

開水路中の杭水制に作用する流体力とその抵抗係数について

On the drag force acting on the pile dike in the open channel and its resistance coefficient

青木宗之*・吉野 隆**・福井吉孝***

Muneyuki AOKI Takashi YOSHINO and Yoshitaka FUKUI

*学生員 修(工) 東洋大学大学院 工学研究科 環境・デザイン専攻 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)

**正会員 博(工) 東洋大学准教授 理工学部機械工学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)

***正会員 工博 東洋大学教授 理工学部都市環境デザイン学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)

In order to reproduce the flow around the pile dike exactly, the model experiment and the numerical analysis were carried out. Throughout this research, we examined the form resistance term of the 2-D shallow water equation. By introducing the resistance coefficient α , reproducible precision of flow velocity was improved over 30%. By applying some observation data of depth h and flow velocity u , we decided the suitable value α . We concluded that the most suitable condition was Case2 in which we used depth h and flow velocity u just before each column. As a result, the reproducible ratio of the flow around the group of columns is over 80%, and its accuracy was the highest.

Key Words: drag force, resistance coefficient α , numerical analysis, pile dike

1. はじめに

近年の河川計画において、河川全体の自然の営みを視野に入れ、河川が本来有している生物の生育や育成、繁殖環境などを保全、創出するための多自然川づくりが求められている¹⁾。

著者らは、河川中に生息している水生生物である魚類に着目して研究を行っている²⁾。魚の行動は、(1)物理的要因(流速、水深、河床構成材料および河岸形状)や(2)化学的要因(水質)、(3)その他の要因(日照、水温および外敵の出現など)によって大きく変化する。また、河道内に杭水制(図-1)やブロック護岸などの河川構造物や植生群、樹木群などがある場合、流れなどの物理的要因は大きく変化する。それに連動して、魚の行動は大きく変化するといえる。

魚の行動特性を把握できれば、魚がどのように行動し、どのような場所に存在するかを明確にできる。その結果、魚にとって好ましい避難場所や休憩場所などを提案できるといえる。

著者らは、杭水制などの河川構造物が設置されることによって生じる流れとそれに対する魚の行動、対応についての解析を模型実験および数値計算によって行っている。数値計算においては、流れを二次元浅水流モデルにより、その流れに対する魚の行動をラン



図-1 杭水制(北上川水系砂鉄川:岩手県一関市)

ダムウォークモデルにより再現できることを示した²⁾。

実際、魚の行動は、主として流速に支配されることから、杭水制の内部やその周辺の流れを詳細に再現することが重要である。そのためには、杭水制の形状抵抗や配置、配列による抵抗を考慮する必要がある。なお、形状抵抗は抗力係数 C_D を用いて表わす。杭水制は円柱であるため、 C_D はおよそ $1.0^3)$ である。一方、秋草⁴⁾は円柱型の水制を、福岡⁵⁾は河道内樹木群を、林⁶⁾は樹林帯を、清水⁷⁾は植生を疑似するために、模型実験で円柱を使用し、円柱群の C_D ($0.9 \sim 1.0^4)$, $1.2^5)$, $1.27^6)$, $1.0 \sim 1.5^7)$ を求めている。なお、これら既往の研究による円柱群配列は、千鳥配列⁴⁻⁷⁾および整列配列⁴⁾で設置されている(図-2)。これらの C_D は、円柱群全体での C_D でありながら、単一円柱の C_D と類似していることが分かる⁸⁾。しかし、円柱群の配置や配

列についての流体抵抗までは言及されていない。円柱群周辺での流れは、円柱の直径や設置間隔によって異なってくる。特に、円柱群密度が大きくなると、流れ特性が大きく変化すると考えられる。

本研究の目的の一つは、杭水制内外における流れの数値解析の再現精度を増進させることである。著者らは、円柱群の配置や配列の違いによる抵抗を考慮することで、その目的を達成することができると考え、二次元浅水流方程式の形状抵抗項の再検討を行うこととした。そのために、模型実験および数値解析を行った。

2. 流れの支配方程式について

数値計算により、水深および流速を求めるために、以下に示す二次元浅水流方程式と連続式を使用する。

<x 方向の運動方程式>

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} \\ &= -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{1}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial M}{\partial x} \right) \quad (1) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial M}{\partial y} \right) - \frac{g}{K^2} M \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned}$$

<y 方向の運動方程式>

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} \\ &= -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{1}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial N}{\partial x} \right) \quad (2) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{g}{K^2} N \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned}$$

<連続式>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ここに、 u, v : x, y 方向の平均流速(m/s), M, N : x, y 方向の流量フラックス(m²/s), g : 重力加速度 (=9.8(m/s²)), h : 水深(m), H : 水位 (=z+h(m)), z : 河床高(m), ε : 渦動粘性係数(m²/s)である。なお、渦動粘性係数 ε は次式で定義される。

$$\varepsilon = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad (4)$$

ここに、 κ : カルマン定数, u_* : 摩擦速度(m/s)である。また、(1), (2)式中の右辺第2項および第5項は、それぞれ底面抵抗項、円柱(群)の形状抵抗項である。 n : マニングの粗度係数(m^{-1/3}s), K : 円柱群の透過係数(m/s)である。福岡ら⁵⁾は、円柱群の透過性の大きさを表す

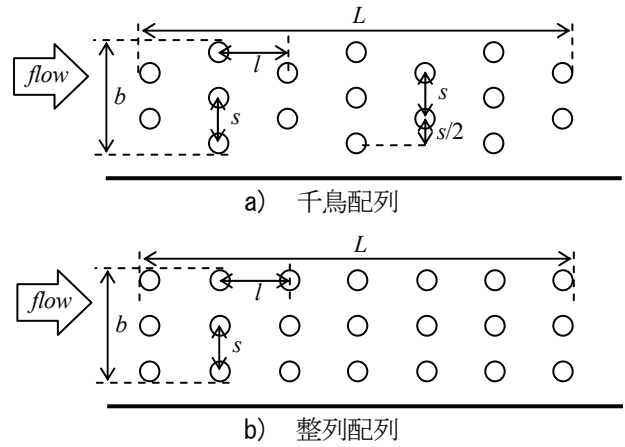


図-2 円柱配列（一様分布）

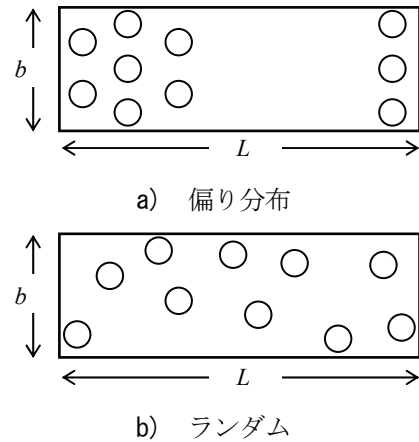


図-3 配置・配列の変化例（ a_w 一定）¹⁰⁾

抵抗特性として、透過係数 K を

$$K = \frac{1}{\sqrt{C_D \cdot a_w / 2g}} \quad (5)$$

で定義している。これは、河道計画においても使用されていることから^{3,9)}、著者らも参考にしている。ここに、 C_D : 円柱(群)の抗力係数であり、本研究では $C_D=1.0$ ^{3),4),7)}とした。 a_w : 単位体積の流体塊中にある x 方向における円柱群の投影面積(m²/m³)である。なお、 a_w は次式により定義される。

