

多列円柱構造物に作用する潮流力に関する研究

三菱重工業 有田行雄 佐竹優 ○藤田秀夫 多賀谷宏三

1 研究目的

各種長大橋の建設計画が進められているが、これらの橋脚は上部工の経済性より、潮流の速い海峡部分に建設されるケースが多い。このため、施工及び設計上の観点より、これらの橋脚を多列円柱構造とする場合が多く見受けられる。その他、各種海中鉄構においてもパイプ構造が採用される例は多い。これらの多列円柱構造に潮流が作用する場合の潮流力に関する研究は多方面で行なわれているが、橋脚等に作用する潮流力のように、*Reynolds*数の高い流体力については数多くの問題点が残されている。特に多列円柱の相互干渉の問題は施工中および施工後を通じて、流体力を評価する上で重要な問題である。

本研究は、多列円柱構造物に作用する潮流力の大きさ（抗力）について、広島湾における大型模型試験および水槽における小型模型試験を行ない、設計・施工に必要なデータの収集をはかることを目的とした。

2 供試模型

2・1 大型模型

大型模型の概略図を図1に示した。

直方体骨組の中に6本の円柱を組込んだもので、材料は板巻鋼管であり、塗装を行わず表面は比較的なめらかである。

2・2 小型模型

小型模型の概略図を図2に示した。

大型模型を平面的に $1/20$ に縮尺し、高さ方向に $1/10$ に縮尺した模型である。

材質はプラスチックで表面はなめらかである。

3 試験装置および試験方法

3・1 大型模型試験

図3に示す方法で等速曳航を行ない、曳航速度（対水速度）、曳航張力および各円柱に作用する潮流力の分担率を計測した。なお、潮流と模型角度の影響を見るために図3に示す方向の曳航を行なった。

