柱状物体に作用する遡上流れの流体力評価

林 建二郎¹

¹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)

hayashik@nda.ac.jp

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各種陸上構造物や植生・樹木等に作用する流体力特性の把握は、防災技術の開発において重要である。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物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。本研究は、造波水槽内に設けた開水路中に人工的に遡上流れを発生させ、鉛直設置した柱体物体に作用する流体力および衝撃的流体力の計測を試み、その評価法の確立を目的とするものである。

フルード数 Fr の増加に伴い、柱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 : surge, cylindrical structures, impulsive fluid force, drag coefficient, froude number

1. はじめに

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各種陸上構造物や植生・樹木等に作用する流体力特性の把握は防災技術の開発において重要である。一様流速分布を有する定常流中の2次元、3次元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。

主流の流速分布が一様(=一様流)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⁾。レイノルズ数の亜臨界領域(円柱の場合、 $300 < Re < (2 \sim 3.8) \times 10^6$)における無限長の円柱、平板、正角柱の抗力係数は、それぞれ $C_d = 1 \sim 1.2$, $C_d = 2$, $C_d = 2$ と報告されている¹⁾。また、本研究で対象とする無限長の溝形鋼の抗力係数は $C_d \approx 1.8$ である¹⁾。これらの物体背後に回り込む流れは、柱状体の長さ方向に一様(=2次元的)である

流速0の底面から自由表面に向けて流速が増加する境界層流れの流速分布を有する開水路中に柱状体を横断方向に水平に設置した場合、柱状体の長さがその厚さに比べて十分長い場合は、上記の2次元の静止物体に作用する流体力と同様に見なせる。一方、柱状体を非水没状態で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。その結果、物体背後に回り込む流れは3次元的であり、物体背面の負圧は2次元流れの無限長の場合に比べて減少し¹⁾、併せて抗力係数 C_d も小さくなる。

横断方向長さが水深に比べて十分に長い2次元の陸上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次元の陸上構造物に作用する、津波遡上流れによる波力特性を調べるために、水路幅の一部に柱体模型を設置し全波力と構造物前面での圧力分布計測等を行なっている。林ら⁷⁾は、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波力特性を調べるために、開水路内に単独設置された3次元の陸上構造物である樹幹を模した円柱や植生模型に作用する流体力計測を行なっている。

本研究は、開水路中に人工的に遡上流れを発生させ、非水没状態で鉛直設置した柱体物体に作用する流体力および衝撃的流体力の計測を行ったものである。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図-1に示す。実験には、回流装置付き2次元造波水槽(長さ40m, 幅0.8m, 高さ1m)を用いた。水槽の一区間の床面を0.3mをかさ上げし、長さ4m

のステンレス製の水平床を設け陸上部とした。陸上部の中央にアルミ製溝型鋼による小型柱状物体（高さ $H_f=33.5\text{cm}$ ，水路横断方向幅 $B_w=5\text{cm}$ ，床より構造物下端までの距離 $H_c=1\text{mm}$ 未満）を鉛直に設置した。柱状体下端の床面点を原点とする流れの進行方向を x 軸の正，その横断方向を y 軸，床面から上方向を z 軸の正とする。

柱状物体の上流 $x=-8.35\text{m}$ の造波水槽床面に堰板をヒンジ設置した。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た。決壊前の貯留水深を d_0 とする。実験に使用した貯留水深は $d=53\text{cm}$ と 60cm の 2 種類である。造波水槽の他端には 1/20 勾配の消波用斜面を設置した。

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 5Kg （ 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。流体力の X 方向成分を F_x の正值， Z 方向成分を F_z の正值とする。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。曲げモーメントの反時計方向回り成分を M_y の正值とする。

