

円柱構造物に働く潮流力に関する基礎的研究 (第2報)

永井 荘七郎*・倉田 克彦**

1. 緒 言

円柱構造物に働く潮流力に関する基礎的な研究として、著者らは、流れの方向に平行に置かれた2本の円柱のそれぞれに働く力におよぼす他の円柱の影響(円柱の縦方向の相互干渉)を明らかにしてきた^{1),2)}。一方、流れと直角な方向に並べられた円柱列中の各円柱間の相互干渉については、あまり多くの研究結果は発表されていない。著者の1人は、円柱に働く力におよぼす水路側壁(有限水路幅)の影響を明らかにしたが³⁾、水路側壁の影響は、側壁を対称面として鏡像の位置に置かれた同一直径の円柱の影響(円柱の鏡像効果)と同じとして取扱われた^{1),2)}。円柱周囲の流速分布に関しては、このような取扱いが可能であることはすでに明らかにされているが^{1),2)}、流れと直角方向に並べられた円柱列中の1本の円柱に働く力に関して検討されていなかった。したがっ

て、本論文では、開水路流れの中に、流れの方向と直角に並べられた円柱列中の1本の円柱に働く力と、円柱間の中心間隔との関係を求め、円柱に働く力におよぼす水路側壁の影響と隣接円柱の影響との相違について検討した。また、円柱列背後の流速分布についても同様の検討を加えた。

2. 円柱に働く力におよぼす隣接円柱の影響 (円柱の横方向の相互干渉)

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)との相違を検討するため、流れの方向と直角な方向に同一直径の円柱を3本~5本並べ、その中央円柱の抵抗係数 C_D と、円柱の中心間隔 S と円柱直径 D との比 S/D との関係を求め、すでに明らかにされている水路幅 B と円柱直径 D との比 B/D と円柱の抵抗係数 C_D との関係³⁾と比較した。

(1) 実験施設および実験方法

実験は、大阪市立大学工学部河海工学実験場の幅 2.2m、深さ 0.8m、長さ 40m のモルタル仕上げの開水路を、全長にわたって隔壁によって幅 1.2m に仕切って行った。円柱は外径 $D=7.5$ cm および 15.6 cm のエスロンパイプを用い、図-1(a)~図-1(c)および図-2(a)~図-2(c)に示すように、隣り合う円柱間の中心間隔 S と円柱直径 D との比 $S/D=2, 4$ および 8 になるように配列した場合に円柱列中の中央円柱に働く力 F 、および水路中央に1本の円柱を置いた場合にその円柱に働く力 F を、4枚の歪ゲージを貼り付けた厚さ 2.0 cm、幅 1.8 cm および 2.0 cm、長さ 50 cm の抵抗測定板(平鋼板)によって測定した(図-3 参照)。