各計測項目の計測方法は次のとおり

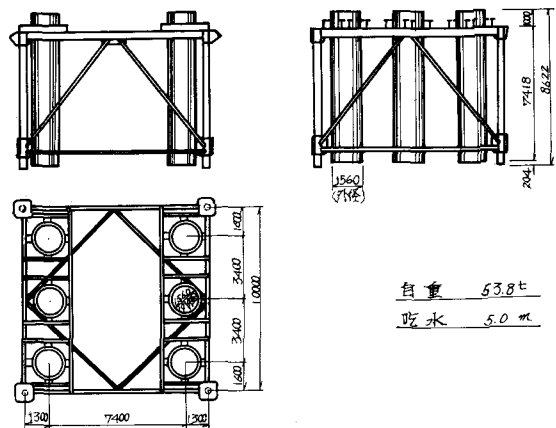


図1 大型模型

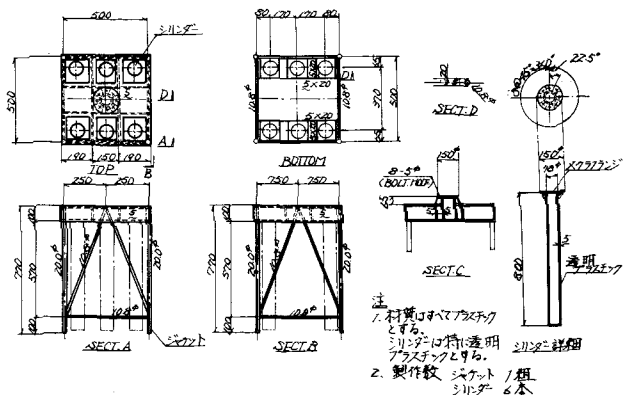


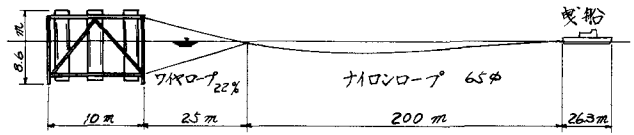
図2 小型模型

である。

曳航速度：流速計と曳航前部の海中にとりつけ計測した。

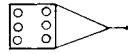
曳航張力（全抗力）：曳索に張力計を挿入し連続的に計測・記録した。

各円柱に作用する潮流力の分担率（L方向のみ）：各円柱の下端でジャケットと円柱間にロード・セルを挿入し連続的に計測・記録した。



曳航は下の3方向について行なり。 曳航速度 1~6ノット

T方向



θ方向



L方向

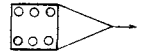


図3 大型模型試験方法

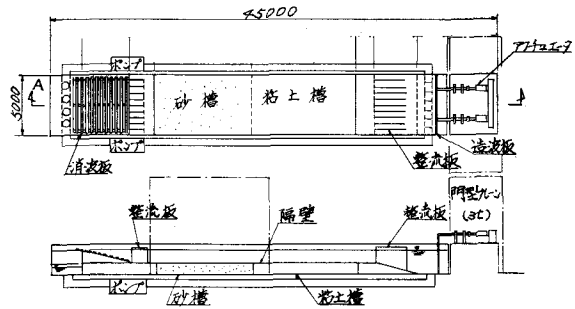
3・2 小型模型試験

図4に示す海洋構造物実験用水槽の計測部分をしぼり、模型をセットして流れを作用させ、抗力を検出した。流れ方向と模型角度については、大型模型試験と同じ3方向について実験を行なった。

計測項目および計測方法は次のとおりである。

流れ速度：ドブラー効果式流速計

抗力：図5に示す抗力検出装置を自作し、各円柱およびジャケットにとりつけ計測した。実際の計測にあたっては、円筒の回転モーメントを消去するために円筒中に鉛を入れた。



SEC A-A

図4 海洋構造物実験場

4 試験結果および考察

4・1 大型模型試験結果および考察

図6に示す有効面積により全抗力を(1)式のようにあらわす。

$$P = \frac{1}{2} \rho V^2 (A_0 C_{D0} + A_a C_{Da}) \quad (1)$$

ここに

P：全抗力

ρ：水の密度

V：流速または等速曳航対水速度

A₀：円柱の有効見付面積

C_{D0}：円柱の抗力係数

A_a：箱型断面，I型断面，平板の有効見付面積

C_{Da}：箱型断面，I型断面，平板の抗力係数

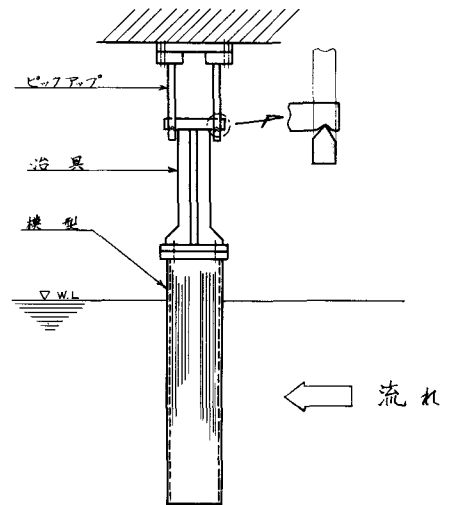


図5 抗力検出装置

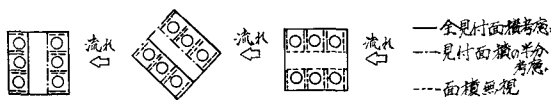


図6 有効面積

試験により得られた $P-V$ の関係および図6の仮定より、(1)式を用いて C_{Du} と C_{Do} の関係を求める

と図7が得られる。図7において、 T 方向流れについては、6本の円柱に作用する潮流力は等しく、 D 方向流れおよび L 方向流れについては、光頭の C_1, C_4 柱に作用する潮流力は等しく、かつ T 方向流れのそれに等しいとしている。この点については後述する。

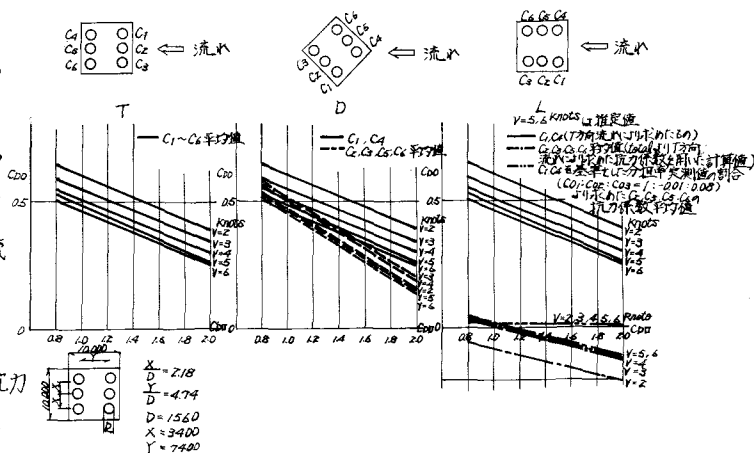


図7 大型模型試験結果

4・1・1 形状抗力と造波抗力
流水中の物体に作用する抗力は
形状抗力と造波抗力とに分けられ

、前者は Reynolds 数に支配され、後者は Froude 数によるといわれている。

(1) 形状抗力

本試験に使用した模型の Reynolds 数は流速 5 knots に対して、 $Re = 3.4 \times 10^5$ 程度であり、いわゆる Critical Reynolds 数 ($Recr = 1 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$) よりも大きい。

