

円柱構造物に働く潮流力に関する基礎的研究(第3報)

永井 莊七郎*・小 田 一 紀**・倉 田 克 彦***

1. 緒 言

海底油田探査あるいは掘削等のための掘削リグ、海上プラットフォーム等の、部材(円柱)が直径に比して比較的狭い間隔で組合わされている構造物が潮流中に設置された場合、各部材円柱に働く潮流力は部材間に相互干渉が生じ、またレイノルズ数 Re が 10^6 程度と大きくなるため、これまでに多くの研究成果が得られている $Re < 2 \times 10^5 \sim 3 \times 10^5$ の場合の開水路流れの中の1本の円柱に働く力とは異なる。

著者らは、円柱の組合わせ構造物に働く潮流力に関する基礎的研究として、開水路流れの中における円柱の相互干渉について研究をおこなってきた^{1)~4)}。またレイノルズ数が大きい場合については、Roshko⁵⁾ は風洞実験によって、有田ら^{6),7)} は実機の曳航実験によって $Re = 10^6 \sim 10^7$ の範囲の円柱の抵抗係数を求めている。

一方、水路側壁の影響が生じないだけの幅を有する開水路流れにおいて Re が大きい範囲の実験を行うことは困難であって、たとえば、 $Re = 10^6$ を得るには円柱の直径 $D = 1.0 \text{ m}$ とすれば流速 $U \approx 1.0 \text{ m/sec}$ となり、水路側壁の影響が入らないようにするには水路幅 $B > 6.0 \text{ m}$ でなければならない。そのため、水深 $h = 40 \text{ cm}$ (フルード数 $F_r = U/\sqrt{gh} \approx 0.5$) としても、流量 $Q \approx 2.4 \text{ m}^3/\text{sec}$ にもなる。したがって、 Re が大きい範囲の実験を行うには、潮流流速が比較的速い海域において現地実験を行うか、あるいは有田らのように実機を用いた曳航実験等によらねばならない。

著者らは、日本鉄道建設公団が昭和 43 年に岡山県児島半島鷺羽山沖に設置した海中鉄構を利用して、円柱および角柱に働く潮流力に関する現地実験を行う機会を得た。本論文は、 Re が比較的大きい範囲について得られたこの現地実験の結果を取りまとめたものである。

2. 実験施設および実験方法

実験を行った海中鉄構は、昭和 43 年に日本鉄道建設

公団によって岡山県児島半島鷺羽山沖の松島の南約 250 m (水深 D.L. -21 m ~ -22 m) に設置された⁸⁾ (図-1 および写真-1 参照)。この付近の平均潮位は D.L. + 1.80 m である。

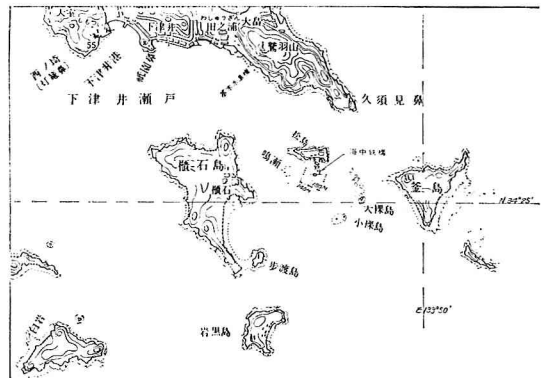


図-1 海中鉄構位置図

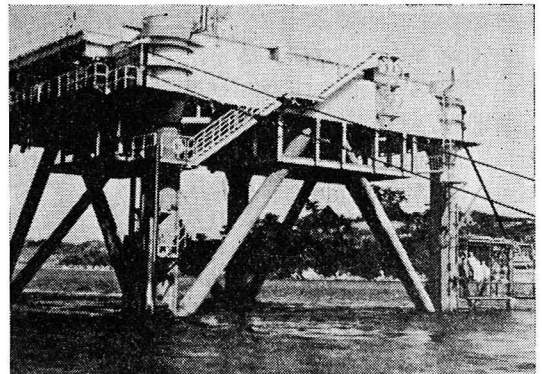


写真-1 海中鉄構

海中鉄構の東には釜島および大裸島、西には櫃石島、南には小裸島があって、潮流は、下げ潮時にはほぼ東流～南東流、上げ潮時にはほぼ西流～南西流となる。潮流は比較的速く、上げ潮時には鉄構設置位置およびその北東側において最大流速約 4 ノットあるいはそれ以上に、下げ潮時には鉄構設置位置の西側において最大流速約 5 ノットに達する場合がある⁹⁾。