$$a_w = \frac{T \cdot a}{A \cdot h} \quad (6)$$

ここに、 T : 円柱本数, a : 円柱の投影面積 (=d×h(m²)), d : 円柱の直径(m), A : 円柱群設置面積 (=b×L(m²)), b : 円柱群設置幅(m), L : 円柱群設置長さ(m)である⁹⁾。しかし、本研究では図-2や図-3のように、円柱群配置方法の違いによって生じる抵抗も異なってくるということを考慮し、(5)式の透過係数 K を

$$K = \frac{1}{\sqrt{\alpha \cdot C_D \cdot a_w / 2g}} \quad (5')$$

とし、円柱群配置の違いによる抵抗係数 α を定義した。

3. 実験概要

実験に用いた水路は、水路幅 $B=0.8(m)$ 、水路全長 $10.8(m)$ 、水路勾配 $1/500$ の矩形断面水路であり(図-4)、表-1 に示すケースで実験を行った。ここで、表-1 中密度 β は

$$\lambda = \frac{T \cdot \frac{\pi d^2}{4}}{A} \quad (7)$$

で定義される．観測領域は $2.0(\text{m}) \times 0.8(\text{m})$ である．また，擬似杭水制として，直径 $d=0.5(\text{cm})$ ，高さ $15(\text{cm})$ の木製円柱を使用した．なお，円柱群は水路右岸側に設置し，常に水没しない高さである．円柱群設置面積 A は $b \times L = 0.085 \times 1.925(\text{m}^2)$ である．

円柱配列は、千鳥配列の方が整列配列よりも流速低減効果が高く、実河川でも多く採用されている一様な分布の千鳥配列とした（図-1. 2 a））。

実際の河川に設置されている杭水制の例は、直径 d が 15(cm)~20(cm)であり、横断方向設置間隔 s および縦断方向設置間隔 l は 50(cm)~100(cm)が多い。本実験で採用した d, s, l は、水理模型実験に対して推奨されている縮尺模型 1/10~1/30¹¹⁾に対応している。

実験は、本研究で定義した α を算出するために、円柱に作用する流体力 F_D 、流速および水深の測定を行った。 F_D の測定には、表-2に示した精度の歪ゲージ式3分力計（日章電機製：LMC-3502-10N）を使用した。測定方法は、円柱が設置されている箇所（図-5⁶）に3分力計を設置し（図-5⁶）、円柱一本一本に働く F_D を測定した。なお、 F_D は最上流端（ $x=0(\text{cm})$ ）の2本の円柱で測定を行った。それ以降は横断方向に設置されている円柱が3本、2本…となるように、 $x=12, 24, 36, 48, 60, 72, 84, 96, 108, 120, 132, 144, 156, 168, 180, 192(\text{cm})$ に設置されている円柱の F_D を測定した。流速の測定には、二次元電磁流速計（KENEK 製：VM2001）を、水深の測定にはポイントゲージ（三光精密工業製）を使用し、図-6に示した測点（ $x=-2, 0, 194(\text{cm})$ および $x=2\sim 192$ を $10(\text{cm})$ 毎， $y=1\sim 11(\text{cm})$ を $1(\text{cm})$ 毎， $y=13(\text{cm})$, $y=15\sim 75(\text{cm})$ を $10(\text{cm})$ 毎）で測定を行った。また、実験時の平均水深は $10(\text{cm})$ である。

実河川において、流体力 F_D を測定することは困難であるが、模型実験より得られた流体力 F_D の結果から算出される α は無次元数である。そのため、本実験で得られた α は、実河川にも適用できると考えている。

4. 実験結果

4.1 流体力 F_D

図-7. 8 に、円柱群内の縦断方向の平均流速 u の変

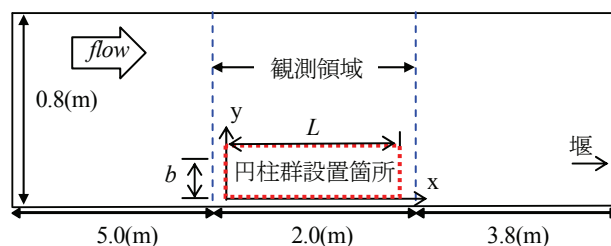


図-4 実験水路図

表-1 実験ケース

	円柱 本数 (本)	流量 Q (l/s)	横断方向 設置間隔 s (cm)	縦断方向 設置間隔 l (cm)	密生度 $\lambda (\times 10^{-2})$
Run1	122	28	4	4	1.46

表-2 3 分力計の設置方法

定格負荷	$F_x=F_y=F_z=10(\text{N})$
定格出力	約0.5mV/V (約1000×10 ⁻⁶ ストレーン)
非直線性	±0.2%FS
ヒステリシス	±0.2%FS
許容過負荷	±150%FS
干渉度	±2%FS/FS
零点の温度影響	±0.01%FS/°C
感度の温度影響	±0.05%Reading/°C

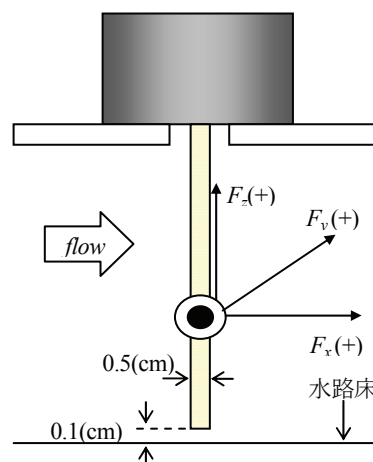


図-5 3分力計の設置方法

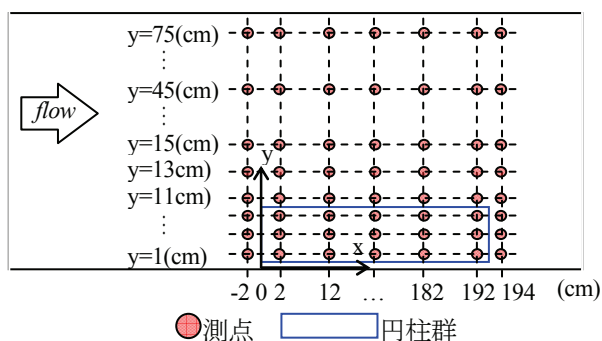


図-6 流速および水深の測点の簡略図

化図および円柱に作用する流体力 F_D を示す.