柱状体下端上方の $y=0\text{cm}$ ， $z=2\text{cm}$ の位置に小型圧力計（ST 研究所，容量 1kgf/cm^2 ）を設置した。

柱状体の影響を受けない主流の水位 d を計測するために，柱状物体の真横両方向の $y=\pm 22\text{cm}$ の位置に容量線式波高計と超音波式水位計をした。主流速度の計測には 2 成分レーザードップラー流速計（LDV）を使用し，柱状物体の真横に $y=20\text{cm}$ 離れた床から $z=2.6\text{cm}$ の位置の，流れの水平・鉛直方向成分 U と V を同時計測した。

3. 実験結果および考察

(1) 柱状体（溝型鋼）に作用する波力と流れ特性

貯留水深が $d=60\text{cm}$ の時の測定記録例を図-3 に示す。作用流体力の X 方向成分 F_x については， $-F_x$ を示している。LDV の使用により高精度で計測された主流の代表速度は $U=2.5\text{m/s}$ 以下であった。この種の遡上流れの水粒子速度を LDV を用いて計測した渋谷らの結果⁹⁾においては，流速 U は計測する深さが異なってもほぼ同じ値を示すこと，また，遡上波の先端で最も大きな値を示し，波の後方に行くにつれて減少することが示されている。

遡上流れの先端は，時間 $t=0.69\text{s}$ に溝型鋼を用いた本柱状体に衝突し，圧力計を設置している本柱状体の幅中央線に沿って衝突した水塊が高速で急上昇する。その結果， $t=0.69\text{s}$ の衝突直後の圧力は $p=-15\text{gf/cm}^2$ の大きな負圧を示している。その後は，水位上昇に伴う水没により動圧が作用する結果，圧力 p は急激に増加し $t=1\text{s}$ 付近で

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）

図-3 測定記録例（貯留水深 $d=60\text{cm}$ の場合）

最大値 $p=35\text{gf/cm}^2$ を示し，その後は急激に $p=22\text{gf/cm}^2$ まで減少している。

抗力 F_x も同様に急激に増加するが，水位 d の増加に伴う作用面積増加が生じる結果， F_x の最大値 $F_x=12\text{N}$ は， $t=2.2\text{s}$ 付近で生じている。図中には， F_x の合力作用点の床面からの高さの推定値 r （ $=$ （力計のモーメント計測点高さ） $-M_y/F_x$ ）の時間変化も示す。作用点 r は主流水位 d の約 1/2 の深さとなっている。

図-4 C_d , U , F_r の経時変化 (貯留水深 $d=60\text{cm}$ の場合)

図-5 C_d と F_r の関係 ($d=60\text{cm}$ と $d=53\text{cm}$ の場合)

写真-1 衝突直前時 $t=0.69\text{s}$

写真-2 最大圧力発生時 $t=1.0\text{s}$

写真-3 F_x の最大値発生時 $t=2.2\text{s}$

図-6 衝突直前時 $t=0.69\text{s}$

図-7 最大圧力発生時 $t=1.0\text{s}$

図-8 F_x の最大値発生時 $t=2.2\text{s}$

本実験で使用した柱状体の抗力係数 C_d とフルード数 F_r を、以下に示す式(1)と式(2)を用いてそれぞれ評価した。

$$C_d = F_x / (0.5 \rho B_w d U^2) \quad (1)$$

$$F_r = U / (g d)^{1/2} \quad (2)$$

写真-4 柱状体背面の空洞化 $t=1.0\text{s}$

写真-5 柱状体背面の空洞化 $t=2.2\text{s}$

式中の ρ は水の密度, g は重力加速度, B_w は柱状体の水路横断方向幅, d は主流部の水深である。 U は代表主流速度である。

図-4に、代表主流速度 U , F_r 数, ならびに抗力係数 C_d の経時変化を示す、遡上流れの先端部が衝突する $t=0.69\text{s}$ の時点では、主流の水位は低く流速計測は不能であり、

水位が増加する $t=0.9\text{s}$ 以降に流速計測が可能となっている。水深が浅く高速な遡上流れ先端部の流れのフルード数は $F_r=3.7$ と大きく、その場合の抗力係数は $C_d \approx 1$ となり、一様流中に置かれた本柱状体(溝型鋼)の抗力係数 $C_d \approx 1.8$ より大きく低下している。時間経過に伴い遡上流れの水深 d が増加し、代表主流速度 U が減少すると、

