

## 円柱群を有する流れにおける流体力が水面形に及ぼす影響

呉工業専門学校専攻科 学生会員 森 飛鳥

西日本高速道路エンジニアリング中国 非会員 旭 佑哉

呉工業高等専門学校 正会員 黒川岳司

## 1. 序論

樹林帯のような抵抗力を有する流れの解析においては、抵抗力の流体力特性を正しく評価することが重要である。流体力の解析精度は抗力係数に依存するため、抗力係数に関する研究は数多く行われている<sup>1),2)</sup>。ただし、多くの場合は、円柱1本あたりに作用する流体力をもとに円柱群内の水面形を求めており、流下方向に対する流体力の減少を加味した研究はあまり行われていないように思われる。そこで本研究では、円柱群を有する開水路等流における水面形に及ぼす円柱群の影響について、流下方向の流体力の減少率及び抗力係数の変化を調べた。

## 2. 円柱群および実験方法

実験には、図1に示す長さ8m、幅0.4mの開水路を使用し、水路下流端には水位調節用の可動堰が設けられている。下流端から5.5m~6.5mの1m区間に水路床全幅にわたって円柱群を設置した。円柱は、直径1cmの塩ビ製のものを使用し、円柱の中心間隔を3.34cmとして図2に示すように千鳥状に配置した。この時の配置密度 $\lambda$ は0.0653となり、これは実際の河川で使用される杭出し水制の配置密度と同程度である。なお、各円柱は十分長く、実験する際の抵抗力はすべて非水没の状態である。

実験条件を表1に示す。水路勾配は1/53.6で固定しており、円柱群内で水深変化が小さくなるように流量と下流端堰を調整した。Case I, IIとも常流で実験を行っている。Case Iは円柱群内の水深が低く速い流れで、Case IIは円柱群内の水深が高く遅い流れとなっている。各Caseにおいて、水路中心部の水位を流下方向に10cm間隔で計測した。また、円柱まわりの水位の、流下方向の変化を計測するため、円柱群の上流側から1, 3, 5, 29列目の水路中央部の円柱を対象に円柱周りを45°ずつ、計8箇所の水深を計測した。

## 3. 等流中の抗力係数の評価方法

## 3.1 力のつり合い式による評価

幅広断面水路における等流時の力のつり合い式は、式(1)で表される。

$$-dz_b/dx - U^2 n^2 / h^{4/3} - NF / \rho gh = 0 \quad (1)$$

ここに、 $z_b$ : 河床高、 $U$ :  $x$ 方向の断面平均流速、 $n$ : マニングの粗度係数( $n=0.012$ )、 $h$ : 円柱群内の平均水深、 $N$ : 1m<sup>2</sup>当たりの円柱の本数を表しており、これらの値を式(1)に代入することで円柱1本あたりに作用する流体力 $F$ を求める。また、本研究における抗力係数 $C_D$ は、