流速および流体力は、流下するにつれて低減していることが分かる。なお、 α を考慮した F_D は、以下の式で定義される。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho \cdot \alpha \cdot C_D \cdot a \cdot u^2 \quad (8)$$

ここに、 ρ ：水の密度（ $=1000(\text{kg/m}^3)$ ）， u ：流速(m/s)である。円柱群によって流速が低減された結果、 F_D も小さくなった。ここで、本実験での Re 数の範囲は $4.0 \times 10^2 \sim 2.2 \times 10^3$ であるため、円柱の C_D は 1.0^9 である。また、 $x/L=1$ では u が約1/6減少しているのにも関わらず、 F_D は約2/3であり、 u に比して大きな F_D になっている。永井ら¹²⁾は、 $s/d > 6$ であれば円柱間の相互干渉は無視でき、 $l/d > 6.0$ であれば下流側円柱は上流側円柱の後流域に入るものの、上流側円柱によって形成される渦の影響を受けないとしている。本実験での s/d 、 l/d は8であるため、円柱間の相互干渉や渦による影響はないと考えられる。そこで、円柱群内の乱れ($-\rho \overline{u'v'}$)に着目した。図-9に、円柱群内における縦断方向の乱れ($-\rho \overline{u'v'}$)の変化図を示す。福岡ら¹³⁾と同様に、乱れは流下するにつれて大きくなっていることが分かる。このことが、 u の値に対して F_D が大きくなってしまった原因だと考えられる。これは、円柱群のある場で生じる流れの特性であり、 α を考慮することで、正確な F_D を見積もることができると考えられる。

4.2 円柱群配置の違いによる抵抗係数 α の算出

実験結果を流れの解析に反映させるために、得られた F_D より、 α を算出した。なお α は、(8)式を変形し

$$\alpha = \frac{2F_D}{\rho \cdot C_D \cdot a \cdot u^2} \quad (8')$$

となる。しかし、 α を算出する際に使用する、 u や a に含まれる h をどのような場所、または条件で使用するかは、厳密には定められていない。

そこで本研究では、以下の二通りの方法で α を算出することとした(表-3、図-10)。

1) 流れの安定した、最上流にある円柱での直上流(2(cm))の水深 h および平均流速 u を用いた方法である。つまり、 F_D に対して一定の h および u を用いた場合である。

2) それぞれの円柱の直上流(2(cm)上流)での h および平均流速 u を使用した。つまり、 F_D に対して異なる h および u を用いた場合である。

(1) Case1による算出：一定の h および u を用いた場合

図-11に、Case1の方法で算出した α を示す。 u および h が、それぞれの F_D に対して一定の値であるため、 α も F_D と同様に、流下するにつれて低減していることが見てとれる。

(2) Case2による算出：異なる h および u を用いた場合

図-12に、Case2の方法で算出した α を示す。 α は、

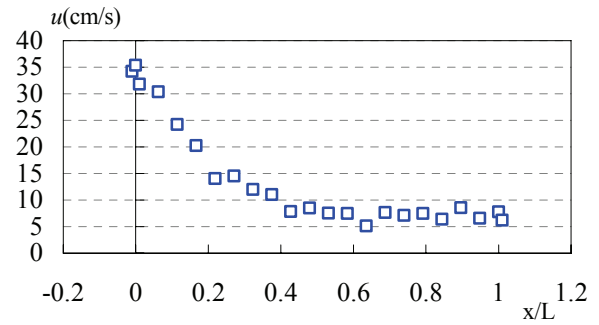


図-7 縦断方向の平均流速の u 変化図($y/B=0.1125$)

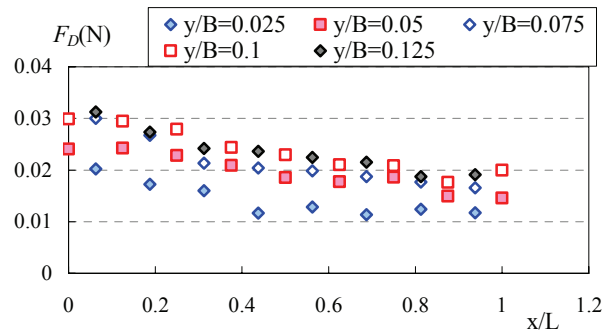


図-8 円柱に作用する流体力 F_D

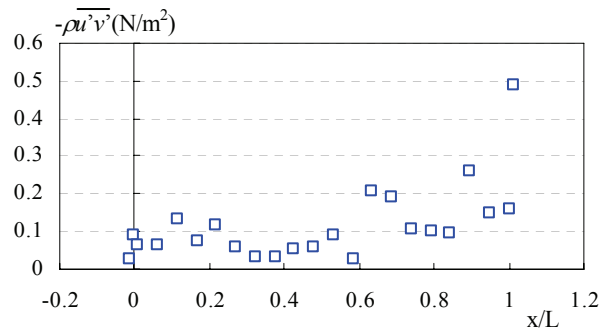


図-9 縦断方向の乱れ($-\rho \overline{u'v'}$)の変化図($y/B=0.1125$)

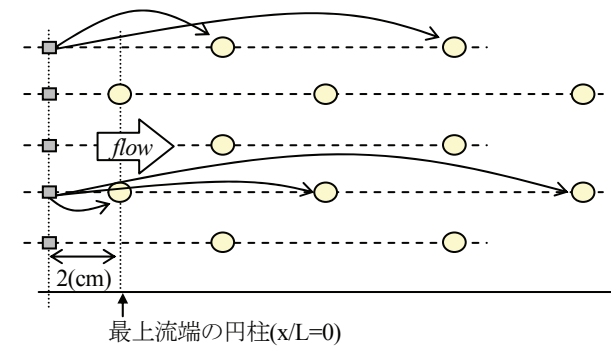
多少のバラツキはあるが、流下するにつれて増加していることが分かる。これは、 h および u が、それぞれの F_D に対して異なる値であるためである。特に、円柱群内では u が大きく低減するため、 α の算出に影響することが分かる。

ここで、 x/L が同値であれば、算出した α の値に大きな差異は見られなかった。そのため、 $y=4, 8(\text{cm})$ の箇所での値、 $y=2, 6, 10(\text{cm})$ の箇所での値を平均し、 α の値を定量化した。なお図-11, 12において、 α_f は $x/L=0$ 、つまり最上流端における円柱での α の値である。 α_i は、 x/L の箇所での各円柱の α の値である。本実験で得られた α_f は、約1.0であったため、 $\alpha_f=1.0$ とした。

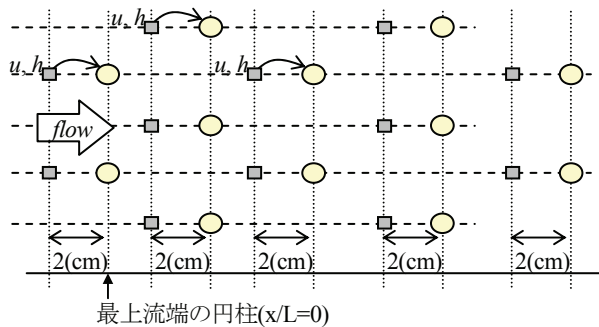
以上の二通りの方法より算出したが、 u および h の選定如何によって、 F_D が同一の値であっても、 α は大きく変化することが分かる。なお、表-3のCase3では、 α を考慮しないため、 α の算出に使用する u, h は必要がない。つまり、どの円柱に対しても $\alpha=1.0$ となる。

表-3 円柱群配置の違いによる抵抗係数 α の算出に使用する水深 h , 流速 u

Case1	最上流にある円柱より2(cm)上流	一定の u, h
Case2	それぞれの円柱の直上流(2(cm)上流)	異なる u, h
Case3	α を算出せず, $\alpha=1.0, C_D=1.0$ として計算を行う	u, h は使用しない



a) Case1の方法で使用する u, h の箇所



b) Case2の方法で使用する u, h の箇所

■ u, h ● 円柱

図-10 円柱群配置の違いによる抵抗係数 α の算出に使用する水深 h , 流速 u の簡略図

5. 数値解析

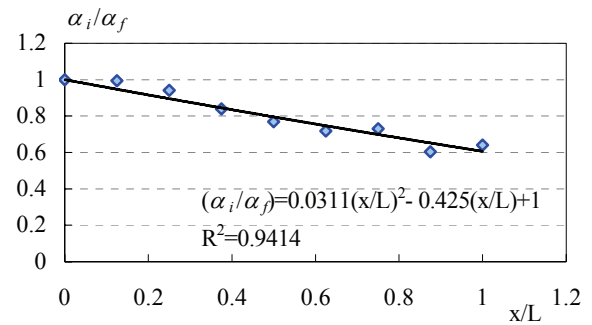
5.1 離散化について

流れの支配方程式は, 有限差分法を用いて離散化した. 時間項には前進差分, 移流項には風上差分, その他の項には中央差分を適用している. なお, 格子については, スタッガード格子を採用した.