実験用足場は写真-2 に示すように、海中鉄構の北東

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

側の脚柱中心より測定用円柱あるいは角柱の中心までの距離が 6.75m となるように、鉄構から張出して設けられている。下げ潮時には測定用円柱あるいは角柱（以後両者を総称する場合は供試体という）は北西側脚柱の後流域中に入るため、実験は上げ潮時のみ行った。

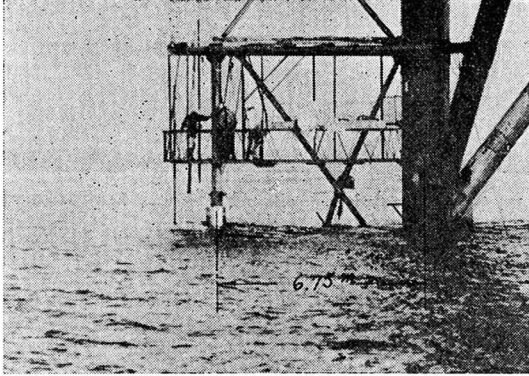


写真-2 供試体の設置位置

実験に用いた供試体は、表-1 に示すように、直径 $D=60$ cm および 100 cm、あるいは 1 辺の長さ $D=50$ cm、高さ 100 cm~150 cm、表面ラッカー塗装仕上げおよび塗装仕上げなしの耐蝕アルミニウム製円柱および角柱である。これらの供試体は抵抗測定板への取付けのため 2 つに分割されるようになっている。

実験においては、図-2 に示すように、3 つの供試体は鉛直方向にそれぞれの間隔 5 mm~10 mm あけて並べられ、抵抗測定板を介して外管に取付けられている。この外管は支持柱に沿って上下し、鉛直方向の任意の位置に供試体を保持できるようになっている。

中央供試体の上下には比較的狭い間隔で同じ大きさの供試体があるため、中央供試体に働く潮流力に関しては、供試体端部および自由水面（造波抵抗）の影響はほぼ無視され、2 次元流中に置かれた場合と同じとみなすことができるであろう。中央供試体に働く潮流力と上部

表-1 供試体寸法および表面状態

供試体	寸 法	表 面 状 態
円 柱	直 径	100 cm
	長さ、上段	150
	中段	100
	下段	100
	直 径	60
	長さ、上段	130
角 柱	50 cm×50 cm	
	長さ、上段	150
	中段	100
	下段	100
		ラッカー塗装仕上

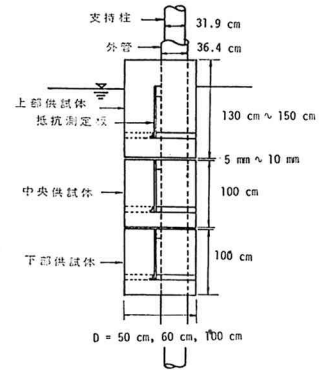


図-2 供試体の配置概略図

および下部供試体に働くそれとを比較して、抵抗係数におよぼす造波抵抗および供試体端部の影響を明らかにした。

供試体の上流側 3.0m の位置の鉛直線に沿った流速分布の一例を図-3 に示す。図-3 より明らかなように、

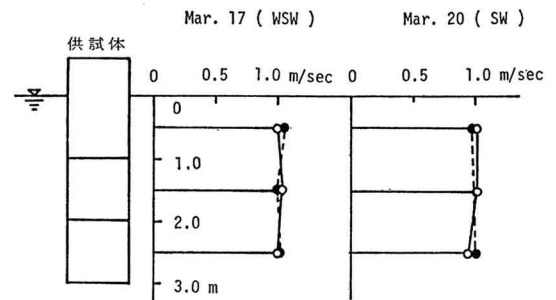


図-3 潮流流速分布の一例

上げ潮時の南西流および西南西流のいずれの場合にも、水面付近から下部供試体の下端付近まではほぼ一様な流速分布を示している。そのため、実験においては、中央供試体のほぼ中央付近に相当する深さの点（1点）において、電気式流速計（東邦電探製）によって、供試体に働く潮流力の測定と同時に測定した流速の平均値を潮流流速 U とした。