円柱列の上流側 1.5 m の位置において、フォト・トランジスター型プロ

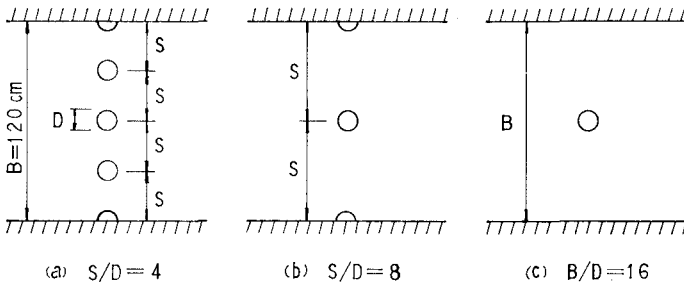


図-1 直径 $D=7.5$ cm の場合の円柱列

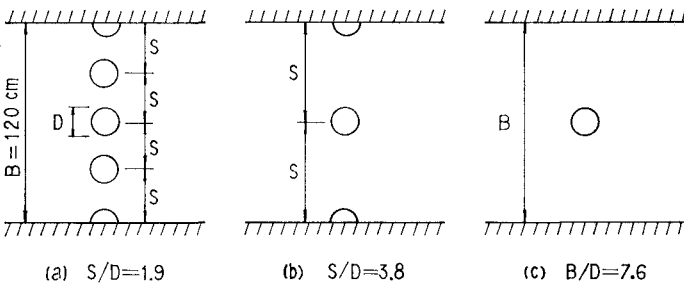


図-2 直径 $D=15.6$ cm の場合の円柱列

* 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 大阪市立大学助手 工学部土木工学科

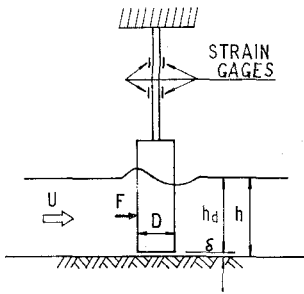


図-3 抵抗測定法

ペラ式流速計によって流速を測定し、断面の平均流速 U を求めた。水深 $h \approx 50$ cm, 円柱下端と水路床面との間隔 $\delta \approx 1$ cm とほぼ一定にしたので, 円柱の水浸長 $h_a = h - \delta$ と水深 h との比 h_a/h による円柱の抵抗係数 C_D の変化は考えなくてよい。

実験を行った条件を表-1 に示す。

表-1 円柱の抵抗に関する実験条件

円柱直径 D (cm)	水深 h (cm)	平均流速 U (cm/sec)	レイノルズ数 $Re = \frac{DU}{\nu}$	フルード数 $Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}}$	円柱の中心間隔 S と円柱直径 D との比 S/D あるいは B/D
15.6	50	14.8	1.8×10^4	0.067	
	46	25.1	3.0	0.12	1.9
	49	35.2	4.2	0.16	3.8
	51	45.9	5.5	0.20	7.6
	50	53.5	6.4	0.24	
7.5	50	36.1	2.1×10^4	0.16	4.0
	50	47.3	2.7	0.21	8.0
	50	54.5	3.2	0.25	16.0

(2) 実験結果およびその考察

円柱の抵抗係数 $C_D = F \frac{w_0}{2g} \cdot h_a \cdot D \cdot U^2$ の円柱間の中心間隔 S と円柱直径 D との比 S/D による変化を図-4 に示す。図中の○印は $D=7.5$ cm, △印は $D=15.6$ cm の円柱の抵抗係数の平均値 (平均流速 $U \approx 15$ cm/sec ~

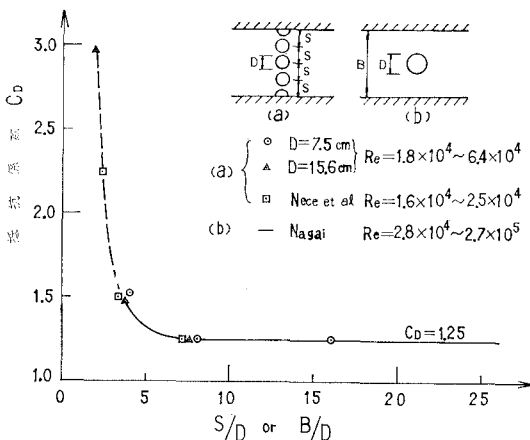


図-4 抵抗係数 C_D の S/D あるいは B/D による変化

55 cm/sec に変化させた時) を示し, □印は Nece らが行った円柱の直径 $D=1$ in. (≈ 2.5 cm), 水路幅 $B=14 \cdot 3/8$ in. (≈ 36 cm), Reynolds 数 $Re=1.6 \times 10^4 \sim 2.5 \times 10^4$ の場合の実験結果である⁵⁾。また, 同図中の実線は, 幅 B なる開水路中に直径 D なる円柱を1本置いた場合の, 円柱の抵抗係数 C_D の B/D による変化を表わした実験曲線である⁶⁾。図-4 によると, C_D と S/D の関係は C_D と B/D の関係と全く同じで, $S/D \geq 6 \sim 8$ になれば, 隣接円柱および水路側壁の影響は無視でき, 広い流れの中に置かれた1本の円柱の抵抗係数 $C_D=1.25$ に等しくなる。すなわち, 円柱の抵抗係数におよぼす水路側壁の影響(円柱の鏡像効果)と, 隣接円柱の影響(円柱の横方向の相互干渉)とは全く同じであるといえる。その理由は, 各円柱間の中央を流れる流れは円柱列前面の流れ, すなわち, 水路側壁とほぼ平行な流れとなるため, 円柱間中央を通る鉛直面に関して流れはほぼ対称になる。この対称面を水路側壁に置き換えて考えればよい。たとえば, 図-1 (a) と 図-2 (b) は $S/D=4$ と 3.8 でほぼ等しい。この場合, 中央の円柱の C_D はほぼ等しい。それゆえ, 直径が同一である円柱が同一の間隔 S で配列されている場合には, 何本配列されていても, 任意の円柱の C_D を 図-4 より求めることができる。