これに対して、実際の構造物は本模型よりもさらに大きく、したがって、Reynolds 数も一層大きくなる。文献1)、2)によると、Critical Reynolds 数以下の流速における単円柱の抗力係数は約1.2倍であり、Critical Reynolds 数以上の流速については抗力係数は低下するといわれている。よって、大型模型試験において見られた各種の現象は、実機におけるものとはほぼ同一であると考えて良い。

(2) 造波抗力

本試験における Froude 数は流速 5 knots に対して $Frd = 0.66$ である。文献2)によると円柱の抗力係数 C_D は $Frd = 0.66$ に対して、二次元流れにおける無限円柱の抗力係数より数パーセント大きくなっている。したがって、大型模型試験においては造波抗力は小さく Reynolds 数が支配的であると考えるて良い。

4・1・2 柱の相互干渉

文献3)によると2本の円柱は、次式の範囲では相互干渉がないとされている。(図8)流れが円柱列方向の場合、

$$\frac{X}{D} > 4 \quad (Re = 10^5) \quad (2)$$

流れが円柱列直角方向の場合、

$$\frac{Y}{D} > 2 \quad (Re = 3 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5) \quad (3)$$

これに対して、本試験ではこれらの値は次のようになっている。

(図9)

T方向流れの場合、

$$\frac{X}{D} = 4.74 > 4$$

$$\frac{Y}{D} = 2.18 > 2$$

L方向流れの場合、

$$\frac{X}{D} = 2.18 < 4$$

$$\frac{Y}{D} = 4.74 > 2$$

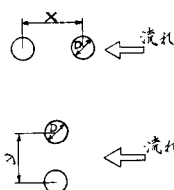


図8

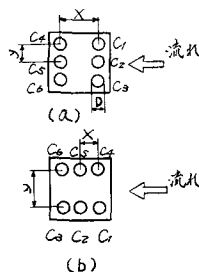


図9

ゆえに、T方向流れについては各柱は等しい力を受け、L方向流れの場合は後方の柱は先頭の柱により干渉されると考えられる。さらに、L方向流れの場合の先頭の柱の抗力係数はT方向流れの各柱の抗力係수에等しいとして良い。また、D方向流れについては参考資料がないが、少なくとも先頭の柱 C_1 , C_4 の抗力係数はT方向流れのそれに等しいとして良さそうである。

実験時の流況観測によっても同様の傾向が得られた。

4.1.3 三次元の影響

本試験において円柱の没水部分の長さと同円柱直径との比は約3.2である。境界条件は、上部は空気に接し、下部は半無限の海水である。また、本試験の状態では造波抗力が小さく、水面付近では二次元流れと考えて良いようであるから、下端にのみ三次元的影响が入るとして良さそうである。これより、二次元抗力係数を得るために、本試験結果を次のように修正する。

$$C'_D = C_{D\infty} - \frac{C_{D\infty} - C_{D3.2}}{2} = \frac{C_{D\infty} + C_{D3.2}}{2} \quad (4)$$

$$C_{DP} = \frac{C_{De}}{C'_D} \times C_{D\infty} \quad (5)$$

ここに、

$C_{D\infty}$: 二次元流れにおける無限円柱の抗力係数

$C_{D3.2}$: 円柱の没水長さ / 円柱直径が3.2に対する円柱の抗力係数

C_{De} : 本実験結果

C_{DP} : 円柱の二次元抗力係数

文献4)によると、 $C_{D\infty} = 1.2$, $C_{D3.2} = 0.708$ であるから、 C_{DP} は次式により求められる。

$$C_{DP} = 1.26 C_{De} \quad (6)$$

ただし、これらの C_{D0} および $C_{D0.2}$ は Reynolds 数が $10^4 \sim 2 \times 10^5$ の場合であり、本試験のように 3.4×10^6 の Reynolds 数に対しては (6) 式は多少、精度が悪いかも知れない。

