

円柱構造物に働く潮流力に関する基礎的研究

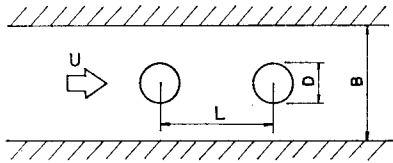
永井 莊七郎*・倉田 克彦**・伊藤 忠***

1. 緒 言

海洋構造物として各種の形状、形式のものが現在考案、計画され、また建造されている。それらの構造は、多数の円柱を組み合わせたものが多く、それらに働く外力としては、自重、上載荷重以外に風、波および潮流などが考えられる。構造物全体あるいは各部材(円柱)に働く波力および潮流力については、波浪および潮流中に単独に置かれた円柱の場合とは異なり、円柱間の互いの干渉による影響を考慮しなければならない。本論文は、海洋構造物に働く潮流力に関する基礎的な研究として、開水路流れの中に流れに平行に置かれた2本の円柱のそれぞれに働く力と、2本の円柱間の中心距離との関係を実験的に明らかにしたものである。

2. 円柱に働く力

図一1 に示すように、幅 B なる開水路中に流れに平行に直径 D なる2本の円柱を中心間隔 L で置いた場合、2本の円柱のそれぞれに働く力を実験的に求めた。円柱直径 D に比して水路幅 B が非常に広い $B/D=20.8$ の場合についてはすでに報告しており¹⁾、今回は水路幅が円柱直径に比してあまり大きくない $B/D=6.0$ および 4.0 の場合について実験を行ない、2本の円柱のそれぞれに働く力におよぼす円柱相互の干渉および側壁の影響を明らかにした。



図一1 開水路中に置かれた2本の円柱

(1) 実験設備およびその方法

大阪市立大学工学部河海工学実験場の幅 2.2m、長さ 40m、深さ 0.8m のモルタル仕上げの開水路を、隔壁によって幅 1.2m に仕切り、水深 $h=50$ cm、流速 $U=20$ cm/sec $\sim$ 60 cm/sec の範囲で実験を行なった。円柱は

表一1 円柱に働く力に関する実験条件

円柱直径 D (cm)	円柱中心間隔 L (cm)	流速 U (cm/sec)	水深 h (cm)	レイノルズ数 $Re=UD/\nu$
30	33 $\sim$ 150	20.9	50	5.7×10^4
		23.3	"	6.4×10^4
		26.6	51	7.3×10^4
		30.8	50	8.4×10^4
		34.5	"	9.4×10^4
		39.0	"	1.1×10^5
		41.8	"	1.1×10^5
		42.5	"	1.2×10^5
		48.7	"	1.4×10^5
		52.1	"	1.4×10^5
		56.0	"	1.5×10^5
		57.3	"	1.6×10^5
		57.9	"	1.6×10^5
		60.1	"	1.6×10^5
		64.0	"	1.7×10^5
20	22 $\sim$ 150	21.2	50	3.9×10^4
		26.6	51	4.8×10^4
		31.3	50	5.7×10^4
		32.0	"	5.8×10^4
		39.6	"	7.2×10^4
		41.4	"	7.5×10^4
		42.5	"	7.7×10^4
		51.0	"	9.3×10^4
		53.7	"	9.8×10^4
		57.3	"	1.0×10^5
		57.9	"	1.1×10^5
		59.4	"	1.1×10^5
		60.3	"	1.1×10^5

直径 $D=20$ cm および 30 cm の2種類のしんちゅう製のものを用い、円柱の中心間隔 $L=22$ cm あるいは 33 cm ($L/D=1.1$) $\sim$ 150 cm ($L/D=7.5$ あるいは 5.0) の範囲に変化させた。円柱に働く力は、円柱底部と水路床との間隔を 1 cm あけ、4枚のひずみゲージを利用した片持ばり形式の抵抗測定板を用い、流速はフォト・トランジスタ型プロベラ式流速計により測定した。実験を行なった条件を表一1に示す。

