

円柱群を有する開水路流れにおける円柱群内の抵抗変化と水面形の関係

呉工業高等専門学校専攻科 学生会員 ○鹿島 浩暉
 呉工業高等専門学校 正会員 黒川 岳司

1. 序論

河道内の樹木群は、河道での洪水流の水位上昇や土砂体積による河積の減少などの治水上の支障をもたらす反面、透過性水制の役割を果たし堤防や低水路の保護などの効用もあることが知られている。このため、樹木群の治水上の利点・欠点を適切に評価することが重要となる。特に、樹木群のような抵抗体を有する流れにおいて正確な水位予測を行うには、抵抗体の流体力特性を正しく評価する必要がある。これには、樹木等は非水没であること、つまり自由水面を有する抵抗体であることの影響や、さらに抵抗体内で流体力が変化することの影響を考える必要がある。そこで、本研究では、非水没円柱群を有する流れの水深変化を実測し、円柱群内での抗力係数の変化を調べ、その抗力係数を使用し水面形を求めることで円柱群内の抵抗変化と水面形の関係について実験的に検討した。

2. 非水没抵抗体の流体力と抵抗係数の評価法

2.1 非水没抵抗体の流体力

水深 h の自由水面中にある非水没抵抗体を直径 d の円柱とすると、接近流速（断面平均流速） U の流体によって円柱 1 本あたりに作用する流体力 F は、円柱後流の剥離域（剥離域長さを $k \cdot d$ とする。）の形成に伴う流体力を加味すると次式¹⁾で表される。

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D A U^2 - \rho g A k d \frac{dh}{dx} \quad (1)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 g は重力加速度、 C_D は抗力係数、 A は円柱の代表面積 ($A = d \cdot h$) である。

2.2 非水没円柱群を有する流れの水深変化

流体力 F が作用する円柱が 1m^2 当たり N 本ある円柱群の場合の水深変化 dh/dx は、次式¹⁾で表される。

$$\frac{dh}{dx} = \frac{-\frac{dz_b}{dx} \cdot \frac{U^2 n^2}{h^3} - \frac{C_D N A U^2}{2gh}}{1 - Fr^2 - \frac{N A k d}{\rho g h}} \quad (2)$$

抗力係数 C_D を算出する際には(2)式¹⁾を用いる。 Fr ($=U/\sqrt{gh}$) はフルード数、 $-dz_b/dx$ は水路勾配であり、 $U^2 n^2/h^3$ (n : 粗度係数) が壁面摩擦力、 $C_D N A U^2/2gh$ が接近流速 U によって作用する流体力、 $N A k d/\rho g h$ が剥離域の圧力低下による影響を考慮した項である。

3. 実験条件および方法

使用した開水路は、図1に示す長さ8m、幅0.4mの傾斜可変水路で、上流端から3.0~4.0mに水路全幅にわたって円柱群を設置した。各円柱は直径 $d=0.01\text{m}$ で、図1中に示すように0.0334m間隔で千鳥状に計318本設置した。なお、円柱の配置密度 λ は0.0675であり、実際の河川の杭出し水制の密度 $\lambda(0.02 < \lambda < 0.1)$ の範囲である。

これまでの実験²⁾では、円柱群内を横断平均された水深が流下方向に変化しない疑似等流の条件であったが、本実験では、より一般性を持たせるために、円柱群内で水深が縦断方向に変化する不等流とし、特に円柱後流の剥離域形成の影響が表れやすい加速流の状態で行うこととした。水路勾配は1.906%で固定し、流量のみを変化させて9回の実験を行った。表1に各Caseの実験条件を示す。限界水深 h_c と等流水深 h_0 を比較するとすべてのCaseで h_c の方が大きく、水路としては急勾配水路であるが、円柱群内では抵抗の大きさから水深が上がり、すべてのCaseで常流 ($Fr < 1, h > h_c$) であった。

各Caseにおいて、円柱の配置に合わせて0.0334m間隔で、円柱群内およびその上流側、下流側の水路中央で計38点分の水深を、容量式波高計(KENEK CHT6-30/CH-604-3)で測定した。

