

# 円柱構造物に働く潮流力に関する基礎的研究 (第4報)

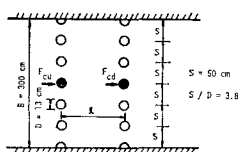
永井 莊七郎\*・倉田 克彦\*\*・日吉 功\*\*\*

## 1. 緒 言

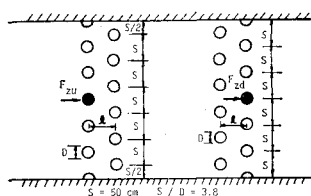
円柱構造物に働く潮流力に関する基礎的研究として、著者は、円柱に働く力におよぼす流れの方向と直角な方向に並んでいる隣接円柱の影響（円柱の横方向の相互干渉）、および流れの方向と平行な方向に並んでいる隣接円柱の影響（円柱の縦方向の相互干渉）とについて検討してきた<sup>1)~8)</sup>。しかし、実際の海洋構造物では、流れの方向と直角あるいは平行な方向に複数本の円柱が並んだ構造となっているので、それぞれの円柱に対する他の円柱がおよぼす影響は、上記の2つの影響（相互干渉）が合わさったものになる。そのため、本論文では流れの方向と直角な方向に並べられた円柱列が2列ある場合、円柱の中心間隔および円柱列の間隔によるそれぞれの円柱に働く力の変化を求め、円柱の横方向と縦方向の相互干渉とが合わさった時の円柱の相互干渉について検討した。

## 2. 実験施設、方法および条件

実験は大阪市立大学工学部海工実験場の長さ 42 m、幅 3.0 m、深さ 0.8 m のモルタル仕上げの開水路を用いておこなった。



(a)  $S/D=3.8$



(b)  $S/D=3.8$

図-1 円柱の配列

水路のほぼ中央付近に抵抗測定用の外径（直径） $D=13$  cm の塩化ビニルパイプを設け、この円柱と同じ直径・材質の円柱を図-1(a), (b)に示すように、流れの方向と直角な方向にとった円柱の中心間隔  $S$  と直径  $D$  との比  $S/D=3.8$  および  $5.8$ 、流れの方向と

平行な方向にとった円柱列の中心間隔  $l$  と  $D$  との比  $l/D=2\sim10$  になるように並べた。円柱に働く抵抗は片持梁形式の抵抗測定板によって 30 sec $\sim$ 1 min 間測定し、その平均値を円柱に働く力  $F$  とした。また、円柱列が1列の場合の中央円柱の背後の後流中心軸（ $x$  軸）に沿う流速  $u_0$  の分布を測定し、流速  $u_0$  の分布の  $S/D$  による変化を調べ、同時に流速  $u_0$  を用いた場合の下流側円柱列中の円柱の抵抗係数をも調べた。

円柱列に作用する流れ、すなわち円柱列の影響をうけない上流での流れの流速は、円柱列の上流側約 1.5 m の位置で小型プロベラ式流速計によって測定した流速の分布より求められる平均流速  $U$  を用いた。また、円柱列背後の後流中心に沿う、円柱の中心から  $x$  の位置での流速  $u_0$  は、同じ流速計を用いて測定した  $x$  の点での鉛直軸に沿う  $x$  軸方向の流速分布の平均値を用いた。

流速  $U$  は 13 $\sim$ 43 cm/sec の範囲に変化させ、水深  $h$  はほぼ 40 cm、円柱下端と水路床との間隔  $\delta$  は  $\delta\approx 1.5$  cm とした。円柱の材質が一定であり、円柱の水中部分の長さ  $h_d=h-\delta$  が一定であるので、円柱に働く力におよぼす円柱の表面粗度および円柱の長さの影響は調べられなかった。また、 $F_r=0.062\sim 0.22$ 、 $R_0=(1.3\sim 4.3)\times 10^4$  の範囲にあって、円柱に働く力におよぼす  $F_r$  数の影響は小さく、 $R_0$  数の影響については検討できなかった。