(2) 実験結果およびその考察

a) 上流側円柱に働く力: F_u

流速 U なる流れに平行に置かれた2本の円柱のうちの上流側円柱に働く力 F_u と、同じ流れの中に単独に置かれた同じ直径の円柱に働く力 F_∞ との比 $K_u=F_u/F_\infty$ と、2本の円柱の間の中心間隔 L と円柱直径 D との比 L/D との関係を示したものが図一2である。図中の $\odot$ 印は $D=20$ cm ($B/D=6.0$) の場合の値、 $\triangle$ 印は $D=30$ cm

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

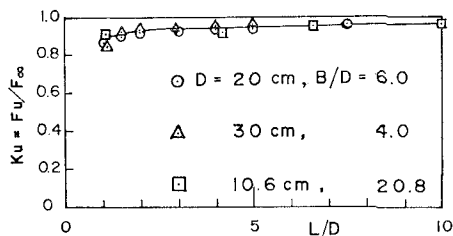


図-2 $K_u = F_u/F_\infty$ と L/D との関係

($B/D=4.0$) の場合の値, $\square$ 印は $D=10.6$ cm ($B/D=20.8$) の場合の値を示す。これらの値は流速 $U \div 20$ cm/sec ~ 60 cm/sec ($D=10.6$ cm の場合は 40 cm/sec) に変化させた場合の平均値である。図-2 より明らかなように, K_u の L/D による変化は, $B/D=21$, 6.0 および 4.0 のいずれの場合にもほとんど違いはなく, L/D の変化にしたがってほぼ直線的に変化し, K_u の値に対する開水路側壁の影響はほとんど見られないようである。すなわち, 上流側円柱に働く力 F_u におよぼす開水路側壁の影響は, 単独円柱の場合と同じであって, $B/D \geq 6.0$ になればほぼ無視できるようであり, $B/D=4.0$ の場合には, $B/D=6.0$ の場合の 1.1~1.2 倍 ($= [C_D]_{B/D=4.0} / [C_D]_{B/D=6.0} = 1.4 \sim 1.45/1.25^{1), 2)}$, C_D : 円柱の抵抗係数) の力が働くようである。

b) 下流側円柱に働く力: F_a

下流側円柱に働く力 F_a と F_∞ との比 $K_a = F_a/F_\infty$ と L/D の関係を示したものが図-3 である。図中の $\odot$ 印, $\triangle$ 印および $\square$ 印は図-2 の場合と同じである。図-3 より明らかなように, $B/D=6.0$ および 21 の場合の K_a は, L/D の値にかかわらずほぼ同じ値を示すようである。開水路中に単独に置かれた円柱に働く力に関する実験結果では, $B/D \geq 6.0$ になれば側壁の影響はほぼ無視できるため^{1), 2)}, 2本の円柱を流れに平行に置いた場合の下流側円柱に働く力に関しても, $B/D \geq 6.0$ になれば側壁の影響はほとんど無視してよいと言えるであろう。しかし, $B/D=4.0$ の場合には, $L/D > 2$ になれば, K_a におよぼす開水路側壁の影響が現われ, $B/D=6.0$ および 21 の場合に比して約 20% 程度 K_a は大きくなるようである。

L/D が小さい場合には, 図-5 に示すように, 上流側

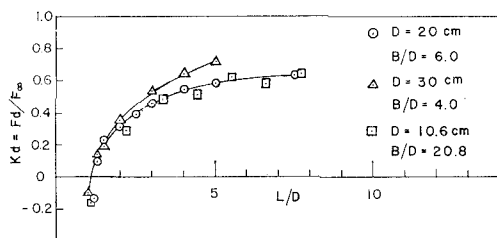


図-3 $K_a = F_a/F_\infty$ と L/D との関係

円柱背後の流れは非常に遅くなり, あるいは逆流さえ生じる。そのため下流側円柱に働く力は非常に小さくなり, また負の力 (上流側向きの力) さえ生じ, $K_a = -0.1 \sim -0.2$ 程度になるようである。 $L/D=2 \sim 7.5$ の範囲では, L/D の増加にしたがって K_a は大きくなり, $B/D \geq 6.0$ の場合には, $K_a = 0.2 \sim 0.6$ 程度になるようである。また, $B/D=4.0$ の場合には, K_a の値は $B/D \geq 6.0$ の場合に比して約 20% 程度大きくなるようである。このように $B/D=4.0$ の場合の K_a の値が $B/D \geq 6.0$ の場合より大きくなるのは開水路側壁の影響によるものであると考えられるが, これは次のようにして説明されるであろう。

