#### -15

# 不等流における非水没円柱群の流体力特性とその評価法

北海道庁	正会員(	)阿戸	理樹
広島大学大学院工学研究科	正会員	内田	龍彦

広島大学大学院工学研究科 学生会員 小林 大祐 広島大学大学院工学研究科 正会員 河原 能久

#### 1. 目的

近年,地球温暖化の影響による豪雨が各地で多発 し,流下物が蓄積することにより,強い不等流性を 伴った流れが橋脚周りで生じ,洪水被害が増加して いる.そのため,抵抗体の流体力特性を明らかにす ることは重要である.しかし,配置・形状・フルー ド数 Fr やレイノルズ数 Re などによる抗力係数の変 化に着目した研究は数多く存在するものの,不等流 性が流体力に与える影響についての研究は数が少な いように思われる.そこで,流れの不等流性が非水 没円柱群に与える影響を明らかにすることを目的と する.

## 2. 実験方法

実験水路を図-1に示す.等流・不等流の水面形と円 柱周りの水面形を測定するために,幅 B=30 cm,縦 断長さ 3.0 m(水路 I)と幅 B=80 cm,縦断長さ 24 m(水 路 II)の二つの可変勾配水路を使用した.抵抗体には 円柱を用いており,水路 Iには直径 d=1 cm,水路 IIには直径 d=10 cm のものを千鳥状に配置している(配 置密度  $\lambda_I=0.0588$ ,  $\lambda_I=0.0981$ ).設置・測定範囲は水 路 Iの場合,下流端から 2 mの区間(Case L)と下流端 1 m~2 mの区間(Case S)の 2パターンでそれぞれ縦 断方向に 20 cm間隔で水深を測定している.水路 IIの場合,上流端から 8 m~11 mの区間で円柱群の中 心の円柱を代表円柱とし水深の測定を行った.

# 3. 等流条件における円柱群の抵抗特性

開水路流の抗力係数の理論的導出を行う.一様流中 の円柱周りの圧力変化を $\Delta P(\theta)$ とすると,開水路では それに応じて円柱周りで水深変化 $\Delta h(\theta)$ が生じる.静 水圧分布を仮定すると, $\Delta h(\theta)$ は式(1)で定義される.

$$\Delta h(\theta) = \frac{\Delta P(\theta)}{\rho g} = \frac{U^2}{2g} C_p(\theta) \tag{1}$$

ここに、 $\rho$ :水の密度、g:重力加速度、U:x方向の 断面平均流速(U=Q/Bh)、 $C_p(\theta)$ :圧力係数である.

開水路では、円柱前面では作用面積が増大し、背

キーワード 抗力係数,加速流,圧力勾配,水面形計算 連絡先 〒730-8527 東広島市鏡山1丁目4-1 082(424)7819



図-1 実験水路(左図:水路I,右図:水路I) 面では水深が低下によって,圧力が大気圧以下とな らないため,一様中の流体力と異なる.本研究では, 開水路流中の流体力は一様流の円柱周りの流体力と 水深変化によって生じる作用面の変化を表す項に分 けて考える.即ち,円柱周りの圧力の積分範囲を河 床から一様水深 h までの区間と円柱周りで生じる水 深変化 Δh の区間で分け,水深積分することで開水路 流中の流体力 F を表し,整理すると開水路中の抗力 係数 C<sub>D</sub>は,式(2),(3)で示される.

$$C_D = C_{D0} + \alpha F r^2 C_{D0} \tag{2}$$

$$\alpha = \frac{1}{8} \frac{\int_{0}^{2\pi} C_{P} |C_{P}| \cos \theta d\theta}{\left(\int_{0}^{2\pi} C_{P} \cos \theta d\theta\right)^{2}} \times 4C_{D0}^{2} = \frac{1}{2} \frac{\int_{0}^{2\pi} C_{P} |C_{P}| \cos \theta d\theta}{C_{D0}^{2}}$$
(3)

ここに、 $C_{D0}$ は一様流中の抗力係数であり、水面による抗力係数の影響が表れない  $Fr \rightarrow 0$ の場合の抗力係数となる.