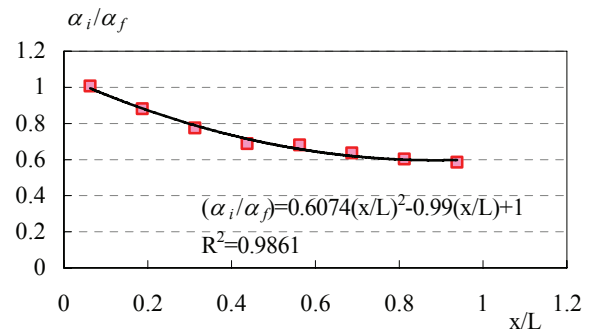
5.2 計算条件について

計算条件は, $dt=0.0001(s)$ とし, 流れを安定させるために計算時間は200(s)とした. なお, x, y 方向のメッシュは, それぞれ540個および40個であり, 計算水路も実験水路と同様に1/500の水路勾配を与えた.

また, (4)式の渦動粘性係数 ε に含まれる, カルマン定数 κ には $0.4(m^2/s)^{1/4}$, マニングの粗度係数 n は $0.015(m^{-1/3}s)$ を与えて計算を行った.

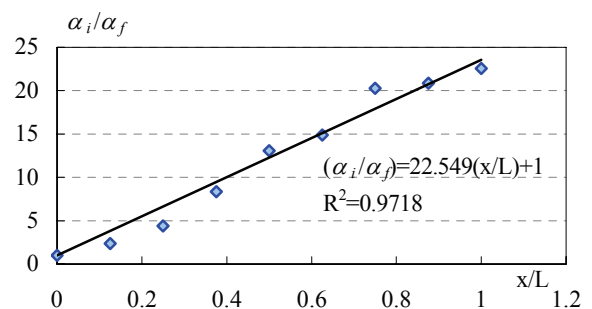


a) $y=4, 8(cm)$

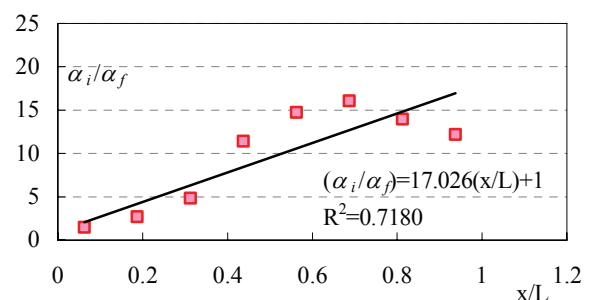


b) $y=2, 6, 10(cm)$

図-11 Case1の方法で算出した α



a) $y=4, 8(cm)$



b) $y=2, 6, 10(cm)$

図-12 Case2の方法で算出した α

5.3 境界条件について

境界条件は, 上流端においては, 一定の流量フラックスを与えた. また, 下流端においては, 実験より得られた流量 Q と水深 h の関係(図-13)をもとに, 流量フラックスを与えた. なお, 壁に面したメッシュにおいては, y 方向の流速 v を0とした.

5.4 透過係数 K について

K は、その値が 0 に近づくほど通水しにくくなり、大きくなるほど通水しやすくなるという特徴を持っている。つまり、 α が大きいほど通水しにくくなり、小さいほど通水しやすくなる。

(5') 式中の α_i に、Case1, 2 より算出した α_i/α_f の値 (図-11, 12) を代入し、 K を算出した (図-14)。これらは、Case1, 2 の方法で算出した値であり、 α を算出した箇所の u, h が反映されている。この算出されたそれぞれのケースの K を (1), (2) 式に代入し計算を行った。

また、円柱群配置による抵抗係数 $\alpha=1.0$ とし、 α を考慮しないケース (Case3 とする) を加えた。ゆえに、計 3 ケースにおいて、実測値との比較検討を行うものとする。なお、本研究での α_f の実験値が 1.0 であったため、各ケースにおいて、 $\alpha_f=1.0$ としている。また、今回の検討ケースでの a_w は $3.728(\text{m}^2/\text{m}^3)$ であるため、 $x/L=0$ での K は 2.2929 となっている。つまり、(5') 式に α_f および a_w を代入することで、図-14 中に表記されている近似式の切片が決定する。

5.5 計算結果について

図-15 に、各検討ケースにおける平面流況を示す。各ケースにおいて、円柱群による水刃など、実測値と同様の流況が再現されている。また、図-16, 17 に、各箇所での計算結果 (水深, 流速) を示す。水深の計算では、各ケースにおいて、各箇所の再現率 R は 95(%) 以上であり、良好に再現できている。ここで、再現率 R は

$$\left. \begin{aligned} C_i < E_i \text{ のとき } R &= \frac{C_i}{E_i} \times 100(\%) \\ E_i < C_i \text{ のとき } R &= \frac{E_i}{C_i} \times 100(\%) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

で定義した。ここに、 C_i : 各測点における計算結果の水深 h または流速 u, v , E_i : 各測点における実験結果の水深 h または流速 u, v である。

流速の計算においても、円柱群の設置されていない主流部および側壁部での再現率は、Case1, 3 では 85~95(%)、Case2 では 95(%) 以上であり、良好な結果を得た。また、各ケースにおいて、円柱群流入直後 ($0 < x/L < 0.2$) での流速の再現性は、80(%) 以上の再現率である。しかし、Case1, 3 では、流下するにつれて再現精度が悪くなっている。円柱群内における再現率は 30~50(%) であり、円柱群際における再現率は 50~70(%) あった。一方、Case2 における再現率は、Case1, 3 の精度よりも 10~30(%) 以上高く、円柱群内では 70~80(%)、円柱群際では 85(%) 以上の再現率であった。以上の結果は、 K , つまり、 α の設定によって得られた結果である。