4.1.4 各円柱の力の分担率

力の分担率の実測値を示したのが図7の二点鎖線である。これと、全抵抗より求めた抗力係数との交点(図7右図の一点鎖線と二点鎖線の交点)が各円柱の抗力係数の正しい値と考えられる。すなわち、箱型断面、I型断面、平板の抗力係数は1.0程度であり、これに対応する円柱の抗力係数の4.1・3による修正値が求められる円柱の相互干渉を含んだ二次元抗力係数と考えられる。

4.2 小型模型試験結果および考察

4.2.1 流れの三次元的影響に関する試験

円柱底面と、その円柱の下に水平においた平板(1m×1m)との距離を数種変えた単円柱の抗力試験を行ない、その結果を図10に示した。

1) 円柱底面と平板との距離と抗力係数の関係、

図10より、円柱底面と平板との距離 d が円柱直径 D より大きくなると、平板の影響はなくなり抗力係数は一定となる。逆に、平板が円柱底面に近づき d/D がゼロに近づくと、抗力係数は大きくなり、平板による流れの乱れがないならば $d/D = 0$ のときの抗力係数は二次元抗力係数と考えられる。

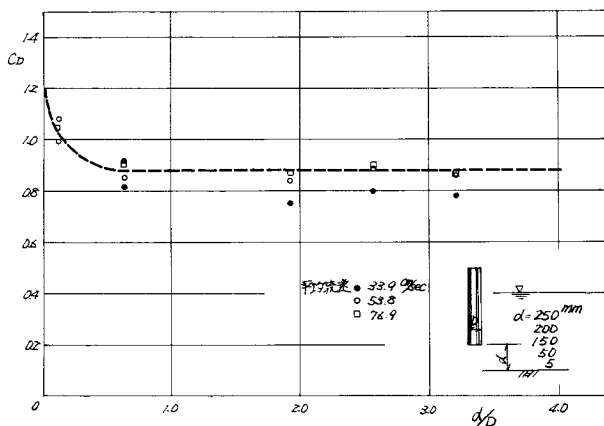


図10 三次元影響試験結果

2) 造波抗力

造波抗力は Froude 数により支配される

が、文献2)によると Froude 数で0.1から0.9までの変化に対して抗力係数は数パーセント大きくなるとされている。

小型模型試験と大型模型試験における造波状況を観察すると、小型模型試験の表面波の方が割合としては大きくなっている。すなわち、小型模型試験の造波抗力は、大型模型試験のそれよりも大きな割合を占めている。この傾向は流速が大きくなると一層明らかとなる。

3) 乱流境界層

平板の接近により流れが乱されることが考えられる。Plandt · Schlichting の式により乱流境界層の厚さを求めると十数ミリメートル程度になる。すなわち、本試験において平板が最も接近する、 $d = 5\text{mm}$ のケースでは平板により乱された流れが円柱に作用することになる。しかし、ここで問題となるのは外力の大きさであるから、円柱の吃水 500mm と比較すると乱流境界層は小さく、これを無視してさしつかえない。

4) 側壁の影響

開水路中央におかれた円柱に及ぼす側壁の影響については文献6)に述べられている。これによると水路巾を B 、円柱直径を D とすれば $B/D > 6$ の場合、側壁の影響がないとされている。今回の試験で

は $B/D = 12.8$ であるから側壁の影響はないとして良い。

5) 二次元抗力係数

以上の考察より、円柱底面下の平板の影響のない三次元抗力係数は本実験結果では $C_{De} = 0.88$ と考えられる。これに対して、二次元抗力係数は $C_{D00} = 1.2$ と見なすことが出来るので、実験結果を次式により修正し、二次元抗力係数とする。

$$C_{Dp} = \frac{1.2}{0.88} \quad C_{De} = 1.36 C_{De} \quad (7)$$

大型模型試験では、この修正値は 1.26 であったが、前述のように、小型模型試験においては大型模型試験よりも造波抵抗の占める割合が大きいの、大型模型試験における修正値 1.26 は、ほぼ妥当な値と考えられる。