供試体に作用する潮流力 F は、図-4 に示すように潮流力 F および鉛直方向の力（浮力など） F_u によって点 A および B に生じる曲げモーメント M_A および M_B の差 ($M_A - M_B$) を取り出すように結線されている4枚のひずみゲージを貼付けた抵抗測定板によって測定し、

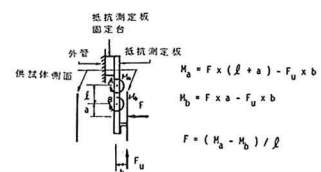


図-4 抵抗測定装置概略図

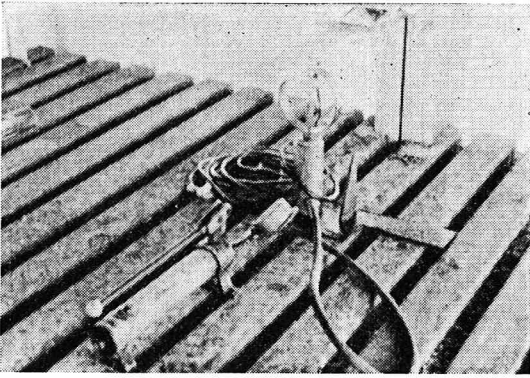


写真-3 抵抗測定板の検定

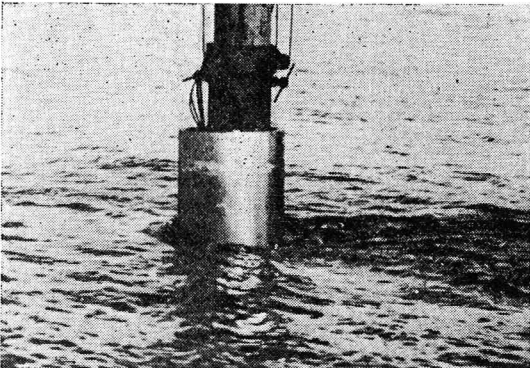


写真-4 円柱の実験状況

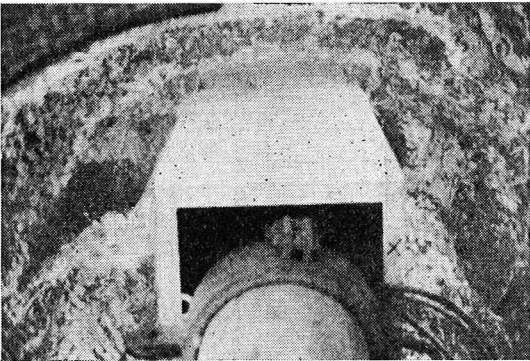


写真-5 角柱の実験状況

直視式電磁オシログラフによって記録した。抵抗測定板の検定は写真-3に示すように、油圧ジャッキと油圧計とを用いて行った。

写真-4および写真-5に円柱および角柱に働く潮流力に関する実験の状況を示す。

3. 実験結果およびその考察

供試体の抵抗係数 C_D は次式より求まる。

$$C_D = \frac{F}{\frac{w_0}{2g} \cdot A \cdot U^2}$$

ここで、 F : 供試体に働く潮流力、 w_0 : 海水の単位体

積重量 $=1.03 \text{ t/m}^3$, g : 重力の加速度 $=9.8 \text{ m/sec}^2$, U : 潮流流速, A : 流れに垂直な面への供試体の水中部分の投影面積 $=D \cdot h_d$, D : 円柱の直径あるいは角柱の1辺の長さ, h_d : 供試体の水中部分の高さ。

上部供試体については、流れが供試体に衝突して生じる波によって水面が常に変動しているため、供試体がない場合の水面は供試体前面中央(よどみ線)における水面より $U^2/2g$ だけ低いとして、そこから上部供試体下端までの深さを h_d とした。