図-18, 19 に、流速 u, v の横断分布図を示す。図-18

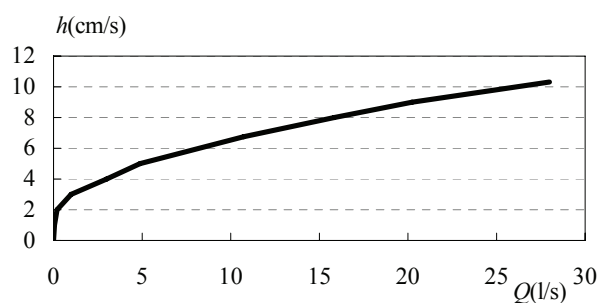
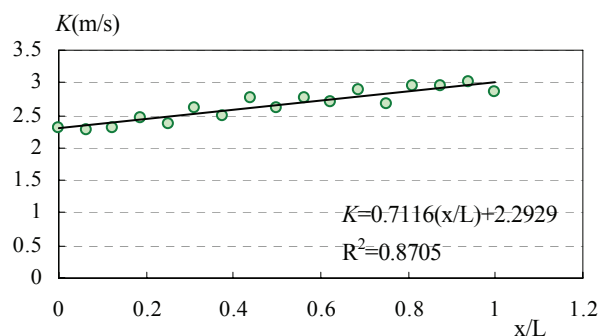
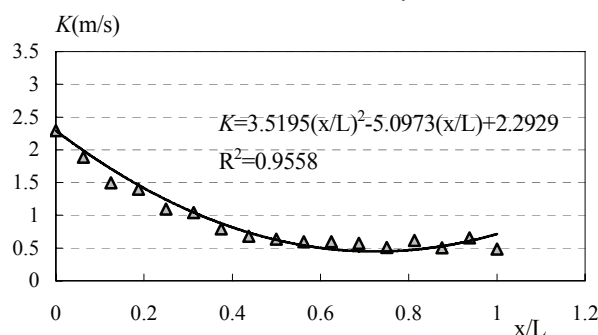


図-13 下流端での流量 Q と水深 h の関係



a) Case1 の方法で算出した α_i/α_f を (5') 式に代入

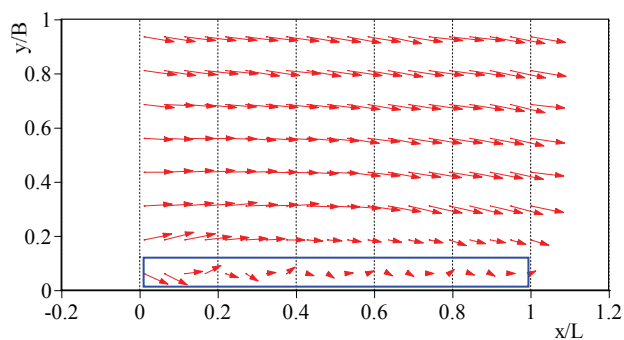


b) Case2 の方法で算出した α_i/α_f を (5') 式に代入

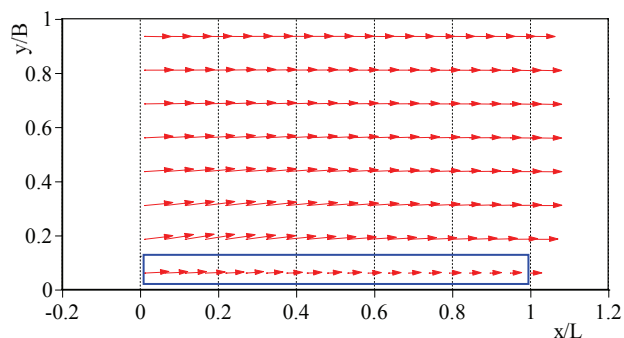
図-14 数値計算に使用した透過係数 K

では、各ケースにおいて、円柱群による流速低減を再現できている。図-19 では、各ケースとも $y/B=0.3125$ までの再現率は 85(%) 以上であるが、それ以降は約 60~70(%) と低下した (図-19 a))。 $x/L=1$ (図-19 b)) でも、各ケースの再現率は約 60~80(%) であり、流速 u に比べ、流速 v の再現性が低く、実測値よりも大きな値になっている。これは、横断方向 (y 方向) の円柱の抵抗係数 C_L (揚力係数) を考慮していないためだと考えられる。 C_L は、 C_D よりも小さくなるため¹⁵⁾、 y 方向の透過性は、 x 方向よりも大きくなる。しかし、(5') 式より算出する K は、 x 方向の円柱の抵抗係数 (C_D) を代入しているため、 C_L よりも抵抗を高く見積もっている。ゆえに、 x, y 方向の円柱の抵抗係数 C_D, C_L を考慮し、(5') 式の K を算出することが望ましい。

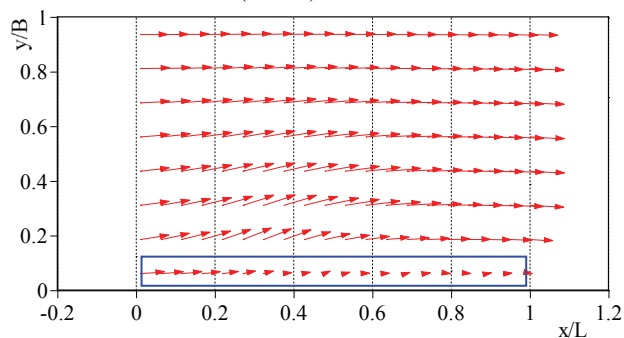
杭水制などの構造物がある場の流れを詳細に再現するためには、Case2 の方法で α を算出するほうが良いことが分かった。その際、計算対象点となる場所に見あった α (図-12) の値を選定し、透過係数 K (図-14 b))