3. 円柱列背後の流速分布

円柱列背後の流速分布を $S/D=4$ の場合について求め, $B/D=4$ の場合の結果⁷⁾と比較し, 円柱列背後の流速分布におよぼす水路側壁の影響と隣接円柱の影響(円柱の横方向の相互干渉)との違いについて検討した。

(1) 実験施設および実験方法

実験に用いた水路, 流速計および円柱, ならびに平均流速 U の測定方法は, 抵抗係数の実験の場合と同じである。 $D=7.5$ cm および $D=15.6$ cm の円柱を, それぞれ 図-1 (a) および 図-2 (b) に示すように, $S/D=4$ となるように並べ, それぞれの場合について, 円柱背後の後流中心 (x 軸), および $x/D=4$ における流れの方向と直角な断面 (y 軸) において, フォト・トランジスタ型プロペラ式流速計によって流速を測定し, 各測定点における鉛直線上の平均流速 u を求めた。

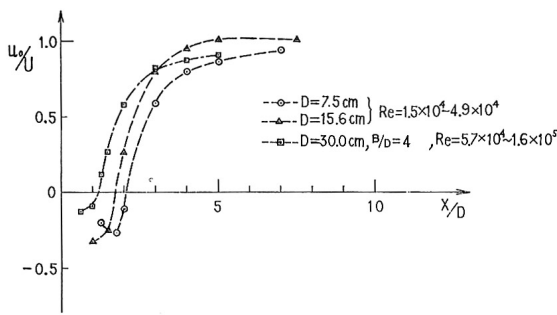
実験の条件を表-2 に示す。

(2) 実験結果およびその考察

$S/D=4$, $U \approx 20$ cm/sec ~ 40 cm/sec に変化させた場合の, 中央円柱背後の後流中心の流速 u_0 の, 円柱中心からの距離 x による変化を示したものが 図-5 である。図中の○印は $D=7.5$ cm., △印は $D=15.6$ cm の場合の u_0/U の平均値であり, □印は $D=30$ cm, $B/D=4$ の場合の値である。図より明らかなように, $x/D > 3 \sim 4$ の範囲では, $D=7.5$ cm の場合と $D=15.6$ cm の場合の u_0/U の平均値をとれば, $S/D=4$ の場合と $B/D=4$ の場合の

表一 円柱列背後の流速分布に関する実験条件 (S/D=4)

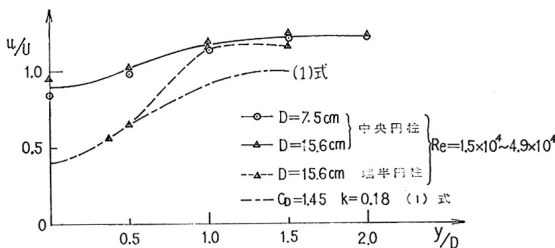
円柱直径 D (cm)	水深 h (cm)	平均流速 U (cm/sec)	レイノルズ数 $Re = \frac{DU}{\nu}$	フルード数 $F_r = \frac{U}{\sqrt{gh}}$	流速測定位置 x/D および y/D
15.6	50	23.9	2.9×10^4	0.11	x/D=1.0~7.5
	52	25.5	3.1	0.11	
	50	27.7	3.3	0.12	
	50	30.3	3.6	0.14	y/D=0~2.0
	51	37.5	4.5	0.17	
	48	40.9	4.9	0.19	
7.5	50	25.5	1.5×10^4	0.12	x/D=1.25~7.0
	48	28.8	1.7	0.13	
	44	39.9	2.3	0.19	y/D=0~2.0
	48	41.1	2.4	0.19	