上流側円柱背後の後流域は下流へ行くにしたがいその幅を広げようとする。一方, 開水路幅が有限なため, 後流の幅が広がるにつれて, 後流の外側の流れの幅は減少し, 流速は増加する。この流速の増加によって, 後流の拡がりが抑制され, 側壁の影響がない場合に比して後流の幅が狭くなる。このように後流幅が減少することによって, 後流中の流速, すなわち下流側円柱に作用する流れの速度は, 開水路側壁の影響がない場合に比して増加する。そのため B/D が小さくなるにしたがって K_a が大きくなるのであろう。このことは「3. 後流中の流速分布」においても見られるようである。

3. 後流中の流速分布

$B/D=21$ の場合の単独円柱背後の後流の中心軸上の流速 u_0 と円柱前面の流速 U との二乗比 $V_2 = u_0|u_0|/U^2$ と K_a との比較を行なった結果では, V_2 と K_a との変化の状態は比較的良好一致し, 下流側円柱に働く力が単独円柱の場合に比して小さくなるのは, 下流側円柱に作用する流れの流速の減少によるものであることが明らかになった¹⁾。 $B/D=6.0$ および 4.0 の場合についても, 単独円柱背後の後流中の流速分布を測定し, 流速分布の計算値と比較し, また流速の二乗比 V_2 と K_a との比較を行なった。

(1) 実験方法

図-4 に示すように, 開水路中に直径 $D=20$ cm および 30 cm の円柱を単独に置いた場合, 円柱背後の後流中の流速 u (鉛直方向の平均流速) の分布, および円柱の前面流速 U をフォト・トランジスタ型プロペラ式

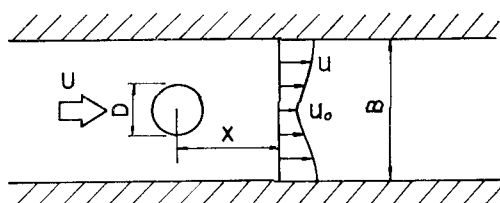


図-4 円柱背後の後流中の流速分布

表-2 後流中の流速分布に関する実験条件

円柱直径 D (cm)	流速 U (cm/sec)	水深 h (cm)	レイノルズ数 $Re=UD/\nu$
30	20.9	50	5.7×10^4
	30.8		8.4×10^4
	39.0		1.1×10^5
	48.7		1.4×10^5
	60.1		1.6×10^5
20	21.2	50	3.9×10^4
	31.3		5.7×10^4
	41.4		7.5×10^4
	51.0		9.3×10^4
	59.4		1.1×10^5

流速計を用いて測定した。実験においては水深 $h=50$ cm と一定にし、流速 $U=20$ cm/sec $\sim$ 60 cm/sec に変化させた。実験の条件を表-2 に示す。

(2) 実験結果およびその考察

直径 $D=30$ cm ($B/D=4.0$) および 20 cm ($B/D=6.0$) の円柱を単独に置いた場合、後流の中心軸上 ($y=0$) の流速 u_0 と円柱前面の流速 U との比 $V_1=u_0/U$ と、流速測定点の円柱中心からの距離 x と円柱直径 D との比 x/D との関係を図示したものが図-5 である。図-5 より明らかなように、 $1.0 \leq x/D \leq 1.5$ では、 B/D による V_1 の違いは大きくないが、 $x/D > 1.5$ になれば、 B/D による V_1 の違いは顕著になる。すなわち開水路側壁が後流中の流速分布におよぼす影響は大きくなるようである。たとえば、 $x/D=5.0$ においては、 $B/D=21$ の場合

には $V_1 \approx 0.70$ であるが、 $B/D=6.0$ では $V_1 \approx 0.90$ 、 $B/D=4.0$ では $V_1 > 0.90$ となるようである。