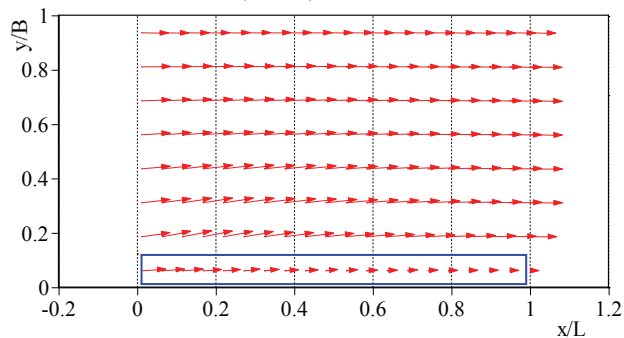
a) 実測値 円柱群



b) 計算値(Case1) 円柱群



c) 計算値(Case2) 円柱群



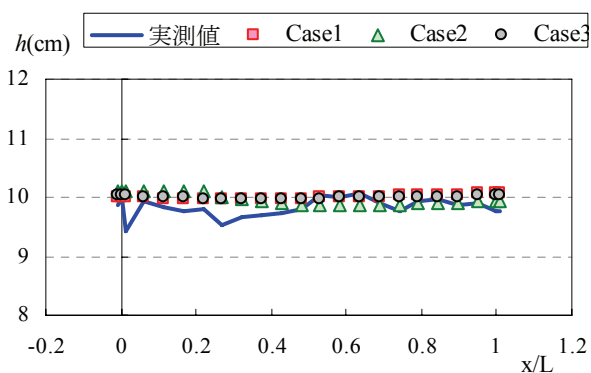
d) 計算値(Case3) 円柱群

図-15 平面流況

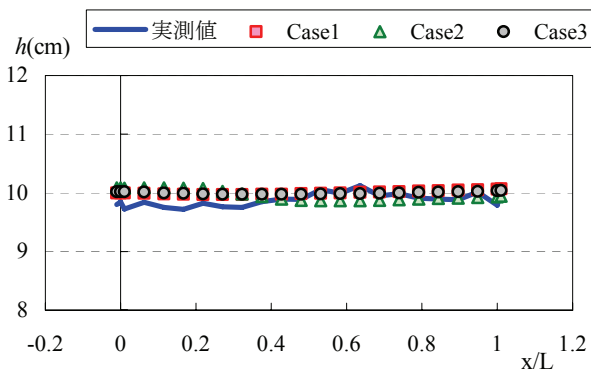
を算出する必要がある。

5.6 Case2 より求めた α の妥当性の検証について

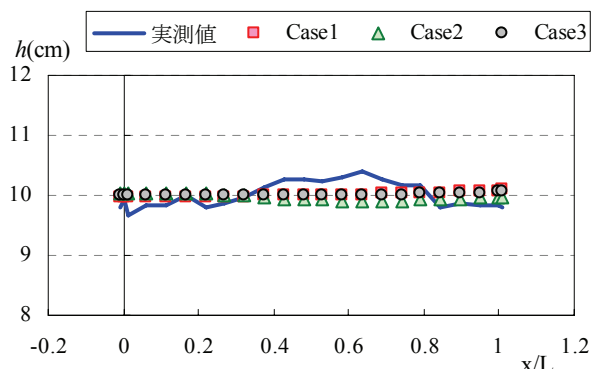
Case2 の方法で算出した α の妥当性を検証するために、表-4 のケースにおいて数値計算を行った。これは、Run1($Q=28(l/s)$)より得られた実験結果 F_D をもとに、Case2 の方法で算出した α を流量 Q の異なる Run2, 3,



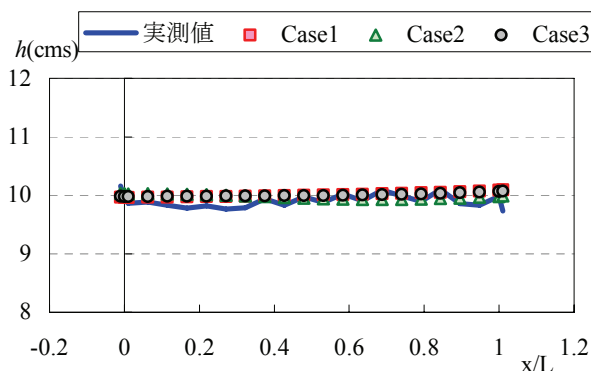
a) 円柱群内, $y/B=0.1125$



b) 円柱群際, $y/B=0.1375$



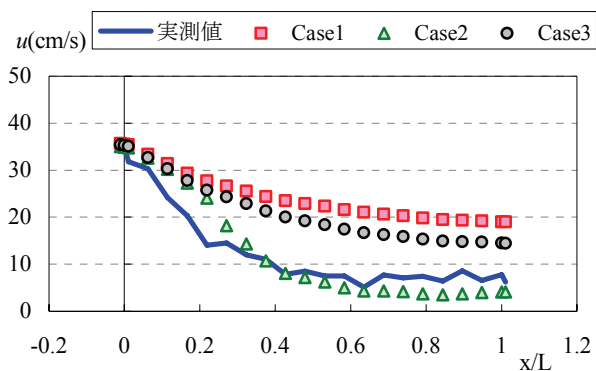
c) 主流部, $y/B=0.5625$



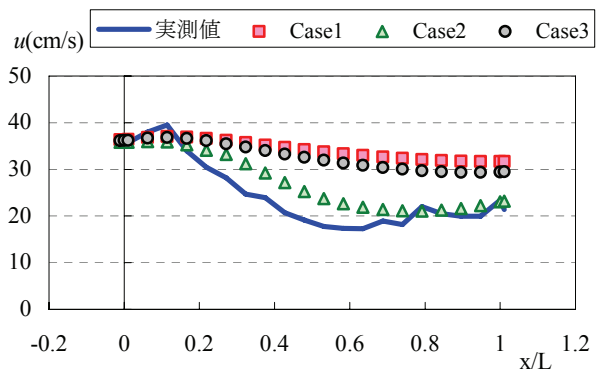
d) 側壁部, $y/B=0.9375$

図-16 各箇所での計算結果 (水深)

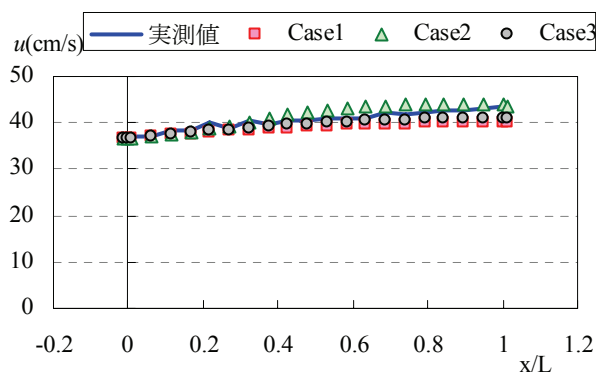
流量 Q は同一で配列が異なる Run4 に適用した。また、円柱を配置した x/L の値は全て同一である。なお、Run2~4 の F_D は測定していない。ここで、Run4 の a_w は $4.492(m^2/m^3)$ のため、 $x/L=0$ での K は 2.0889 となる。



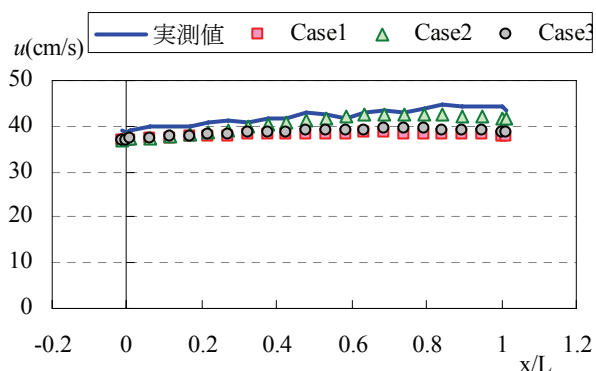
a) 円柱群内, $y/B=0.1125$



b) 円柱群際, $y/B=0.1375$



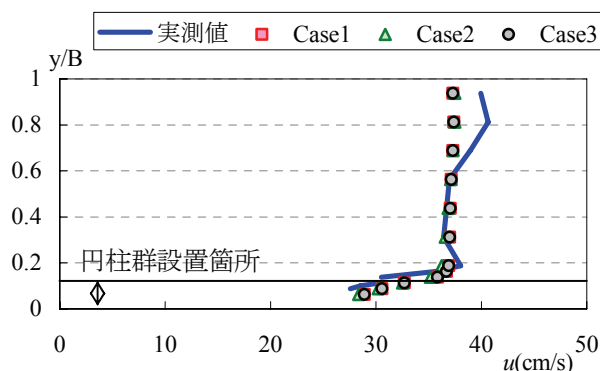
c) 主流部, $y/B=0.5625$



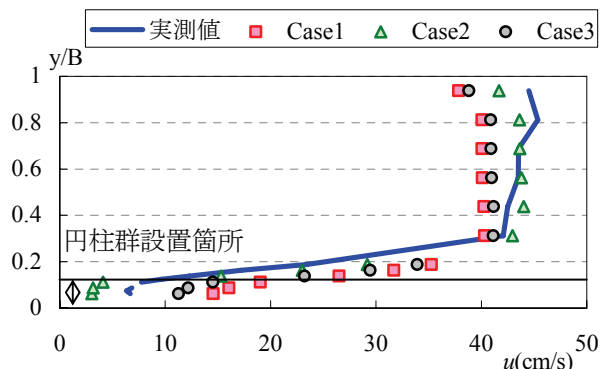
d) 側壁部, $y/B=0.9375$

図-17 各箇所での計算結果 (流速)

また, Case1, 3 での計算も行い, 比較検討した. なお, 下流端での境界条件は, Run1 と同様に実験より得られた流量 Q と水深 h の関係 (図-13, 20) より, 流量フラックスを与えた.