## 3. 実験結果およびその考察

### (1) 円柱列背後の流速分布

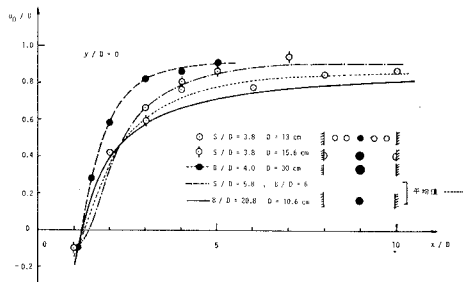
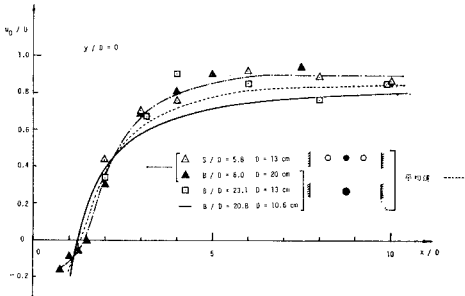
$S/D=3.8$  および  $5.8$  で、流れの方向と直角な方向に、水路幅いっぱい1列に並べられた円柱列の中央円柱背後の後流中心軸（ $x$  軸）に沿う流速  $u_0$  の分布を調べたものが図-2(a) および (b) である。図中の  $\odot$  および  $\triangle$  印は  $S/D=3.8$  および  $5.8$  の場合の実験値であって、 $\odot$  印あるいは実線等は図中に示すように  $S/D=3.8$ <sup>9)</sup> あるいは水路幅  $B$  なる水路中に直径  $D$  なる1本の円柱が  $B/D=4.0$ <sup>2)</sup>、 $B/D=6.0$ <sup>2)</sup> および  $B/D=20.8$ <sup>1)</sup> で置かれた場合の  $u_0/U$  の実験結果である。

図-2(a) および (b) によれば、 $S/D=3.8$  と  $5.8$  および  $B/D=6.0$  の場合の  $u_0/U$  の  $x/D$  による変化はほ

\* 正会員 大阪市立大学名誉教授

\*\* 正会員 大阪市立大学工学部 助手

\*\*\* 大阪市立大学大学院

(a)  $S/D=3.8$ (b)  $S/D=5.8$ 図-2 円柱列背後の流速分布 ( $y/D=0$ )

ば同じであって、平均的には図中の一点鎖線で表わされるようである。すなわち、 $S/D=6$  および  $B/D=6$  の場合、後流中心軸に沿う  $u_0$  の分布におよぼす隣円柱および水路側壁の影響はほぼ同じとみなせる。しかし、一点鎖線と側壁の影響がない  $B/D=20.8$  の場合の実線と比較すると、 $x/D < 2 \sim 3$  の範囲では、流速  $u_0$  は小さく逆流さえ生じており、 $S/D=3.8$  と  $5.8$  および  $B/D=6.0$  と  $B/D=20.8$  の場合の  $u_0/U$  の分布には違いがあまり見られない。 $x/D > 3 \sim 4$  になれば、水路側壁および隣接円柱の影響の違いによって、 $S/D=3.8$  と  $5.8$  および  $B/D=6.0$  の場合の  $u_0/U$  の値は  $B/D=20.8$  の場合に比して大きくなる。また、図-2 (a) より  $B/D=4.0$  の場合の  $u_0/U$  の値は、 $1 \sim 2 < x/D < 5$  の範囲においては、 $S/D=3.8$  と  $5.8$  および  $B/D=6.0$  と  $20.8$  の場合に比して大きくなるが、 $x/D > 5$  になれば、 $B/D=4.0$  の場合の  $u_0/U$  の値は  $S/D=3.8$  の場合の値に近づくようである。この結果より、 $S/D=4$  あるいは  $B/D=4$  の場合、 $x/D < 5$  の範囲では水路側壁の影響は隣接円柱の影響に比して大きくなるが、 $x/D > 5$  になれば両者の影響はほぼ同じになると言える。