4・2・2 ジャケットがない場合の抗力試験

試験の結果を横軸に Reynolds 数、縦軸に抗力係数をとりあらわすと、図 11～13 のようになる。これ

のグラフには他のデータもあわせて C_D

1) T 方向流れの場合 載せてある。

(1) 側壁の影響

文献(6)においては、側壁の影響を
開水路中央に 1 本の円柱がある場合についてのみ論じている。本実験のように、開水路中に複数本の円柱が存在する場合については未だ研究が成されていない。そこで、ここでは、4・2・1、4) における考察より、単柱が開水路中央にある場合は側壁の影響がないので、偏心した円柱の側壁からの影響を検討してみる。

側壁からこれに近い円柱中心までの距離を B' として B'/D をパラメータとして文献(6)のデータを引用することにする。小型模型試験において $B' = 330 \text{ mm}$ であるから、 $B'/D = 8.45$ となる。文献(6)によると $B'/D > 6$ の場合は側壁の影響はないとされている。また複数の円柱が流れ方向にならんでいる場合は、上流側の柱に

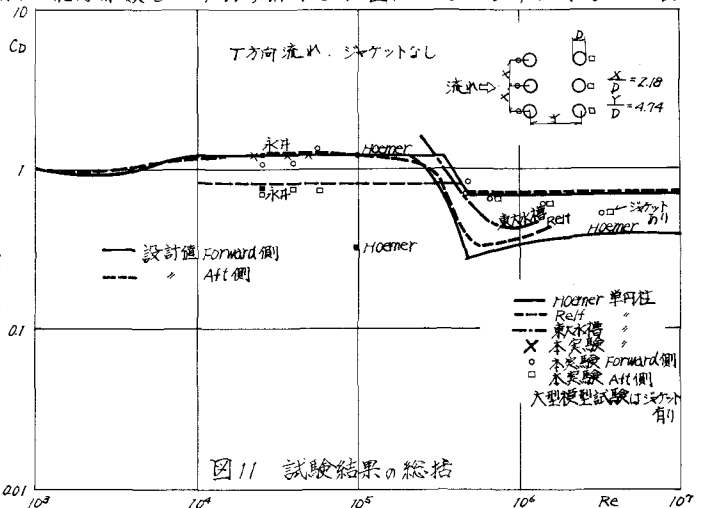


図 11 試験結果の総括

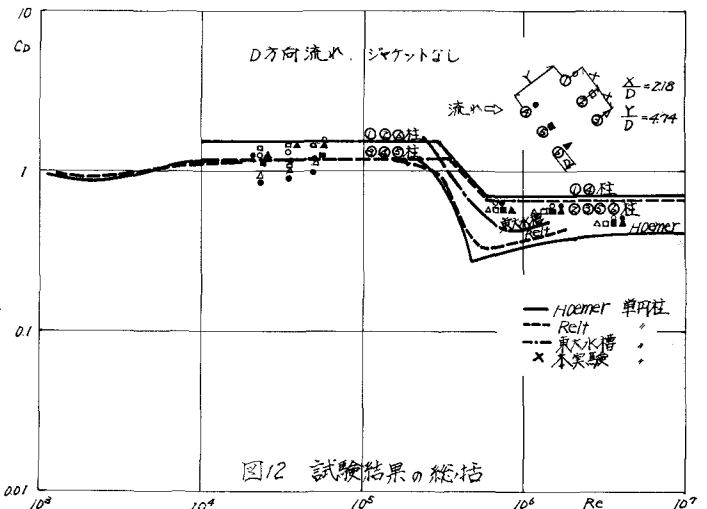


図 12 試験結果の総括

より乱された流れが側壁で反射して下流側の柱に影響をあたえることが予想される。

今回の試験で流況を観察するから”
りでは、側壁の反射の影響は見られ
なかった。ゆえに、本試験では、側
壁の影響はないと考えられる。

(2)円柱の相互干渉

上流側の3本の柱の側面より発生
する二次流が互に干渉し合い、上流
側中央の柱の抗力係数 C_D は単柱の
場合に比べてやや小さくなっている
。これに対して、下流側の柱は隣接
柱の相互干渉と同時に上流側の柱の
影響も受けている。この流れ方向の干渉の距離については文献3), 5)に示されている。

図8により、干渉されない範囲をあらわすと、文献5)より次の関係が得られる。

$$X/D > 10 \quad (8)$$

$$(Re = 1.41 \times 10^4 \sim 3.84 \times 10^4)$$

小型模型試験における Reynolds 数および X/D は次のとおりである。

$$Re = 3.4 \times 10^4 \quad (\text{流速 } 50 \text{ cm/sec})$$

$$X/D = 4.74 < 10$$

すなわち、小型模型試験では、流れ方向の干渉効果があられるはずである。本実験の結果、上流
側円柱と下流側円柱の抗力係数の比は平均的に 1 : 0.58 となっている。