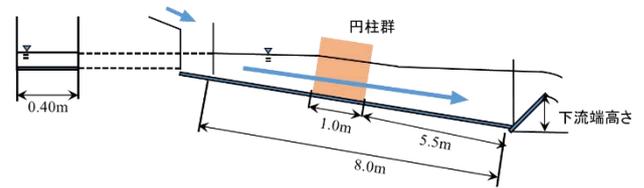


図1 実験水路の概略

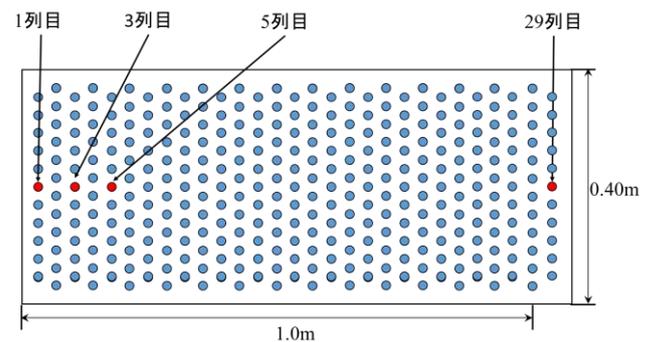


図2 円柱群の配置図

表1 実験条件

実験条件	Case I	Case II
流量[L/s]	3.34	6.11
幅[m]	0.40	
水路勾配	1/53.6	
限界水深[m]	0.0196	0.0288
円柱群内の平均水深[m]	0.0594	0.143
Re数	$5.807 \cdot 10^3$	$7.812 \cdot 10^3$
Fr数	0.261	0.124

水面を持たない一様流中の抗力係数 $C_{D0}$ と円柱まわりの水位差によって生じる抗力係数 $C_{D1}$ との和で表している。 $C_{D0}$ は、 $1 \cdot 10^3 < Re < 1 \cdot 10^4$ の範囲においておよそ1である<sup>3)</sup>ため、本研究では $C_{D0}=1$ とし、 $C_{D1}$ は円柱まわりの圧力係数 $C_p$ により求めた。式(2)に、 $C_{D1}$ の算定式を示す。

$$C_{D1} = F_r^2 \int_0^{2\pi} C_p^2 \cos \theta d\theta / 8 \quad (2)$$

なお、式中の $F_r$ 数は、式(1)で用いた円柱群内の断面平均流速 $U$ 、円柱群内の平均水深 $h$ を与えている。式(2)より、1, 3, 5, 29列目の円柱の $C_{D1}$ と $C_{D0}$ の和を取ることによって、各円柱に作用する抗力係数として求めた。

キーワード 円柱群, 流体力, 抗力係数, 開水路流, 水面形

連絡先 〒737-8506 広島県呉市阿賀南 2-2-11 呉工業高等専門学校

### 3. 2 運動量と力積による評価

式(3)に、開水路における運動量の変化と力積の関係を表す式を示す。

$$P_1 - P_2 - \Sigma F = \rho Q(v_1 - v_2) \quad (3)$$

円柱群と、その前後 0.1m までを検査領域とし、上流側を断面 I、下流側を断面 II とする。式(3)において  $P_1$ 、 $P_2$  と  $v_1$ 、 $v_2$  はそれぞれ断面 I、II における全水圧、流速を表したものであり、壁面に作用する摩擦の影響を無視できるとすれば、 $\Sigma F$  は検査領域内にかかる流体力となる。

### 3. 3 開水路内の水面形計算

水面形は、下流端堰における限界水深を境界条件とし、式(4)を用いて上流に向かって逐次計算を行った。

$$dh/dx = (-dz_b/dx - U^2 n^2 / h^{4/3} - NF / \rho gh) / (1 - F_r^2) \quad (4)$$

## 4. 実験結果及び考察

### 4. 1 円柱群内の抗力係数

1, 3, 5, 29 列目における円柱まわりの水位の変化をもとに、式(2)を用いて各円柱に作用する抗力係数を求めた。また、式(1), (3)を用いて円柱群内の抗力係数を求め、以上 3 つの計算結果を図 3. 1, 2 に示す。それぞれ、Case I, II における計算結果である。

まず、 $F_r$  数の大きな Case I では、各円柱に作用する抗力係数は 1 列目で最大値となり、それ以降は徐々に低下していることが分かった。また、式(1), (3)によって得られた抗力係数はともに近い値で、下流側ほど、各円柱の抗力係数は式(1), (3)の値に近づく傾向が見られた。

$F_r$  数の小さな Case II では、式(2)は各円柱の抗力係数と近い値になったが、式(1)は 2 倍程度大きな値となった。原因は、円柱群内水面の変動が大きく、平均的な水深を正確に計測できなかったことが考えられる。