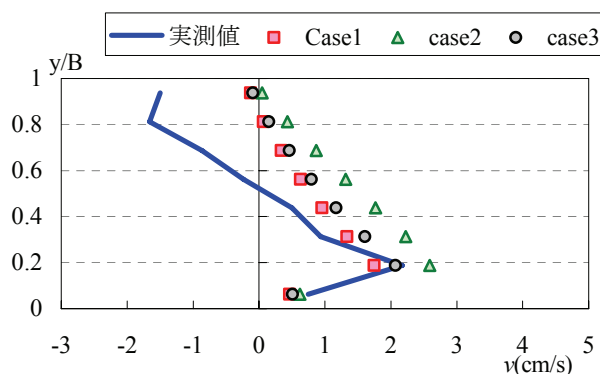


a) 円柱群上流部, $x/L=0.1146$

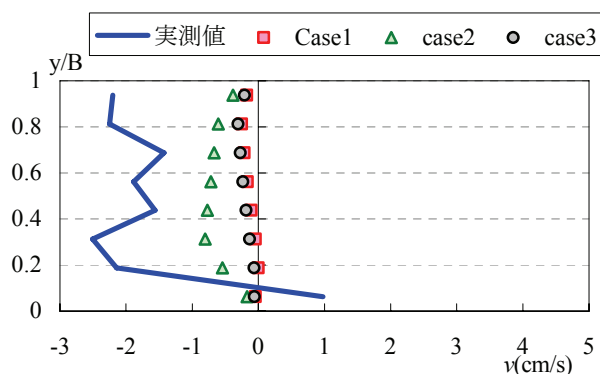


b) 円柱群下流部, $x/L=1$

図-18 流速 u の横断分布図



a) 円柱群上流部, $x/L=0.1146$



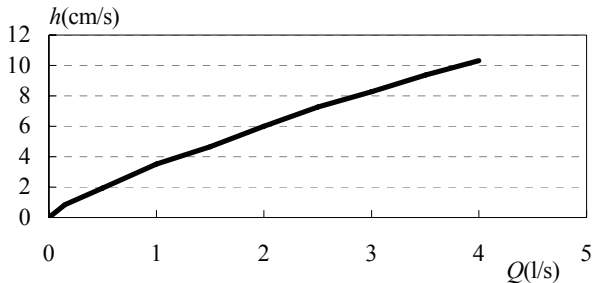
b) 円柱群下流部, $x/L=1$

図-19 流速 v の横断分布図

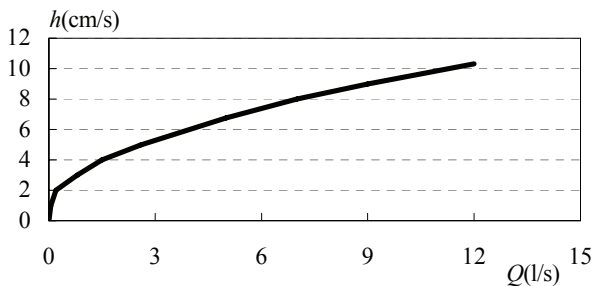
図-21~23 に, Run2~4 における円柱群設置箇所での計算結果を示す. 流量が変化した Run2, 3, 流量が同一であり円柱群配列が異なる Run4 においても, Run1 と

表-3 検証ケース一覧表

	円柱 本数 (本)	流量 Q (l/s)	横断方向 設置間隔 s (cm)	縦断方向 設置間隔 l (cm)	密生度 $\lambda (\times 10^{-2})$	配列
Run2	122	4	4	4	1.46	千鳥
Run3	122	4	4	4	1.46	千鳥
Run4	147	28	4	4	1.76	整列

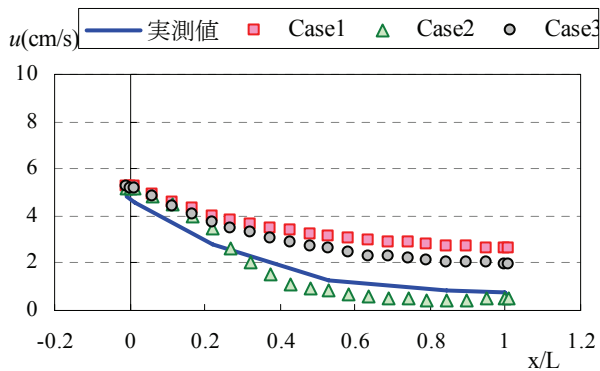


a) Run2

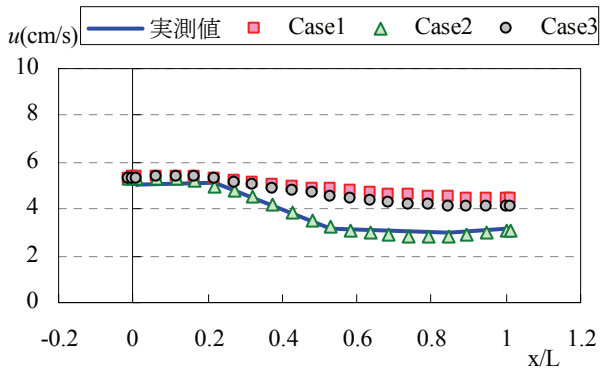


b) Run3

図-20 下流端での流量 Q と水深 h の関係(Run2, 3)