前述の考察より、上流側円柱の抗力係数を 1.2 とすると、下流側円柱の二次元抗力係数は 0.70 とな
る。

一方、流れ直角方向の2本の円柱の相互干渉については文献2)があるが、これによると本実験で
はやや干渉の範囲内にあることになるが、3本の円柱の流れ直角方向の干渉についてはデータが皆
無である。

2) D方向流れの場合

(1)側壁の影響

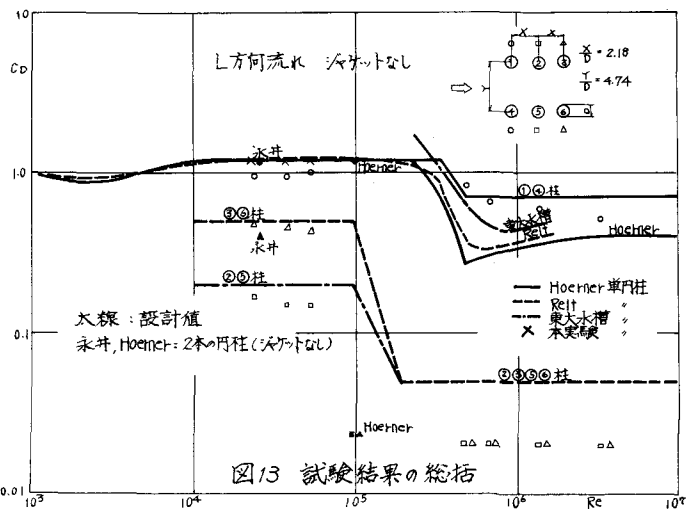
D方向流れの場合と同様の考え方により側壁の影響を考察すると、D方向流れについて、最も側
壁に近い柱の中心から側壁までの距離 B' は 248.8 mm であるから $B'/\frac{D}{2} = 6.4$ となり、側壁の影響は
ほばないことになる。しかし、本実験の流況観察や、現象の定性的考察によると、側壁の影響は多
少含まれているようである。

(2)円柱の相互干渉

図により明らかなように、いずれの柱についてもその抗力係数は、単円柱の抗力係数と異なってい
る。その原因は次のように考えられる。

a) ななめ方向の柱の相互干渉

b) 前後方向の柱の相互干渉



c)側壁の影響

流速分布および流れ方向が的確に把握できない現状では、相互干渉を定量的にあらわすことは極めて困難である。

3) L方向流れの場合

(1)側壁の影響

L方向流れの場合と同一の考察および流況観察より側壁の影響はないと考えられる。

(2)円柱の相互干渉

流れ直角方向の相互干渉は、文献3)によると、次の範囲では干渉がないとされている。(図8)

$$Y/D > 2$$

(9)

$$(Re = 3 \times 10^4)$$

本試験では $Y/D = 4.74$ であるから、流れ直角方向の相互干渉はないと考えられる。これに対して、流れ方向の干渉効果は明らかに存在し、先頭の2本の柱も下流側の柱から影響され、抗力係数は小さくなっている。

4・2・3 ジャケットがある場合の抗力試験

ジャケットがある場合の各円柱の抗力係数を Reynolds 数についてあらわしたものが図14～16である。なお、ジャケットの有効面積については大型模型試験と同様に図6のように考えた。

1) L方向流れの場合

(1)側壁の影響

ジャケットがない場合とほぼ同様に側壁の影響はないと考えられる。

(2)円柱およびジャケットの相互干渉

ジャケットがない場合とほぼ同様の傾向であるが、上流側中央の柱をのぞけば、ジャケットのない場合より抗力係数がやや小さくなっている。これは、ジャケットの存在により、円柱に作用する力が減少したと考えるべきであろう。また、上流側中央の円柱はジャケットの影響がほとんどない位置にあり、このため抗力係数が変化しないと考えられる。小型模型のジャケットはほとんどパイプ構造で、図6に示すような有効面積を考えると、その