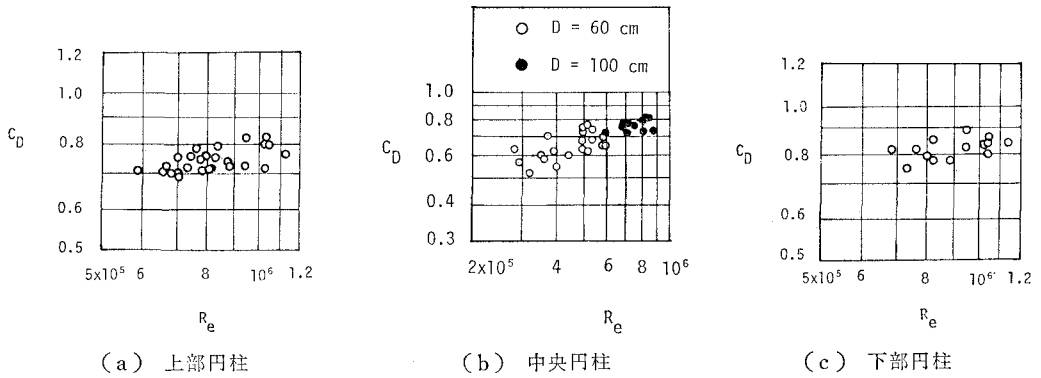
(1) 円柱の抵抗係数

円柱の抵抗係数 C_D を図-5(a)~(c)に示す。

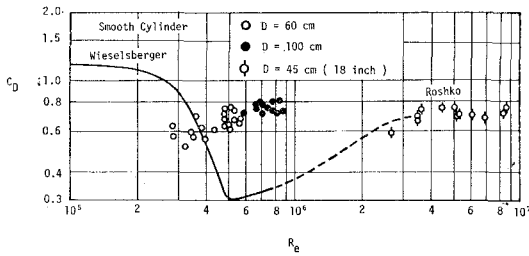
図-5(a), (b)より明らかなように、レイノルズ数 $Re = DU/\nu \approx 6 \times 10^5 \sim 9 \times 10^5$ (フルード数 $Fr(D) = U/\sqrt{gD} \approx 0.26 \sim 0.39$) の範囲では、上部円柱と中央円柱との抵抗係数 C_D はほぼ同じであって、円柱の抵抗係数におよぼす造波抵抗の影響は、土屋・浦による結果¹⁰⁾と同様にほぼ無視しようといつてよいであろう。図-5(b), (c)より明らかなように、下部円柱の抵抗係数は中央および上部円柱の抵抗係数に比してはほぼ0.05程度大きくなっている。これは、下部円柱の下端には底板がないため、流れは円柱端部を廻り込んで円柱内部に侵入し、円柱の下流側面の内側に衝突し、流れ(流速 U)と同じ向きの力が働き、見掛け上 F が大きくなることによるものであろう。

2次元流中の滑らかな円柱に関する Wieselsberger¹¹⁾ および Roshko¹²⁾ の実験結果と今回の実験結果との比較、および Wilson¹³⁾ らの実験結果との比較をそれぞれ図-6および図-7に示す。Roshkoの実験では円柱の相対表面粗度 $k/D = 1.1 \times 10^{-5}$ であるが、Szechenyi¹⁴⁾によれば、 $k/D < 3.5 \times 10^{-5}$ であれば滑らかな円柱と見なせる。滑らかな円柱の抵抗係数 C_D の $Re \approx 8 \times 10^5 \sim 3 \times 10^6$ における変化は、Wieselsberger と Roshko の実験結果とを滑らかに結んだ図-7中の破線によって示されるであろう。図-6(a), (b)あるいは図-7より明らかなように、今回の実験の結果では、 $Re \approx 3 \times 10^5$ では $C_D \approx 0.5 \sim 0.6$ であって、 Re が増大するにつれて C_D は大きくなり、 $Re \approx 6 \times 10^5 \sim 10^6$ では $C_D \approx 0.7 \sim 0.8$ とほぼ一定となって、滑らかな円柱の場合の C_D の Re による変化と全く異なっている。この違いについては、円柱の表面粗度および流れの有する乱れの影響がその理由として考えられる。同様のことが図-7においても見られるようである。

