流中に置かれた非水没平板の抗力係数は、(9)式、(10)式で示される。

$0 < Fr \text{ 数} < \sqrt{2}$ の場合

$$C_{dt} = 2 - 2.6 Fr^2/8 \quad (9)$$

$\sqrt{2} < Fr \text{ 数}$ の場合

$$C_{dt} = 0.7 + 2.6/(2 Fr^2) \quad (10)$$

貯留水深 $d_0=70\text{cm}$ の遡上流れ (段波) による非定常流れに置かれた溝型鋼の場合の C_d と Fr 数の関係を図-10 に示す。図中には、併せて溝型鋼および長方形柱体を定常流中に設置した場合の C_d と Fr 数の関係を三角印およ

び四角印でそれぞれ示す。非定常流および定常流の両者において、 Fr 数 <1 の常流域での散らばりは大であるが、 Fr 数の増加に伴い抗力係数 C_d は減少することが分かる。

自由表面流中の円柱まわりや平板前後の水位や圧力分布をより詳細に考慮した抗力係数の理論式が、池谷ら¹⁶⁾により提案されている。

4. おわりに

本研究は、自由水面を有する定常および非定常な開水路流れに置かれた非水没柱状体に作用する流体力特性を、定常な一様流中における物体に作用する抗力の評価式を用いて評価したものである。

フルード数 Fr の増加に伴い、非水没柱状体の後流域の水位低下は増大し空洞部が増加する結果、柱状体背面での圧力低下は小さくなり、非水没柱状体の抗力係数 C_d は、フルード数 $Fr > 1$ の射流域ではフルード数 Fr の増加に伴い減少することが明らかになった。

参考文献

- 1) 岡内功, 伊藤学, 宮田利雄: 耐風構造, pp.101-148, 丸善, 1977.
- 2) 朝倉良介, 岩瀬浩二, 池谷毅, 高尾誠, 金戸俊道, 藤井直樹, 大森政則: 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.911-915, 2000.
- 3) 松富英夫, 大向達也: 津波氾濫流の流体力に関する実験, 岸工学論文集, 第 46 巻, pp.336-340, 1999.
- 4) チャルレスシモラ, 鳴原良典, 藤間功司: 構造物群に作用する津波波力に関する水理実験, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.831-835, 2007.
- 5) 榊山 勉: 陸上遡上津波の伝播と構造物に作用する津波波圧に関する研究, 土木学会論文集 B2(海洋開発), Vol. 68, No. 2, pp. I-771 - I-775, 2012.
- 6) 渋谷陽, 相原昭洋, 新井信一, 高橋敏彦: 平野部を遡上した津波による漂流物の衝突力, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 68, No.2, I-210-I215, 2012.
- 7) Hsieh, T.: Resistance of cylindrical piers in open-channel flow,

図-10 遡上流れ(段波)に置かれた非水没水平板の抵抗係数 C_{dt} の実測値と計算値の比較

ASCE, Vol.90, No. HY1, pp. 447-465, 1964.

- 8) Chaplin J.R. and Teigen P.: Steady flow past a vertical surface-piercing circular cylinder, Journal of Fluid and Structures, 18, pp.271-285, 2003.
- 9) 林建二郎, 藤井優宏, 重村利幸: 開水路中における円柱群に作用する流体力に関する実験, 水工学論文集, 第 45 巻, pp.475-480, 2001.
- 10) 林建二郎: 分力計を用いた水理構造物に作用する衝撃的流体力評価, 応用力学論文集, Vol.12., p.851-858, 2009.
- 11) Kothiyari U.C., Hayashi K and Hashimoto H., J. of Hydraulic Re., Vol.47, No.6, pp.691-699, 2009.
- 12) 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.
- 13) 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, pp. I_329-I_334, 2013.
- 14) 榊山 勉: 津波遡上流によるタンクに作用する流体力に関する研究, 土木学会論文集 B2, Vol.70, No. 2, I-891-I-895, 2014.
- 15) 中山泰喜: 流体の力学, 養賢堂, 1992.
- 16) 池谷 毅・岩前伸幸・末長清也・秋山義信・館野公一・鈴木紀雄: 圧力分布を考慮した柱体に作用する津波波力評価モデル, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.70, No. 2, I-396-I-401, 2014.

DRAG FORCES ACTING ON A VERTICAL SURFACE PIERCING CYLINDERS IN UNDAUNED FLOW

Kenjiro HAYASHI, Tuyosi TADA and Kuniaki OI

The characteristics of drag coefficient of a vertical surface piercing cylinder in inundation flow are studied. The drag forces acting on the test cylinders in inundation flow of open channel were measured by using a multi component load cell in steady and unsteady flow were measured. The pressure distributions around the test cylinder were measured by using static-pressure measurement in steady flow. The time variation of typical principal velocity and water depth of coming inundation flow were also measured exactly by using a Laser Doppler anemometer and wave gages. The drag coefficient of the test cylinders decreases with increase of Froude number of uniform flow. The decrease of C_d with increase of instantaneous Froude number of coming flow is also appeared in unsteady flow like a dam braking flow. These phenomena may be due to the decrease of water surface depth appearing in wake of the test cylinder.