### 4. 2 水面形計算

本研究では、各円柱に作用する抗力係数を水面形計算に利用することで水面形の計算精度が上がると考えた。そこで、Case I, II それぞれにおいて、式(2)から算定した各円柱の抗力係数を用いた水面形と、式(3)より得た抗力係数を用いた水面形を計算し、計算結果をそれぞれ図 4. 1, 2 に示す。Case I は、各円柱に作用する抗力係数を用いることで実測値に近くなった。一方で、Case II は各円柱の抗力係数と式(3)を用いた抗力係数の差が小さかったため、計算結果に大きな違いは見られなかった。また、水面形計算について、流下方向への長さが十分に無いような円柱群では、上流側の平均より大きな抗力係数の影響を考慮する必要があると考えられる。

## 5. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 抗力係数は、円柱群の 1 列目で最大値となり、それ以降は徐々に低下する、この傾向は  $F_r$  数の大きな流れほど顕著に表れる。
- (2) 各円柱の抗力係数を水面形計算に反映することで、

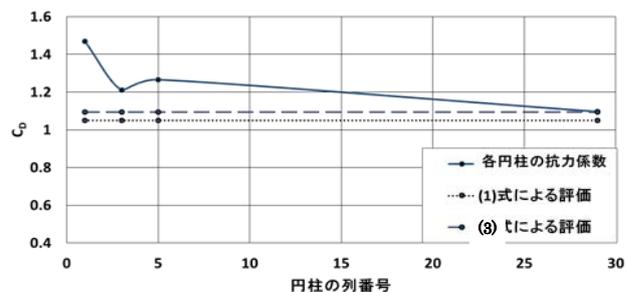


図 3.1 各算定式による抗力係数の比較 Case I

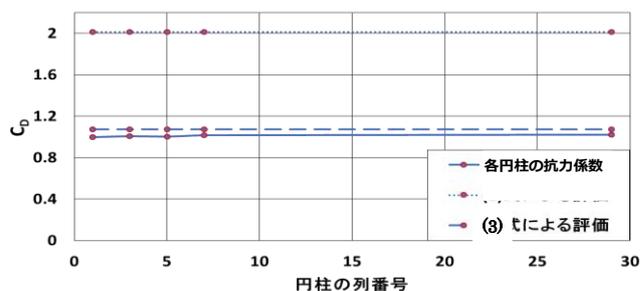


図 3.2 各算定式による抗力係数の比較 Case II

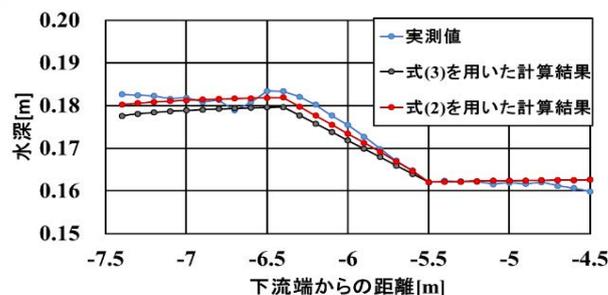


図 4.1 水面形計算結果 Case I

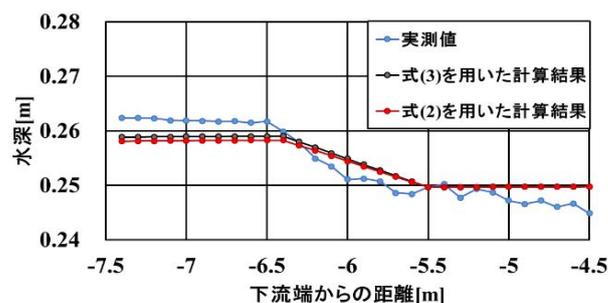


図 4.2 水面形計算結果 Case II

より精度よく水面形を計算できる。

- (3) 流下方向に対し十分な長さが無い円柱群では、各円柱群の抗力係数を考慮する必要がある。

### 参考文献

- 1) 林建二郎 他：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, pp475-480, 2001
- 2) 阿戸理樹 他：不等流における非水没抵抗体の流体力の評価法，土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.5, I\_751-756, 2018