フルード数 F_r は低下し、抗力係数 C_d は増加している。

図-4に示した貯留水深が $d=60\text{cm}$ の場合の抗力係数 C_d とフルード数 F_r の関係を図-5に示す。図中には、貯留水深が $d=53\text{cm}$ の場合の結果も同様に示す。抗力係数 C_d は、フルード数 $F_r > 1$ の射流域では F_r の増加に伴い減少していることが分かる。抗力係数 C_d の減少は、フルード数 F_r の増加に伴い、柱体の後流域には空洞が増加し柱体背面での圧力低下が小さくなることに起因する。また、図中には、一様流中における本柱状体（溝型鋼）の抗力係数 $C_d =$ 約1.8の値を赤点線で記入している。

(2) 柱状体(溝型鋼)まわりの流れ

写真-1に、遡上流れの先端部が柱状体に衝突する直前である $t=0.69\text{s}$ の流況を示す。遡上流れの先端部は水路横断方向にほぼ一様に進行していることが分かる。その時の柱状体の中央断面での流れの模式図を図-6に示す。図中の実線は遡上流れの自由表面（水面形）を示す。これら動画写真より算定した遡上流れの先端速度は約 2.6m/s であった。

写真-2に圧力 p が最大値となる $t=1\text{s}$ での流況を示す。その時の柱状体後流域(背面)に生じている空洞化の状況を写真-4に示す。これら写真より作成した柱状体の中央断面での流れの模式図を図-7に示す。柱状体に衝突した主流速度 $U=2.5\sim 2.6\text{m/s}$ の流れは、柱状体壁面に沿う大きな流速を持つ鉛直上方流れとなっている。主流部の流速は $U=2.5\text{m/s}$ 、水深は $d=5\text{cm}$ であり、主流の流れは $F_r=3.6$ の射流となっている。この高速な射流流れにより、柱状体後面では、空洞化²⁾が床面まで達している。

抗力 F_r が最大値となる $t=2.2\text{s}$ での同様な流況を写真-3、写真-5、図-8にそれぞれ示す。主流部の流速は $U=1.6\text{m/s}$ 、水深は $d=10\text{cm}$ であり、主流の流れは $F_r=1.6$ の射流となっている。流れは、準定常かつ擬似等流的であり、柱状体前面部では水面が緩やかに大きく上昇し、後面部では大きな水位低下が生じている。

(3) 柱状体(直円柱)まわりの圧力分布と抗力係数

遡上流れに設置された上記の柱状体(溝型鋼)まわりの圧力分布特性を調べるために、溝型鋼の代わりに直径 $D=3\text{cm}$ の円柱(直円柱)を開水路流れに鉛直設置した⁷⁾。

常流である $F_r=0.53$ 、および、射流である $F_r=2.46$ と $F_r=3.1$ の場合における直円柱まわりの圧力分布を、図-9にそれぞれ示す。図中に示す C_p は、(3)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 を直円柱から遠く離れた主流部の圧力 p_0 と主流速度 U を用いて無次元化したものである。

$$C_p = (p - p_0) / (0.5 \rho U^2) \quad (3)$$

図-9 円柱まわり圧力分布

図-9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⁸⁾を黒色実線で示す。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。

一様流中に円柱を設置した場合の C_p の分布を桃色の×印と桃色実線で示す。レイノルズ数が $Re=110000$ の亜臨界領域での結果である⁸⁾。亜臨界領域の場合、 $\theta=80^\circ$ 付近で層流剥離が生じ、 $C_p=-1.4$ 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）においても C_p は一となり、 $C_p = -1.2$ 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。