図-2 に各等流実験値・理論式から求められた抗力係数  $C_D \ge Fr$ 数の関係を示す.理論式は実験値の抗力係数の Fr数による減少を説明できている.

## 4. 不等流条件における円柱群の抵抗特性

式(2)の開水路の抗力係数を用いて流体力を式(4)で 評価する.

$$NF = \frac{1}{2}\rho C_D NAU^2 \tag{4}$$

そして,流体力を用いて,水面形の式(5)を計算する.

$$\frac{dh}{dx} = \frac{-\frac{dz_b}{dx} - \frac{U^2 n^2}{h^{4/3}} - \frac{NF}{\rho g h}}{1 - Fr^2}$$
(5)

ここに, *z*<sub>b</sub>:河床高, *n*:底面のマニングの粗度係数 (*n*=0.012), *h*:水深, *N*:単位面積内の抵抗体数, *F*: 抵抗体1つ当たりの流体力である.

図-3に不等流の水面形計算と実験の結果を示す.加 速流の計算値は実験値を下回っており,解析では円 柱にかかる流体力を過小評価していることが分かる. この加速流における流体力増加のメカニズムを調べ るため,水路 IIで等流と加速流を発生させ縦断水深 分布を比較する.両者を比較するために,実験値で ある円柱前面の水深  $Z_{s0}$ を基準とし,任意の地点の水 深  $Z_s$  との差  $\Delta h_s$  として表した.また速度水頭  $U^2/2g$ で無次元化することで水深降下量  $\Delta h_*$ の比較を行っ た.式(5)に水深の降下量  $\Delta h_*$ の定義式を示す.

$$\Delta h_* = \frac{\Delta h_s}{2gU^2} = \frac{Z_s - Z_{s0}}{2gU^2} + 1$$
(5)

図-4 に等流・加速流条件の無次元水深降下量の分布 を示す.実線で囲われている部分は,円柱の範囲を 示している.円柱上流側では無次元水面形に大きな 差は現れていないが,円柱後背部以降は等流と加速 流の間で一定の差が現れている.これは,流れの全 体的な圧力勾配により剥離域内の圧力に差が生じて いることを示している.そこで,この圧力勾配によ る加速流れにおける流体力の増加分を考慮するため に剥離域の長さを定数 k と抵抗体の幅 d を用いて表 し,剥離域の圧力低下による流体力を加えた式(6)に よって抵抗体の流体力を仮定する.

$$NF = \frac{1}{2}\rho C_D NAU^2 - \rho g NAkd \frac{dh}{dx}$$
(6)

式(6)を式(3)に代入し、水面形の式を求めた. 定数 k は計算水面形と実験水面形をあわせるため k=2 を与 えた. 図-3 の本手法による計算結果を見ると加速流 内の水位変化は圧力勾配を考慮した本手法により改 善が見られる.

## 5. 結論

本研究は不等流における円柱群の流体力特性に着 目し、実験と水面形の計算結果から議論を行った. 以下に本研究で得られた主要な成果を示す.



図-2 理論式(2),(3)と実験値の比較





図-3 提案した評価式を使用した水面形の計算式

図−4 等流と加速流の縦断的な無次元水深

- 加速流れの水面形の計算の際に生じた抵抗の過 小評価は、無次元水面形から、圧力の縦断勾配 によって剥離域内の圧力が低下することが原因 であることを示した。
- 剥離域内の圧力低下を考慮した評価式を提案
  し、計算に組み込むことで加速流れの再現精度
  が大きく改善されることを示した.

# 参考文献

- 林健二郎,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,Vol.45,pp.475-480,2001.
- Rouse, H.: elementary mechanics of fluids, Dover publication, Inc, New York, 1946.