図一五 後流中心の流速分布 (S/D=4)

u_0/U はほぼ同じとみなしてよく、 x/D の増大にしたがって $u_0/U \approx 0.9 \sim 0.95$ になり、 $x/D > 7 \sim 8$ においては、後流中心の流速 u_0 は、ほぼ円柱列前面の平均流速 U にまで回復するようである。 $x/D < 3 \sim 4$ の範囲では、 $B/D = 4$ の場合の u_0/U の値は、 $S/D = 4$ の場合に比して大きくなり、この範囲では後流中心の流速分布におよぼす水路側壁の影響と隣接円柱の影響とが多少異なるが、流速が小さいので、円柱の抵抗係数にはほとんど影響をおよぼさないようで、すでに記したように、両者の抵抗係数は同じである。

図一六 は $x/D = 4$ での流れに直角な断面における $y/D = 0$ (円柱背後の後流中心) から $y/D = 2$ (円柱間の中央) までの鉛直線上の平均流速の分布を示す。図中の \odot 印は $D = 7.5$ cm, \triangle 印は $D = 15.6$ cm の場合の中央円柱背後、および \triangle 印は $D = 15.6$ cm の端半円柱背後の



図一六 $x/D = 4$ における横方向の流速分布 (S/D=4)

流速分布を示す。図より明らかなように、 $D = 7.5$ cm および $D = 15.6$ cm の中央円柱背後の流れに直角な断面における流速分布はほぼ同じとみなしてよく、 y/D の増加にしたがって $u/U \approx 0.9 \sim 1.2$ になるようである。

$D = 15.6$ cm の端半円柱背後の流速分布は、 $y/D \leq 0.5$ の範囲では、一点鎖線で示した式 (1)⁹⁾ による計算値と一致し、 $y/D \geq 1.0$ になれば、中央円柱背後の値とほぼ一致し、式 (1) による計算値の約 1.2 倍になるようである。

$$u/U = 1 - \frac{\sqrt{10} (C_D \cdot D)^{1/2}}{18k} \left(\frac{C_D \cdot D}{x} \right)^{1/2} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{y}{b} \right)^{3/2} \right\}^2 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

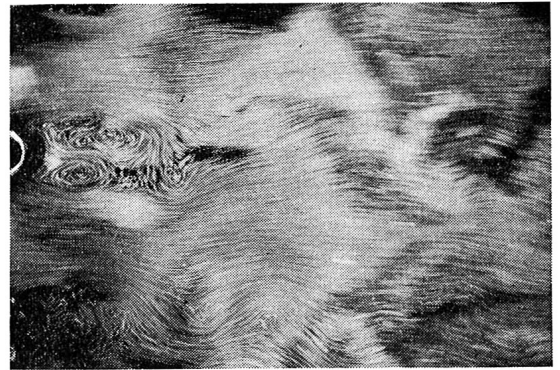
C_D : 円柱の抵抗係数、 $S/D = 4$ の場合の $C_D = 1.45$

b : 後流幅の 1/2, $b = \sqrt{10} k (C_D \cdot D \cdot x)^{1/2}$

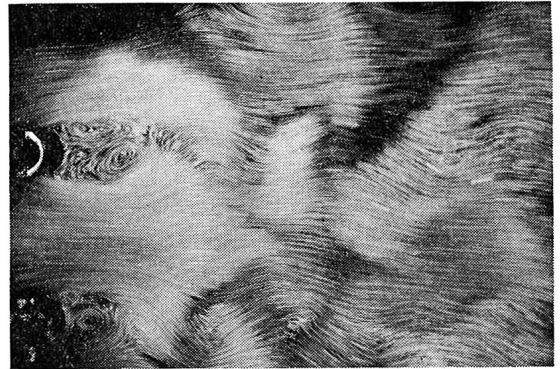
k : 係数、 $Re = 10^4$ 前後では $k = 0.18 \sim 0.21$

$y/D \leq 0.5$ の範囲で、端半円柱背後の流速分布の実験値と計算値とが一致するのは、次のような理由によると考えられる。

端半円柱背後の後流はよく安定しておいて、後流の振動はほとんど見られない。また、半円柱の上・下流側間



(a)



(b)