常流である Fr 数=0.53 の計測結果を、図中の a) に紺色丸と紺色実線で示す。直円柱背後での空洞域深さは小さく、圧力計測位置高さでの円柱背後には渦流を含む死水領域が生じる結果、一様流中の場合と同様に直円柱後面の C_p は-1 と低下している。この圧力分布を積分し直円柱の単位長さに作用する抗力 F_x を算定し、(1)式を用いて評価（但し、式中の $B_w = D$, d =単位長さとする）した直円柱の局所位置における抗力係数は $C_d = 1.15$ となった。

射流である $Fr=2.46$ と $Fr=3.1$ の場合における直円柱表面の圧力 p の計測結果を図中の b), c) に紺色丸と紺色実線で示す。円柱後方で圧力低下による水面低下が顕著となり、圧力計測位置高さでの円柱背後には空洞域が生じている。その結果、円柱後面で C_p は約 0 となっている。これら圧力分布を積分し円柱の単位長さに作用する抗力 F_x を算定し、上記と同様に求めてた円柱の局所位置における抗力係数は、 $C_d = 0.6$ と $C_d = 0.51$ であった。

空洞領域の深さは、約 $U^2/2g$ である。円柱設置位置における主流流れの自由水面から下方 z の位置で円柱後方に空洞が生じている場合 $[0 < z < (U^2/2g)]$ 、円柱前方よどみ点 ($\theta=0^\circ$) での圧力係数を $C_p = 1$ 、円柱後方部よどみ点 ($\theta=180^\circ$) での圧力係数を $C_p = -z/(U^2/2g)$ と近似し、円柱まわりの圧力分布は図-9 (b), (c) に示す圧力分布形と相似であるとモデル化する。この場合、 z の位置における部分円柱の抗力係数は、 $\Delta C_d = 0.5[1 + z/(U^2/2g)]$ なる。一方、円柱の前方および後方が水没している空洞領域以下の領域においては、上記と同様なモデル化を行なうと $\Delta C_d = 1$ となる。

このように評価された部分円柱の抗力係数 ΔC_d の全水深 d における平均値を、円柱に作用する全抗力の抗力係数 C_d と定義すると、抗力係数 C_d は式(4)と式(5)でそれぞれ示される。ただし、自由表面位置より高い円柱表面方部の圧力は、水が跳ね上がる円柱前方部においても自由水表面の極近傍を除く大部分で大気圧に等しので、この部分に作用する抗力を無視している。 Fr 数= $\sqrt{2}$ の場合には、空洞域が底面 ($z=d$) まで達する。

$$Fr \text{ 数} < \sqrt{2} \text{ の場合} \quad C_d = 1 - Fr^2/8 \quad (4)$$

$$Fr \text{ 数} > \sqrt{2} \text{ の場合} \quad C_d = 0.5 + 1/(2Fr^2) \quad (5)$$

(4) 射流中に置かれた柱状体（直円柱）の抗力係数

直円柱の抗力係数 C_d を(1)式に準じる(6)式を用いて算定した。

$$C_d = F_x / (0.5\rho D d U_m^2) \quad (6)$$

図-10 開水路における直円柱の抗力係数

F_x は、分力計で計測された直円柱に作用する全抗力の時間平均値である。円柱径 D と水深 d の積 Dd は、水中にある直円柱部の投影面積である。主流速度 U_m は、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。

抗力係数 C_d と Fr 数 ($=U_m/(gd)^{1/2}$) の関係を図-10 に示す。図中には、水深 d と円柱径 D の比が $d/D=4$ の場合の Hsieh の実験結果⁹⁾ を青実線で示す。 Fr 数が小さい常流では抗力係数 C_d は、一様流中に置かれた無限長円柱の結果 ($C_d=1 \sim 1.2$) より少し小さくなっている。 Fr 数=0.5~0.6 付近で弱いピーク値を示している。その後は、Hsieh の実験結果⁹⁾ と同様に Fr 数の増加に伴い減少し、 Fr 数=3 では約 0.5 となっている。