以上のように、例えば  $B/D=4.0$  あるいは  $S/D=3.8$  の場合の  $u_0/U$  の値が、 $B/D=20.8$  の場合に比して大きくなるのは次のような理由によるものと考えられる。

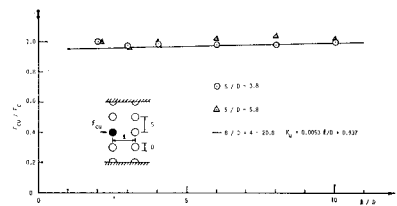
側壁の影響がない  $B/D=20.8$  の場合、円柱の後流は何らの制限をうけることなくその幅を広げる。一方、流れの方向と直角な方向に複数本の円柱を並べた場合、そ

れぞれの円柱の間の中央を通る流線が円柱列前面の流れの方向とほぼ平行になるため、円柱周囲あるいは背後の流れは、その流線を通る鉛直面を側壁のような固定境界壁と置き換えた場合の流れと同じようになる<sup>2)</sup>。したがって、 $S/D=5.8$  と  $B/D=6.0$  の場合の流れがほぼ同じになると考えられるので、両者の  $u_0/U$  の分布がほぼ一致する。このような境界壁があると、円柱背後の後流が下流側へ行くにしたがってその幅を拡大しようとするれば、後流外側の流れは後流と境界壁とにはさまれて、逆にその幅を狭くさせられ、流れの速度は大きくなる。この流速増加のため、後流幅の増大は抑制させるようになる。後流幅の拡大の抑制および後流外側の流れの速度の増大によって、後流中における流速は、 $B/D=20.8$  の場合のように後流幅の抑制効果がない場合に比して大きくなると考えられる。 $S/D=3.8$  および  $5.8$  の場合は  $S/D$  の値に大きな違いがないため、流速分布におよぼす隣接円柱の影響があまり変わらないのであろう。

## (2) 円柱に働く力

### (i) 上流側円柱列中の円柱に働く力

流れの方向と直角な方向に  $S/D=3.8$  および  $5.8$  で水路いっぱい並べられた円柱列が2列ある場合、上流側円柱列中の中央円柱(図中の●印)に働く力  $F_{cu}$  の円柱列間隔  $l$  による変化を示したのが図-3である。図の横軸は円柱列の間隔  $l$  と円柱直径  $D$  との比  $l/D$ 、縦

図-3  $F_{cu}/F_c$  の  $l/D$  による変化

軸は  $F_{cu}$  と同じ  $S/D=3.8$  および  $5.8$  で並べられた1列の円柱列中の中央円柱に働く力  $F_c$  との比  $F_{cu}/F_c$  である。図中の○および△印は  $S/D=3.8$  および  $5.8$  の場合の  $F_{cu}/F_c$  の実験値であって、実線は水路側壁の影響がほぼないと見なされる  $B/D=4 \sim 20.8$  の場合の流れに2本の円柱を平行な方向に並べた場合の上流側円柱に働く力  $F_u$  と同じ流れの中に置かれた1本の円柱に働く力  $F_\infty$  との比  $F_u/F_\infty$  の  $l/D$  による変化を示したものである<sup>1), 2)</sup>。図-3によれば、 $S/D=3.8$  および  $5.8$  の場合の  $F_{cu}/F_c$  の  $l/D$  による変化と、 $B/D=4 \sim 20.8$  の場合の  $F_u/F_\infty$  の  $l/D$  による変化とは比較的良好一致しており、上流側円柱の  $F_{cu}/F_c$  におよぼす横方向(流れの方向と直角な方向)の円柱の影響はあまり大きくない。すなわち、 $S/D \geq 3.8$  になれば、上流側円柱列中の円柱におよぼす下流側円柱列の影響は、円柱が2本の場合の上流側円柱におよぼす下流側円柱の影響とほぼ同じ