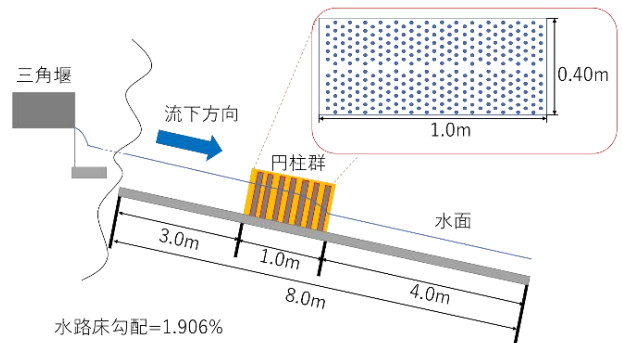


図1 実験水路の概略

表1 各Caseの実験条件

Case	流量(L/s)	円柱群内			水路特性	
		流況	$Fr(U/\sqrt{gh})$	kd	限界水深(cm)	等流水深(cm)
1	10.403	加速流	$0.258 < Fr < 0.723$	0.0116	4.10	2.59
2	11.754		$0.274 < Fr < 0.805$		4.45	2.78
3	11.553		$0.270 < Fr < 0.789$		4.40	2.75
4	18.601		$0.270 < Fr < 0.737$	0.009	6.04	3.66
5	19.188		$0.271 < Fr < 0.805$		6.17	3.73
6	18.824		$0.274 < Fr < 0.805$		6.09	3.69
7	15.234		$0.271 < Fr < 0.847$	0.01	5.29	3.25
8	15.413		$0.272 < Fr < 0.814$		5.33	3.27
9	15.014		$0.266 < Fr < 0.783$		5.24	3.22

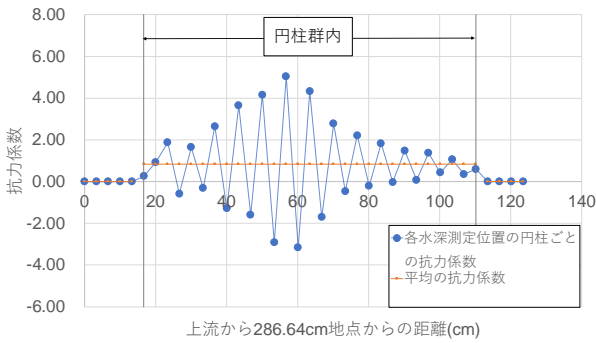


図2 抗力係数 C_D の変化 (Case9)

4. 実験結果および考察

各 Case とも条件が似ているため水面形の傾向は同様であった。急勾配水路において円柱群内で常流となったことから、円柱群内前半およびその上流側の水面形は S_1 曲線となったが、円柱群内中盤から激しい水位変動を伴って低下しはじめ、円柱群を出てしばらく流下した地点で限界水深まで低下した。つまり、円柱群内後半からその下流側では波状跳水のような状態であったと言える。以下では、Case9 を例に説明する。

4.1 円柱群内での抗力係数の変化

図2にCase9の抗力係数 C_D の算定結果を示す。水位変動に伴い C_D も正負で大きく変動し、その平均値は0.84であり、 Fr 数が0.2~0.8で C_D は1.4~0.9であるので³⁾、Case9の Fr 数 (0.266~0.783) の範囲では妥当な結果である。また、平均の抗力係数を軸として、各円柱の抗力係数が正、負の値をとる。

4.2 円柱群内の抵抗変化が水面形に及ぼす影響

$$h_2 = h_1 + (z_1 - z_2) + \frac{Q^2}{2g} \left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right) + \frac{n^2 Q^2 \Delta x}{2} \left(\frac{1}{A_1^2 R_1^{4/3}} + \frac{1}{A_2^2 R_2^{4/3}} \right) + \frac{C_D M Q^2 \Delta x}{4g} \left(\frac{A_1'}{B_1^2 h_1^3} + \frac{A_2'}{B_2^2 h_2^3} \right) + \frac{Mkd \Delta x}{2\rho g} \left(\frac{A_1'}{h_1} + \frac{A_2'}{h_2} \right) \quad (3)$$

上記の式は全水頭のエネルギー損失に接近流速によって作用する流体力の損失分(第5項)と剥離域の損失分(第6項)を考慮している。式中の M は単位長さ当たりの抵抗係数で、今回の場合、0.0334m 当たりの抵抗係数である。この式を使用し、標準逐次計算法で水面形を求めた。