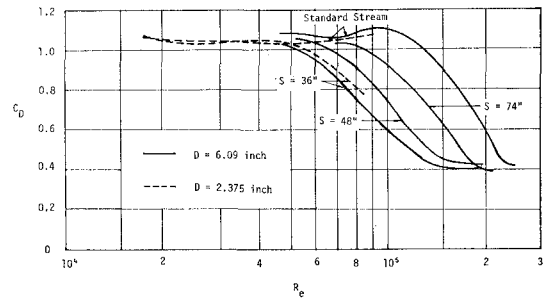
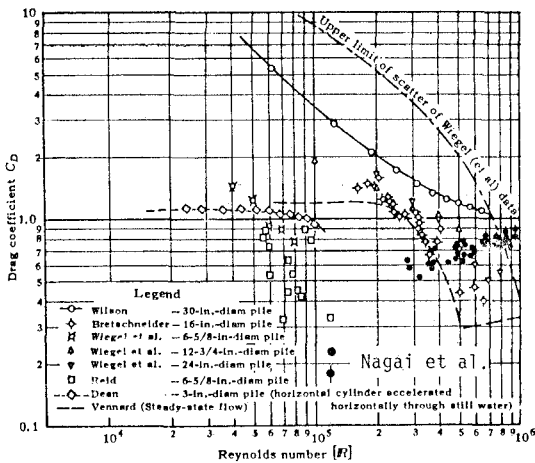
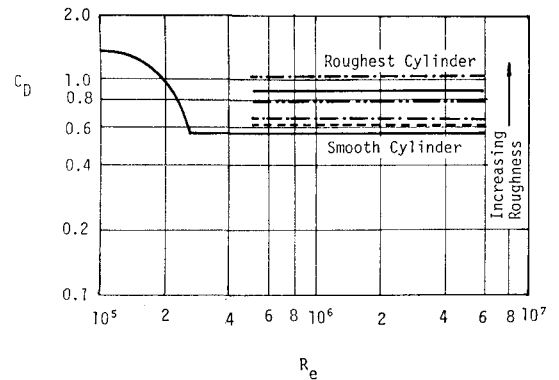
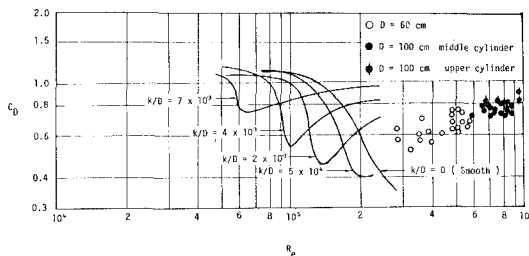
円柱の表面粗度 k (あるいは相対表面粗度 k/D) が大きいほど、あるいは流れの乱れが強いほど円柱の臨界レイノルズ数 Re_c が小さくなり、また表面粗度が大きくなるほど $Re > Re_c$ における C_D が大きくなること、Page¹⁵⁾ らあるいは Blumberg¹⁶⁾ らによって 図-8, 図



図—5 円柱の抵抗係数



図—6 滑らかな円柱の抵抗係数との比較

図—9 円柱の抵抗係数におよぼす流れの乱れの影響 (A. Fage and J.H. Warsap¹⁵⁾ による)図—7 振動流中の円柱の抵抗係数 (B. W. Wilson¹⁸⁾ による)図—10 円柱の抵抗係数におよぼす表面粗度の影響 (R. Blumberg and A.M. Rigg¹⁶⁾ による)図—8 円柱の抵抗係数におよぼす表面粗度の影響 (A. Fage and J.H. Warsap¹⁵⁾ による)

—9 および 図—10 に示すように明らかにされている。図—9 中の S は円柱からその上流側に設けられた直径 0.25 inches (≈ 0.6 cm) のロープを 1.5 inches (≈ 3.8 cm) 間隔で網目状に組んだものまでの距離である。この網によって生じた乱れは流下距離が長くなるほどその減衰は大きくなる。したがって S が小さいほど、円柱に作用する流れの有する乱れは強い。

図—8 に示すように、今回の実験結果と滑らかな円柱の実験結果との違いが表面粗度によるものとすれば、実験に用いた円柱の相対表面粗度 $k/D \approx 5 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3}$