である。

(ii) 下流側円柱列中の円柱に働く力

$S/D=3.8$  および  $5.8$  の場合、下流側円柱列の中央円柱に働く力  $F_{ca}$  と  $F_c$  との比  $F_{ca}/F_c$  の  $l/D$  による変化を示したものが図-4である。図中の○と△印はそれぞれ  $S/D=3.8$  と  $5.8$  の場合の実験値、破線および

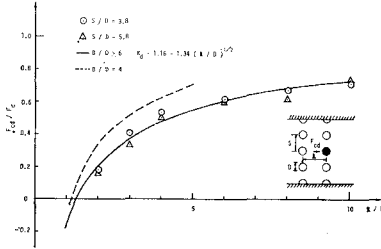


図-4  $F_{ca}/F_c$  の  $l/D$  による変化

実線はそれぞれ  $B/D=4.0^{(2)}$  および  $B/D \geq 6.0^{(1),(2)}$  で2本の円柱が流れの方向と平行に置かれた場合の下流側円柱に働く力  $F_a$  と  $F_\infty$  との比  $F_a/F_\infty$  の  $l/D$  による変化を表わす曲線である。図-4に示すように、 $S/D=3.8$  および  $5.8$  の場合の  $F_{ca}/F_c$  の  $l/D$  による変化は、水路側壁の影響がない  $B/D \geq 6.0$  の場合の  $F_a/F_\infty$  の  $l/D$  による変化とほぼ一致している。この結果より、 $S/D \geq 3.8$  になれば下流側円柱列中の円柱におよぼす上流側円柱列の影響は、2本の円柱が流れの方向と平行な方向に並べられた場合の下流側円柱におよぼす上流側円柱の影響とはほぼ同じである。

(3) 下流側円柱の抵抗係数

流れの方向と直角な方向に並べられた円柱列が2列ある場合、下流側円柱は、図-2 (a) および (b) に示すような(上流側)円柱列背後の後流中心軸上の流速  $u_0$  を有する流れの中に置かれていて考えられるので、下流側円柱列中の各円柱の抵抗係数および受圧面積を  $C_{Da}$  および  $A_a$ 、水の密度を  $\rho$  とすれば、各円柱に働く力  $F_{ca}$  は

$$F_{ca} = \rho C_{Da} A_a u_0^2 / 2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

のように表わされる。円柱列の影響がない上流での流速  $U$  なる流れの中に、流れの方向と直角な方向に並べられた1列の円柱列中の円柱の抵抗係数および受圧面積を  $C_D$  および  $A$  とすれば、その円柱に働く力  $F_c$  は

$$F_c = \rho C_D A U^2 / 2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

である。

フルード数  $F_r = U / \sqrt{gh}$  あるいは  $U / \sqrt{gD}$  が比較的小さい場合には、円柱壁面での水位変化が小さく、円柱の上・下流側間の水面差がほとんどないので、受圧面積  $A \approx A_a$  とおける。したがって式 (1) および式 (2) より

$$\frac{F_{ca}}{F_c} = \frac{\rho C_{Da} A_a u_0^2 / 2}{\rho C_D A U^2 / 2} \approx \frac{C_{Da} u_0^2}{C_D U^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\therefore \frac{C_{Da}}{C_D} = \frac{F_{ca}/F_c}{u_0^2/U^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

すなわち、下流側円柱列中の各々の円柱の抵抗係数  $C_{Da}$  と円柱列が1列の場合の円柱の抵抗係数  $C_D$  との比  $C_{Da}/C_D$  は、それぞれの円柱に働く力の比  $F_{ca}/F_c$  と流速の自乗の比  $u_0^2/U^2$  との相対的な関係(大きさ)によって定まる。式 (4) と同様の関係が2本の円柱が流れの方向と平行な方向に並べられた場合にも成り立つ。