図3は、計算開始点を支配断面 ($h=h_c$) とした場合と、円柱群後方とした場合の比較である。支配断面を始点とした場合は一時的に水面が低下し、実測と異なったため、円柱群後方を水面形計算の始点とすることとした。

図4は、円柱群内での抗力係数の変化を考慮しない、つまり抗力係数の平均値を使用した場合との比較である。平均値を用いると、当然ながら水位の上下変動は再現できないが、平均の水面形は概ね再現できている。

図5は、接近流速を求める際に円柱の幅による実質の水路幅の減少を考慮しない場合と、剥離域の影響を考慮しない場合の水面形である。(3)式では接近流速によって作用する流体力を考慮した項の方が剥離域の影響を

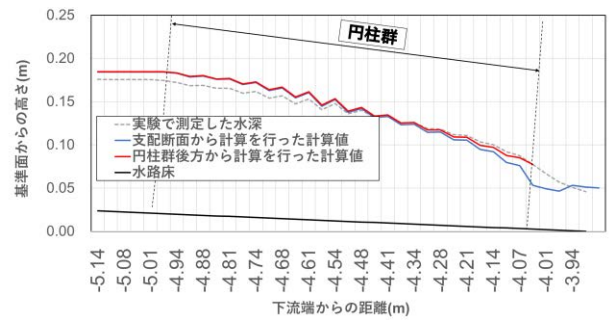


図3 計算開始地点の違いによる計算結果

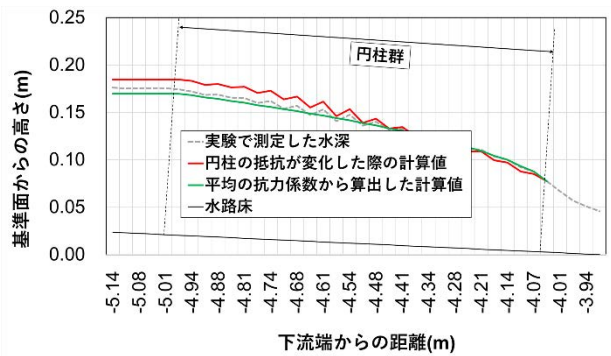


図4 抗力係数の変化がある時とない時の水面形

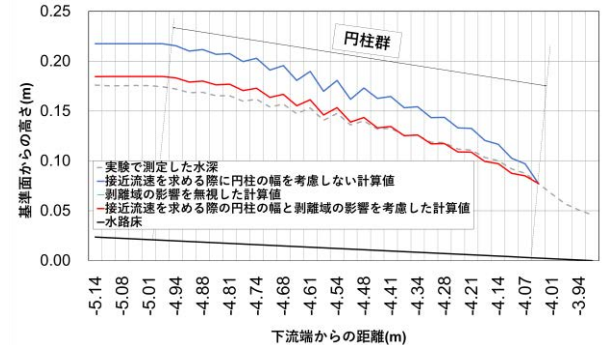


図5 接近流速を求める際の幅を考慮しない場合と剥離域の影響を考慮しない場合の水面形

考慮した項よりも水面形における影響が多岐である。

5. 結論

- (1) 円柱群内の抗力係数は、平均値を軸に正負に振動し、その振幅は流れの条件に応じて変化する。
- (2) 円柱群内の抗力係数の変化を考慮して水面形計算を行うと、円柱群内の水位変動も再現できる。ただし、支配断面付近では正確な計算が行えない。
- (3) 本実験の条件下では、水面形計算における円柱後流の剥離域形成の影響は小さい。
- (4) 平均の抗力係数を用いると、平均の水面形は概ね再現できる。

参考文献

- 1) 阿戸理樹他: 不等流計算における非水没抵抗力の流体力の評価法, 土木学会論文集 B1(水工学)Vol74, No5, pp751-756, 2018
- 2) 森 飛鳥: 円柱群を有する流れの水面形に及ぼす流体力に関する基礎的研究, 土木学会第76回年次学術講演会, II-152, 2021
- 3) 秋山壽一郎: 樹林帯の氾濫流抑制機能, 自然災害科学, JJSNDS 25-3, pp.268-275, 2006