図中には、前節の式(4)と式(5)でそれぞれ示されるモデル式による抗力係数 C_d の算定結果を桃色の実線で示す。 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。

溝型鋼を用いた柱状体に対する同様な計測はまだ行なわれてないが、溝型鋼の抗力係数 C_d も、図-5や図-10に示すように、フルード数 Fr の増加に伴い減少するものと考えられる。

以上より、抗力係数 C_d の減少は、フルード数 Fr の増加に伴い、柱体の後流域には空洞が増加し柱体背面での圧力低下が小さくなることに起因すると考えられる。

(5) 正味の衝撃的流体力の推定

図-3 に示した遡上流れの先端部が衝突した直後の作用抗力 F_x の詳細な時間変化を図-11 に示す。 F_x は衝突直後に急激に増加し、その後、本柱体の水中固有振動数で自由減衰振動していることが分かる。これは、分力計で計測された力 F_x には、衝突力による柱体の自由減衰振動に伴う慣性力 (=柱状体の質量×振動加速度) が含まれている結果と考えられる¹⁰⁾。

図-11 作用抗力 (貯留水深 $d=60\text{cm}$ の場合)

分力計を用いた本計測システムを線形振動方程式で近似しこの慣性力を推定評価¹⁰⁾した。分力計で計測された F_x からこの慣性力を取り除いたものを真の流体力 F_{xe} と定義し、その時間変化を図中に青線で示す。また、図中には、水中での柱体の振動による流体慣性力の推定値を紫線で示す。流体慣性力の推定に必要な慣性力係数には、静止流体中を加速度運動する円柱の値 1 を使用した。真の流体力 F_{xe} には、この流体慣性力が含まれていることが分かる。

分力計で計測された作用抗力 F_x は復元力であり、柱状物体の強度や耐地盤支持力の評価において重要である。真の流体力 F_{xe} は、構造物に作用する強制振動外力であり、柱状物体の振動応答解析や柱状物体による流れのエネルギー減衰効果の評価において重要である。

4. おわりに

本研究は、非定常かつ不等流である開水路遡上流れにおける柱状物体に作用する流体力特性を、定常な一樣流中における物体に作用する抗力の評価式 (式(1)参照) を用いて評価したものである。従って、流れの非定常性による質量力や、開水路流れに生じる水面勾配等の影響は、式(1)中の抗力係数 C_d に全て含まれると考えられる。

得られた主要な結果を以下に示す。

- 1) 遡上流れ中における本柱状物体の抗力係数 C_d は、開水路の等流れにおける本柱状物体の抗力係数 C_d の場合と同様に、フルード数 F_r の増加に伴い、柱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 $F_r > 1$ の射流域では F_r の増加に伴い減少することを明らかにした。
- 2) F_x は遡上流れの先端部が衝突直後に急激に増加し、その後は、本柱体の水中固有振動数で自由減衰振動していることが分かった。これは、分力計で計測された力 F_x には、真の流体力と衝突力による柱体の自由減衰振動に伴う慣性力 (= 柱状体の質量 × 振動加速度) が含まれていることによると考えられる。

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, 嶋原良典, 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, 2012.
- 7) 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.II14-II19, 2012.
- 8) 中山泰喜: 流体の力学, 養賢堂, 1992.
- 9) Hsieh, T.: Resistance of cylindrical piers in open-channel flow, ASCE, Vol.90, No. HY1, pp.447-465, 1964.
- 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.

FLUID FORSES ON CYLINDRICAL STRUCTURES IN INUNDATION FLOW

Kenjiro HAYASHI

The fluid forces acting on a cylindrical structure in inundation flow were measured by using a multi component load cell. The time variation of typical principal velocity and water depth of coming inundation flow were also measured exactly by using laser doppler anemometer and wave gage. The drag coefficient of cylindrical structure in inundation flow decreases with increase of instantaneous fluid number of coming inundation flow. This phenomenon is quite similar to the relationship between the drag coefficient and fluid number of cylindrical structure in uniform flow in open channel.