B/D による V_1 の違いについては次のようなことが考えられる。 B/D が小さくなるにしたがって、すなわち円柱直径が大きくなるにしたがって円柱背後に生じる後流域の幅が広くなる。したがって後流幅の拡がりによぼす側壁の影響は x/D が小さい範囲から現われ、しかもその程度は大きくなり、後流中の流速分布がうける側壁の影響は $B/D=6.0$ および 4.0 の場合は $B/D=21$ の場合に比して大きくなるのであろう。 $B/D=21$ の場合には、後流の中心軸 ($y=0$) 上の流速 u_0 は $x/D > 4 \sim 5$ になれば、次式により表わされることが明らかにされている¹⁾。

$$\frac{u_0}{U} = 1 - \frac{\sqrt{10}}{18k} \left(\frac{C_D \cdot D}{x} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで

C_D : 円柱の抵抗係数 $= 1.25$, $k = 0.18 \sim 0.21$

$B/D=4.0$ の場合の後流中の流速分布の実験結果と式(1)による計算結果とを図-6 に示す。図-6 から明かなように、式(1)による計算値に比して実験値は大きくなっており、また $u/U=1.0$ なる点を後流とその外側の流れとの境界とすれば*、実験値は計算値よりも非常に狭くなり、後流中の流速分布および後流幅におよぼす側壁の影響が、 B/D が小さい場合には大きく現われることが理解されるであろう。

(3) 流速の二乗比 $V_2=u_0|u_0|/U^2$ と K_a との比較

$B/D=21$ の場合、後流中心の流速 u_0 と円柱前面の流速 U との二乗比 $V_2=u_0|u_0|/U^2$ (符号を考慮) と K_a の、 x/D あるいは L/D による変化は互いに比較的良好一致した¹⁾。 $B/D=6.0$ および 4.0 の場合について $V_2=u_0|u_0|/U^2$ と K_a との比較を行なったものが図-7(a) および図-7(b) である。 $B/D=6.0$ および 4.0 のいずれの場合にも、 V_2 と K_a とは x/D あるいは $L/D=1.1 \sim 1.5$ の場合には比較的良好一致しているが、 x/D あるいは $L/D > 2$ になれば、 V_2 と K_a とは一致しなくなり、 x/D あるいは L/D が増加するにしたがい V_2 と K_a と

の差は大きくなるようである。この違いについては、実験時の観察より次のようなことが考えられる。

すでに述べたように、 $B/D=6.0$ および 4.0 の場合には後流の幅は側壁の影響によって抑制される。そのため、 $B/D=4.0$ および 6.0 の場合の後流中の流速は側壁の影響がない $B/D=21$ の場合に比して大きくなり、したがって、後流の振動によって生じる水路を斜めに横切る流れ

* $u/U=1.0$ なる点を後流とその外側の流れとの境界とすれば境界線上の流速 q は、 y 方向の流速成分を有するため $q = \sqrt{u^2 + v^2} > U$ となる。しかし、 v は u に比して小さいため、近似的に $q \approx u = U$ なる点を境界とした。

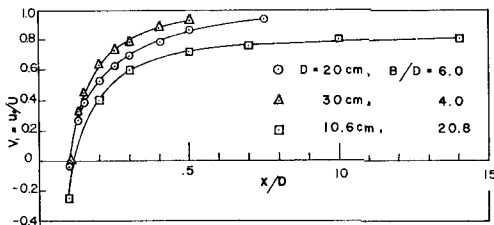


図-5 $V_1=u_0/U$ と x/D との関係

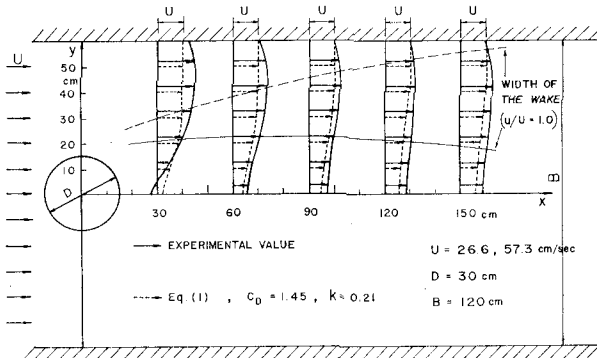
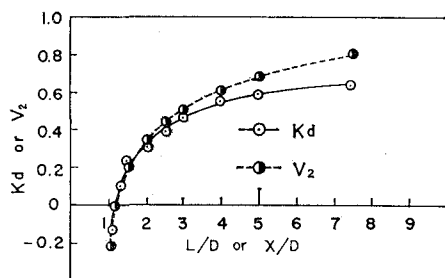
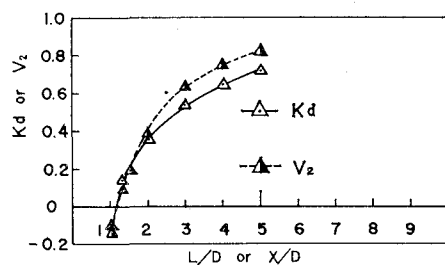