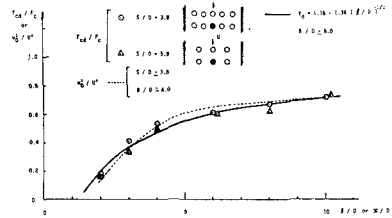


図-5  $F_{ca}/F_c$  と  $l/D$  および  $u_0^2/U^2$  と  $x/D$  の関係

図-5に  $S/D=3.8$  および  $5.8$  の場合の  $F_{ca}/F_c$  の値を○印および△印で、 $B/D \geq 6.0$  の場合の  $F_a/F_\infty$  と  $l/D$  との関係を実線で、 $B/D \geq 6.0$  および  $S/D \geq 3.8$  の場合の  $u_0^2/U^2$  の  $x/D$  との関係を点線で示す。図-5によれば、 $S/D \geq 3.8$  および  $B/D \geq 6.0$  の場合には、 $F_{ca}/F_c$  および  $F_a/F_\infty$  の  $l/D$  による変化と、 $u_0^2/U^2$  の  $x/D$  による変化とはほぼ一致している。すなわち

$$\frac{F_{ca}/F_c \text{ or } F_a/F_\infty}{u_0^2/U^2} = \frac{C_{Da}}{C_D} \approx 1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

であって、下流側円柱が置かれる位置での流速  $u_0$  ( $x=l$  での流速) を用いれば、抵抗係数  $C_{Da}$  は円柱(列)が1本(1列)の場合の抵抗係数と同じになると言ってよい。言いかえれば、下流側円柱に働く力が小さくなるのは、たんに円柱に作用する流れの流速(運動量)の減少によるためである。

(4) 円柱が千鳥状に配列された場合

図-1 (b) に示すように、円柱の中心間隔が  $S/D=3.8$  および  $5.8$  で、千鳥状に並べられた円柱列の上流側あるいは下流側円柱列の中央円柱(図中に●で示す)に働く力  $F_{zu}$  あるいは  $F_{za}$  と  $F_c$  との比  $F_{zu}/F_c$  あるいは  $F_{za}/F_c$

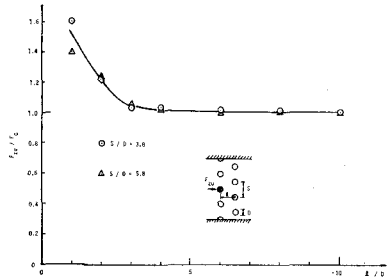
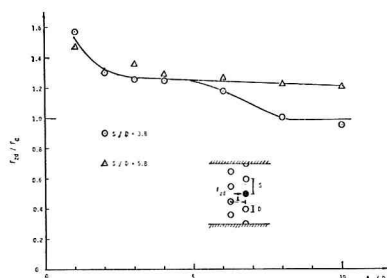


図-6  $F_{zu}/F_c$  の  $l/D$  による変化

図-7  $F_{2d}/F_0$  の  $l/D$  による変化

$F_0$  の  $l/D$  による変化を示したものが図-6および図-7である。図中の○および△印はそれぞれ  $S/D=3.8$  および  $5.8$  の場合の実験値である。

流れの方向と直角な方向に水路幅いっぱいに円柱列を1列並べた場合の中央円柱の抵抗係数  $C_D$  は、 $S/D=3.8$  および  $5.8$  の場合にはそれぞれ  $C_D \approx 1.45$  および  $1.25$ 、円柱の中心間隔がそれらの半分の  $S/D=1.9$  および  $2.9$  の場合にはそれぞれ  $C_D \approx 2.5$  および  $1.6$  となる<sup>1),3)</sup>。すなわち  $S/D=3.8$  および  $5.8$  の場合のそれぞれ  $1.7$  倍および  $1.3$  倍 ( $[C_D]_{S/D=1.9}/[C_D]_{S/D=3.8}=1.7$ ,  $[C_D]_{S/D=2.9}/[C_D]_{S/D=5.8}=1.3$ ) となり、図-6に示すような  $S/D=3.8$  および  $5.8$  の場合の  $l/D=1$  における  $F_{2u}/F_0 \approx$

$1.6$  および  $1.4$  とほぼ同じである。 $l/D < 3$  の範囲では、写真-1に示すように、上流側円柱の間に下流側円柱が位置するようになって、円柱の中心間隔を半分にした1列の円柱列の場合とほぼ同じに