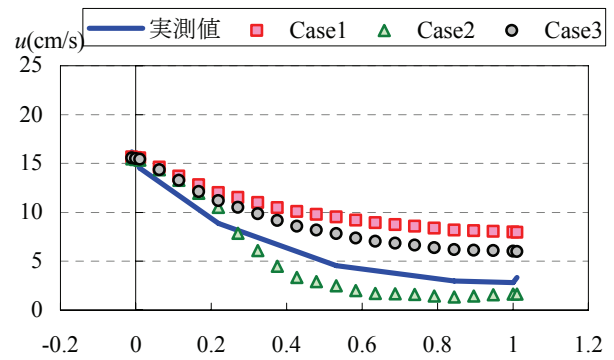


a) 円柱群内, $y/B=0.1125$

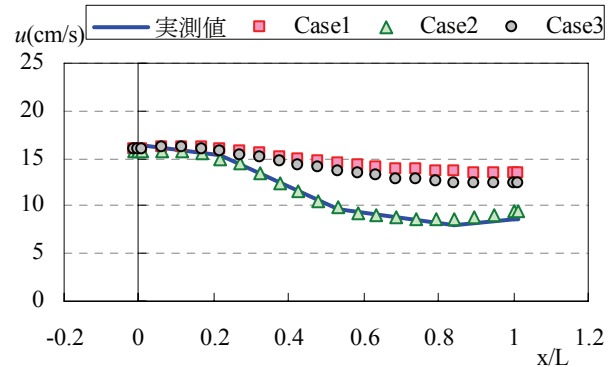


b) 円柱群際, $y/B=0.1375$

図-21 Run2 における円柱群設置箇所での計算結果

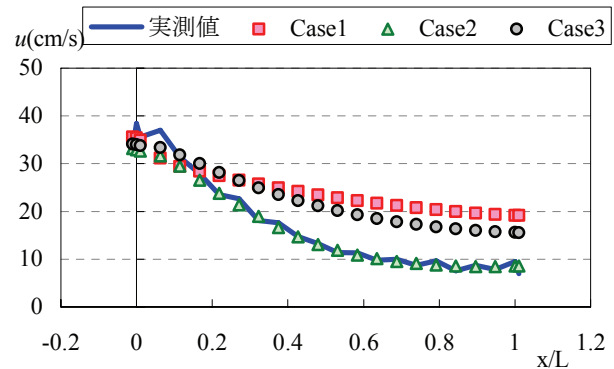


a) 円柱群内, $y/B=0.1125$

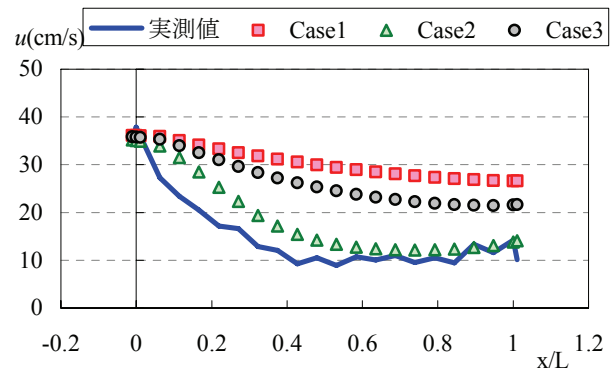


b) 円柱群際, $y/B=0.1375$

図-22 Run3 における円柱群設置箇所での計算結果



a) 円柱群内, $y/B=0.1125$



b) 円柱群際, $y/B=0.1375$

図-23 Run4 における円柱群設置箇所での計算結果

同様に円柱群流入直後($0 < x/L < 0.2$)での流速の再現率は80(%)以上であり、精度が高い。円柱群際での流速の再

現率は、Case1, 3 においては約 60(%)であるが、Case2 では 95(%)以上であり、Case1,3 に比べ 35(%)の精度が上がった。また、Run2, 3 での円柱群内の流速は、Case1, 3 では約 40(%)、Case2 では約 80(%)の再現率であり、Run4 では 90(%)以上の再現率であった。

つまり、本研究で定義した、円柱群配置の違いによる抵抗係数 α の値は妥当であり、流量が変化した場合や円柱群配列が異なった場合でも、Case2 の方法で算出した α の値（図-12）を使用することで流れを良好に再現できることが分かった。そのため、計算を行うことで円柱に働く大まかな F_D は、予測可能である。

6. まとめ

本研究で得られた知見は、以下の通りである。

1) 本研究で定義した、円柱群配置の違いによる抵抗係数 α を考慮することにより、流速の再現精度は 30(%)以上増進することが分かった。なお、円柱群配置の違いによる抵抗係数 α は、二通りの方法で算出したが、それぞれの円柱の直上流での水深 h および流速 u を使用する Case2 の方法が好ましかった。

2) 水深および円柱群の設置されていない主流部および側壁部での流速の再現率は 95(%)であり、精度が非常に高い。

3) Case2 の方法で算出した α を用いた結果、円柱群内部および円柱群際の流速の再現率は 80(%)以上であり、最も精度が高かった。

4) 杭水制などの構造物がある場の流れを詳細に再現するためには、適切な α の値を設定する必要がある。

5) α は、円柱群配列を変化させても適用可能である。しかし、今後さらに詳細な検討を加えることが必要である。

6) 著者らが目標としている、杭水制が設置されている河川内での魚の行動は、本解析において得られる水理量（水深、流速）とランダムウォークモデルを用いた魚の行動解析モデルを組み合わせることによって達成できると考える。

7. 今後の展望

本研究の解析法を用いることで、精度良く流れを再現できることが分かった。円柱群周辺における流れの再現精度をさらに増進させるためには、円柱群配置の違いによって、同一の a_w でも α は異なる値を表してしまうので、さらに a_w と α の関係を詳細に調べていく。

併せて、同一の円柱本数で a_w が変化する場合もあるため、その点についても検討を行う。

さらに、円柱群内での乱れにも着目し、それが α に及ぼす影響を解析に反映させていく。

謝辞：本研究は、東洋大学校友会奨学金および東洋大学特別研究の助成を受けて行った。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局 HP：多自然川づくり基本指針，
http://www.mlit.go.jp/river/press_blog/past_press/press/200607_12/061013/s02.pdf
- 2) 高水克哉，栗原朋之，青木宗之，内山文哉，福井吉孝：杭水制内外の流れと魚の挙動，水工学論文集，第 51 巻，pp.1273-1278, 2007
- 3) (財) 国土技術研究センター編：河道計画検討の手引き，山海堂，pp.89-117, 2003
- 4) 秋草 勲，吉川秀夫，坂上義次郎，芦田和男，土屋昭彦：水制に関する研究，土木研究所報告，第 107 号-6，pp.67-72, 1960
- 5) 福岡捷二，藤田光一：洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響，土木研究所報告，第 180 号-3，pp.135-143, 1990
- 6) 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，第 45 巻，pp.475-480, 2001
- 7) 清水義彦，辻本哲郎，中川博次，北村忠紀：直立性植生層を伴う流れ場の構造に関する実験的研究，土木学会論文集，No. 438/II-17，pp.31-40, 1991
- 8) 本間 仁：標準水理学，丸善，pp.151-152, 1984
- 9) (財) リバーフロント整備センター：河川における樹木管理の手引き，山海堂，pp. 107-167, 1999
- 10) 青木宗之，栗原朋之，高水克哉，福井吉孝：杭水制に働く流体力について，流体力の評価とその応用に関する講演集，第 4 巻，pp.31-37, 2006
- 11) 山本晃一：護岸・水制の計画・設計——歩先そして一歩手前——，山海堂，pp.327-330, 2003
- 12) 永井莊七郎，倉田克彦：開水路流れの中の円柱の相互干渉，土木学会論文報告集，第 196 号，pp.57-64, 1971
- 13) 福岡捷二，渡邊明英，高次 渉，坂本博紀：低水路沿い樹木群の密度変化による流れの混合と発達過程，水工学論文集，第 45 巻，pp.87-92, 2001
- 14) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版，pp.46-47, 2005
- 15) 福岡捷二，宮川朝浩，飛石 勝：円柱橋脚まわりの流れ，河床変動と流体力，水工学論文集，第 41 巻，pp.729-734, 1987

(2009 年 4 月 9 日 受付)