図-6 後流中の流速分布

(a) $B/D=6.0$ の場合(b) $B/D=4.0$ の場合図-7 V_2 と K_d との比較

の速度が側壁の影響がない場合より大きくなる。後流の中心軸上の流速を測定する際には流速計のプロペラの軸を水路の軸に平行になるようにした。このようにして流速の測定を行なうと、水路を斜めに横切る流れによって、水路の軸に直角方向の速度成分 v が生じる。そのため水路の軸に平行な流速成分 u が、 v に比例した $\kappa \cdot v$ なる大きさだけ増加し、 $u + \kappa \cdot v$ であるかのように記録されることが明らかになった。 u と $\kappa \cdot v$ とを記録紙上から分離することはできなかったため、円柱に作用する水路の軸に平行な流れの速度は、実際の速度よりもわずかではあるが大きくなっていると考えられる。一方、円柱に働く力の測定では、水路の軸に直角方向の成分 v の向きが交互に変わるため*、円柱に働く力の水路の軸に直角方向の成分は、 v の向きが交互に変わる周期に比して十分長く測定し、時間的な平均をとれば 0 とみなすことができる。

* この周期は、後流の振動の周期すなわち渦の発生の周期と一致し、ストロウハル数 nD/U (n : 渦の単位時間あたりの発生個数) ≈ 0.2 より定まる。

流速の測定では、 v の影響を加え合っているが、力の測定では打ち消し合っているため、 V_2 と K_d との違いが生じたのであろう。

4. 結 論

以上述べてきたことを要約すれば、次のようになるであらう。

(1) 2本の円柱を流れに平行に置いた場合、上流側円柱に働く力 F_u と単独円柱に働く力 F_∞ との比 $K_u = F_u/F_\infty$ におよぼす開水路側壁の影響は小さく、 $B/D=21$ 、6.0 および 4.0 のいずれの場合の K_u も互いに比較的よく一致し、 K_u は L/D の増加にしたがいほぼ直線的に増加する。すなわち、 F_u におよぼす開水路側壁の影響は F_∞ の場合とほぼ同じと言える。

(2) 下流側円柱に働く力 F_d と F_∞ の比は $K_d = F_d/F_\infty$ は、 $B/D=6.0$ の場合と $B/D=21$ の場合とはよく一致し、 K_d あるいは F_d におよぼす開水路側壁の影響は、 $B/D \geq 6.0$ になればほぼ無視できる。しかし、 $B/D=4.0$ の場合には K_d におよぼす側壁の影響は大きく、 $B/D \geq 6.0$ の場合に比して約 20% 程度 K_d の値は大きくなる。

(3) $B/D \leq 6.0$ になれば、後流中の流速分布におよぼす開水路側壁の影響は大きく、 $B/D=6.0$ では $B/D=21$ の場合の約 20%、 $B/D=4.0$ の場合には約 30% 以上 u_0/U の値が大きくなる。また、 $V_2 = u_0|u_0|/U^2$ の分布と K_d の分布とを比較した結果では、 V_2 は K_d より大きくなり、その差は x/D あるいは L/D が大きくなるにしたがい大きくなる。

付 記：この研究を行なうにあたり、実験およびデータ整理に御協力いただいた当時大阪市立大学工学部学生 高尾信行君（現在戸田建設）に謝意を表す。この研究は文部省科学研究費（総合研究：海洋土木に関する水工学的総合研究、代表者：京都大学岩垣雄一教授）による研究の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 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，No. 196，1971，12
- 2) 永井莊七郎：改訂水理学，コロナ社，1972