写真一 円柱列背後の流況

$S/D = 4.0$, $D = 7.5$ cm
 $U = 22.5$ cm/sec, $Re = 1.3 \times 10^4$

の水面差もほとんどないため、式(1)を導く際に設けた次の仮定がほぼ満足されているためと考えられる。すなわち、(1) y 軸方向の流速はきわめて小さく、(2) 後流中における圧力は一樣流中における圧力、すなわち円柱前面の流れにおける圧力に等しい。

式(1)は広い流れの中に置かれた1本の円柱背後の後流に関するものであるが、実験においては、隣接円柱の後流の影響によって、後流外側の流れの幅が狭くなり、そのため、後流の発達抑制され、後流中の流速が増大するので、 $y/D \geq 1.0$ の範囲では実験値は計算値より大きな値を示すのであろう。

図-1(a)と図-2(b)は $S/D=4$ と 3.8 でほぼ等しく、中央円柱背後の流速分布 u_0/U はほぼ等しい。円柱間の中央を通る鉛直面を対称面と考えれば、抵抗係数の場合と同様に、同一直径の円柱が同じ中心間隔で並べられている場合には、円柱背後の流速分布はどの円柱の場合もほぼ同じになると考えてよいであろう(写真-1)。

4. 結 論

以上述べてきたことを要約すると、

(1) 開水路流れの中に、流れの方向と直角方向に並べられた円柱列中のそれぞれの円柱の抵抗係数におよぼす隣接円柱の影響(円柱の横方向の相互干渉)は、流れの中に置かれた1本の円柱におよぼす水路側壁(円柱の鏡像効果)と全く同じである。円柱の抵抗係数 C_D の S/D あるいは B/D による変化は図-4に示すとおりで、 S/D あるいは $B/D \geq 6 \sim 8$ になれば、 C_D は広い流れの中に置かれた1本の円柱の $C_D=1.25$ に等しくなる。

(2) 同一直径の円柱が同一の中心間隔で並べられている場合には、円柱が何本配列されていても、任意の円柱の C_D は図-4より求まる。

(3) $S/D=4$ と $B/D=4$ の場合の円柱背後の流速分布を比較した結果、後流中心の流速分布におよぼす隣接円柱の影響と水路側壁との影響は、 $x/D > 3 \sim 4$ の範囲ではほぼ同じと考えられ、 $x/D > 7 \sim 8$ においては、後

流中心の流速 u_0 はほぼ円柱列前面の平均流速 U にまで回復する。 $x/D < 3 \sim 4$ の範囲では、両者の影響は多少異なっているが、流速が小さいので、円柱の抵抗係数にはほとんど影響をおよぼさない。

(4) $x/D=4$ における流れに直角な横断面における流速分布を求めた結果では、中央円柱背後の $y/D=0 \sim 2.0$ においては $u/U \div 0.9 \sim 1.2$ となる。端半円柱背後の $y/D \leq 0.5$ の範囲では実験値は式(1)による計算値と一致するが、 $y/D \geq 1.0$ になれば、中央円柱背後の値とほぼ同じになり、計算値の約1.2倍になる。

(5) 同一直径の円柱が同一の中心間隔で並べられている場合には、それぞれの円柱背後の流速分布は同じになると考えられる。

定常流中の円柱の相互干渉については、流れの方向と平行に置かれた2本の円柱の場合、および本論文において述べた流れの方向と直角方向の円柱列の場合の研究をおこなってきた。今後は、円柱が碁盤目状にあるいは千鳥状に置かれた場合についても研究を進めて行く積りである。また、波浪中の円柱の相互干渉についても研究を拡げて行きたいと思っている。

終りに、この実験をおこなうにあたり協力をえた当時大阪市立大学工学部学生 寺田邦男君(現在大阪市下水道局勤務)に謝意を表したい。

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, 1972. 11
- 3) 永井: 改訂水理学, pp. 295, コロナ社
- 4) 大阪市立大学工学部永井研究室: 本州四国連絡橋橋脚に関する研究報告書(その3), 1969. 3
- 5) Nece, R.E. et al.: Discussion about Resistance of Cylindrical Piers in Open-Channel Flow by T. Hsieh, Journal of Hydraulics Division, Vol. 90, HY 5, Sept., 1964
- 6) 藤本武助: 改著流体力学, pp. 256, 養賢堂