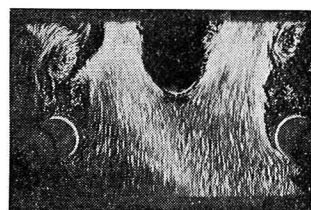
 $S/D=5.8, l/D=1.5$ 

写真-1 千鳥状配列の流況

なるので、 $F_{2u}$  は  $F_0$  に比して大きくなるのであろう。

$l/D \geq 3$  になれば、 $F_{2u}$  は下流側円柱列の影響をほとんどうけず、 $F_{2u}/F_0 \approx 1.0$ 、すなわち円柱列が1列だけの場合の中央円柱に働く力  $F_0$  とほぼ同じになる。

下流側円柱列の中央円柱に働く力  $F_{2d}$  に関しても、円柱列が接近している  $l/D < 3$  の場合には、上流側円柱列の場合と同様に、円柱の中心間隔が半分になった時の円柱の横方向の相互干渉とほぼ同じになり、図-7に示すように  $F_{2d}/F_0 \approx 1.5 \sim 1.3$  になる。 $F_{2d}/F_0$  の値は円柱列の間隔が広がるにしたがってわずかに減少するが、円

柱が千鳥状に配置されているので、上流側円柱の間を通過した速度の大きな流れが下流側円柱に作用するため、 $l/D=4 \sim 6$  においても  $F_{2d}/F_0 \approx 1.3 \sim 1.2$  となる。

$l/D \geq 8$  になれば、上流側円柱列の影響が小さくなり  $S/D=3.8$  の場合には  $F_{2d}/F_0 \approx 1.0$  となるが、 $S/D=5.8$  では  $F_{2d}/F_0 \approx 1.2$  となる。

#### 4. ま と め

流れの方向と直角な方向に円柱が2列並べられている場合、流れの方向と直角な方向にとった円柱の中心間隔  $S$  が円柱直径  $D$  の4倍以上で、円柱列の間隔  $l$  が円柱直径  $D$  の2倍以上になると、上流側および下流側円柱列中の円柱に対する隣接円柱の影響(円柱の横方向の相互干渉)と水路側壁の影響(円柱の鏡像効果)とは同じであって、 $S/D$  あるいは  $B/D \geq 6 \sim 8$  になれば、それらの影響は無視できる。また、 $S/D \geq 4$  の場合、 $l/D \geq 2$  であれば円柱の縦方向(流れ方向)の相互干渉は、広い流れの中に置かれた2本の円柱の縦方向の相互干渉と同じである。この場合、下流側円柱に働く力が円柱(列)が1本(1列)の場合より小さくなるのは、下流側円柱(列)に作用する流れの流速が、減少することによるものであって、円柱が設置される位置での流速を用いれば、下流側円柱の抵抗係数は円柱が1本(1列)の場合の抵抗係数と同じになる。以上のことを要約すれば、 $S/D \geq 4$  で  $l/D \geq 2$  の場合には、円柱の横方向の相互干渉と縦方向の相互干渉とは互いに影響をおよぼし合わないと言える。したがって、流れの方向と直角な方向の円柱列が3列、4列、……と多くなった場合にも上で述べたと同様のことが言えるであろう。一方、 $S/D \geq 4$  で円柱を千鳥状に並べた場合には、 $l/D < 3$  の場合、円柱の縦方向の相互干渉は円柱の中心間隔  $S$  が半分になった場合の円柱の相互干渉と同じである。

#### 参 考 文 献

- 1) 永井・倉田：開水路流れの中の円柱の相互干渉，土木学会論文報告集，No. 196，1971.12.
- 2) 永井・倉田・伊藤：円柱構造物に働く潮流力に関する基礎的研究，第20回海岸工学講演会論文集，1973.11.
- 3) 永井・倉田：円柱構造物に働く潮流力に関する基礎的研究(第2報)，第22回海岸工学講演会論文集，1975.11.