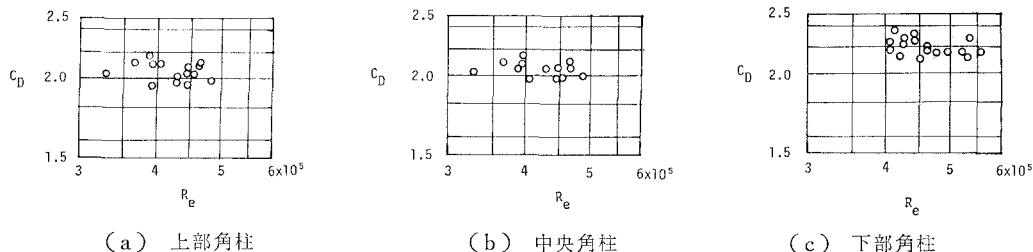


図-11 角柱の抵抗係数

程度になるようである。一方、図-9 に示すように、 S が小さいほどすなわち流れの乱れが強くなるほど Re_c が小さくなるが、 $Re > Re_c$ における C_D の値は乱れがない (Standard Stream) 場合とほぼ同じであるので、図-6, 7 および 8 に示すように、滑らかな円柱に比して C_D が大きくなるのは主として円柱の表面粗度によるものといえるであろう。

次に実際の構造物について考えてみる。たとえば直径 $D=1\text{m}\sim 2\text{m}$ の鋼管が流速 $U=3\text{ノット}\sim 5\text{ノット}$ の潮流中に置かれている場合、 $Re \approx 1.5 \times 10^5 \sim 5.0 \times 10^6$ となるので、滑らかな円柱の場合には図-6 より $C_D \approx 0.5 \sim 0.7$ となる。有田ら^{17), 18)} も、模型実験および実機の曳航実験の結果より、隣接円柱の影響がない場合には、 $Re=10^5 \sim 10^6$ では $C_D \approx 1.2 \sim 0.7$ 、 $Re=10^6 \sim 10^7$ では $C_D=0.7$ にとることを推奨している。しかし、設置後年月が経過するにつれて、牡蛎等の貝類の付着のため表面粗度が大きくなると考えられるので、図-8 および 図-10 に示す今回の実験結果、Fage らおよび Blumberg らの実験結果を参照すれば、 $C_D=1.0$ にとればよいであろう。

(2) 角柱の抵抗係数

角柱の抵抗係数 C_D を図-11 (a)~(c) に示す。図-11 (a), (b) より明らかなように、 $Re \approx 3.3 \times 10^5 \sim 4.8 \times 10^5$ ($Fr(D) \approx 0.46 \sim 0.61$) の範囲では、中央および上部角柱の抵抗係数はほぼ同じであって、角柱の抵抗係数におよぼす造波抵抗の影響はほぼ無視しうようである。下部角柱の抵抗係数は図-11 (c) に示すように、中央および上部角柱の場合に比してほぼ 0.1 程度大きくなっている。これは円柱の場合と同様に下部角柱の下端を回り込んだ流れの影響によるものであろう。

$Re \approx 3.3 \times 10^5 \sim 4.8 \times 10^5$ の場合の中央角柱の抵抗係数の平均値 $C_D=2.05$ であり、 $Re \approx 2 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4$ の場合の $C_D=2.06$ ¹⁹⁾ と一致している。これは角柱の 1 つの面が流れに対して直角に向いている場合、 Re が大きくなれば流れの剥離点は Re の値、角柱の表面粗度、流れの乱れ等にかかわらず角柱前面の隅角部に定まっていることによるのであろう。

角柱を用いた実際の構造物では Re が更に大きくなる

が、剥離点の位置は隅角部に定まっているため、 $C_D=2.05 \sim 2.06 \approx 2.1$ にとればよいであろう。このことは、 $Re=10^4 \sim 10^6$ の範囲における 2 次元流中の角柱の抵抗係数 $C_D=2.05$ にとることを Hoerner²⁰⁾ が提案していることと一致している。

4. 結 論

実験の結果を要約すれば次のようになるであろう。

(1) $Re \approx 6 \times 10^5 \sim 9 \times 10^5$, $Fr(D) < 0.4$ の範囲では、円柱の抵抗係数におよぼす造波抵抗の影響はほぼ無視でき、 $C_D \approx 0.5 \sim 0.8$ となる。滑らかな円柱の場合の C_D との違いは、主として円柱の表面粗度によるものである。

(2) $Re \approx 2 \times 10^4 \sim 5 \times 10^5$, $Fr(D) < 0.6$ の範囲では、角柱の抵抗係数 $C_D \approx 2.05 \sim 2.06$ とほぼ一定な値を示し、造波抵抗の影響はほとんどない。

(3) Re が大きい ($> 10^6$) 実物の抵抗係数 C_D は、表面粗度の増加を考えて、円柱の場合には $C_D=1.0$ 、角柱の場合には、表面粗度に拘わらず $C_D=2.1$ にとればよい。

5. 付 記

この実験を行うにあたり多大の御援助、御協力をいただいた当時日本鉄道建設公団児島調査事務所および鉄道建設業協会児島調査所の皆様方に深甚なる謝意を表します。また、実験を手伝っていただいた当時大阪市立大学大学院生楠正治君(現在阪神外貿埠頭公団勤務)、大阪市立大学工学部学生高崎伸彦君(現在兵庫県土木部勤務)、藤平勝君(現在パシフィックコンサルタンツ(株)勤務)、田中伸和君(現在(財)電力中央研究所勤務)および角野昇八君(現在大阪市立大学工学部助手)に謝意を表します。

なお、本論文の内容の主要部はすでに研究報告書²¹⁾に取組めて発表したものである。

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, 第 196 号, pp. 57~64, 1971.
- 2) 永井莊七郎・倉田克彦: 円柱列が 2 列ある場合の円柱の相互干渉, 土木学会論文報告集投稿中

- 3) 永井莊七郎・倉田克彦・伊藤 忠: 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, pp. 297~300, 1973.
 - 4) 永井莊七郎・倉田克彦: 同上(第2報), 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 439~442, 1975.
 - 5) Roshko, A.: Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 10, Part 3, pp. 345~356, 1961.
 - 6) 有田行雄・佐竹 優・藤田秀夫・多賀谷宏三: 多列円柱構造物に作用する潮流力に関する研究, 第19回橋梁構造工学研究発表会, pp. 17~25, 1972.
 - 7) 有田行雄・佐竹 優・藤田秀夫・多賀谷宏三: 多列円柱構造物に作用する潮流力について, 第4回海洋開発シンポジウム講演集, pp. 31~35, 1973.
 - 8) 日本鉄道建設公団大阪支社, (社)鉄道建設業協会: 本四連絡橋基礎工調査実験海中鉄構足場設置計画書(その2), 66 p., 1968.
 - 9) 前出 8).
 - 10) 土屋昭彦・浦 勝: 橋脚の抗力係数について, 土木研究所報告, 第131号, pp. 31~40, 1967.
 - 11) 伊藤英覚: 一様な流れの中の物体の抵抗, 水工学便覧, pp. 134~141, 森北出版, 1966.
 - 12) 前出 5).
 - 13) Wilson, B.W. and R.O. Reid: Discussion of wave force coefficients for offshore pipelines by H. Beckmann and M.H. Thibodeaus, *Proc. of ASCE*, Vol. 89, WW. 1, pp. 61~65, 1963.
 - 14) Szechenyi, E.: Supercritical Reynolds number simulation for two dimensional flow over circular cylinders, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 70, Part 3, pp. 529~542, 1975.
 - 15) Fage, A. and J.H. Warsap: The effects of turbulence and surface roughness on the drag of a circular cylinder, *Reports and Memoranda*, No. 1283 (Ae. 429), 1929.
 - 16) Blumberg, R. and A.M. Rigg: Hydrodynamic drag at super-critical Reynolds numbers, Paper presented at ASME Meeting, Petroleum Session, 1961.
 - 17) 前出 6).
 - 18) 前出 7).
 - 19) 永井莊七郎: 改訂水理学, 532 p., コロナ社, 1974.
 - 20) Hoerner, S.F.: *Fluid-dynamic Drag*, 1965.
 - 21) 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4), 42 p., 1969.
-