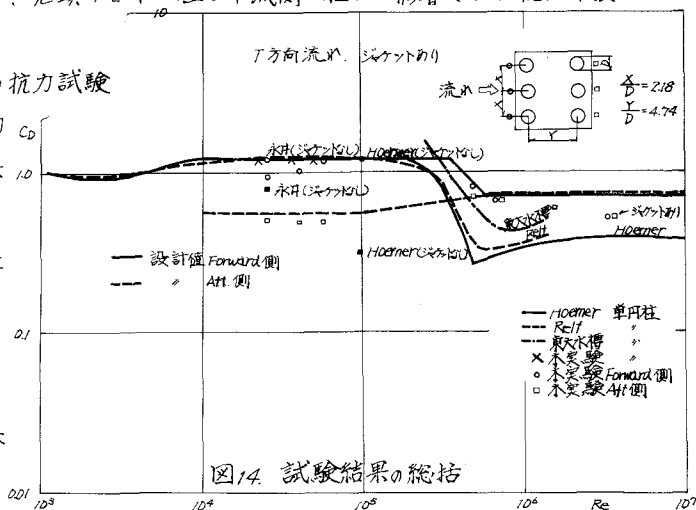


図14. 試験結果の総括

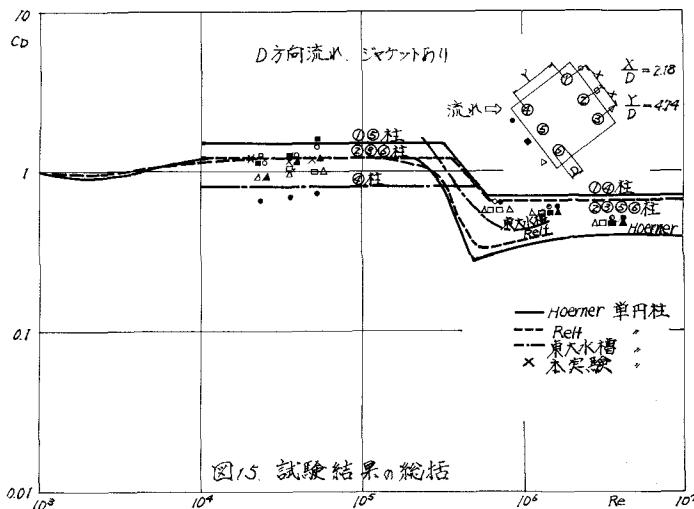


図15. 試験結果の総括

有効面積の90%をパイプが占めている。
したがって、ジャケットの抗力係数は円柱の抗力係数が卓越すると考えられ、今回の試験結果もその傾向を示している。

2) D方向流れの場合

(1) 側壁の影響

ジャケットがない場合と同様に、側壁の影響は多少含まれている。

(2) 円柱およびジャケットの相互干渉

ジャケットがない場合とほぼ同様の傾向であるが、抗力係数はやや小さめになっている。

3) L方向流れの場合

(1) 側壁の影響

この場合も、下方向流れの場合と同様に側壁の影響はないと考えられる。

(2) 円柱およびジャケットの相互干渉

ジャケットがない場合と同じ傾向であるが、全体として抗力係数はやや小さくなっている。

5 結論および今後の問題点

以上の試験結果を大型、小型両模型について総括すると図11～16のようになり、他のデータもあわせ考えると、図中の太線で示す設計抗力係数が得られる。

しかし、円柱の抗力係数に関して次のような問題点が残されている。

- 1) 高 Reynolds 数域における、表面粗度による抗力係数の変化。
- 2) Reynolds 数による三次元効果の変化。
- 3) 多行列の流れ作用方向、円柱距離および Reynolds 数による抗力係数の変化。

このため今後、より系統的な試験を実施し、不明瞭な部分を補う必要がある。さらに、実機によるデータの集積も切望される。

本研究の実施にあたり、三菱重工業(株)広島研究所、八谷和雄、日下理両氏に実験・解析の労をとっていただいたことを付記し、ここに謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 有田行雄：“鋼製煙突の風による振動”，昭和36年11月
- 2) 土屋昭彦，補勝：“橋脚の抗力係数について”，昭和42年4月
- 3) Sigward F. Hoerner：“Fluid-Dynamic Drag”，1958
- 4) 関西造船協会：“造船設計便覧”，昭和44年1月
- 5) 永井荘七郎他：“円柱の相互干渉”土木学会年次学術講演会，昭和44年9月
- 6) 永井荘七郎他：“開水路流れの中の円柱の相互干渉”土木学会論文報告集，1971年12月

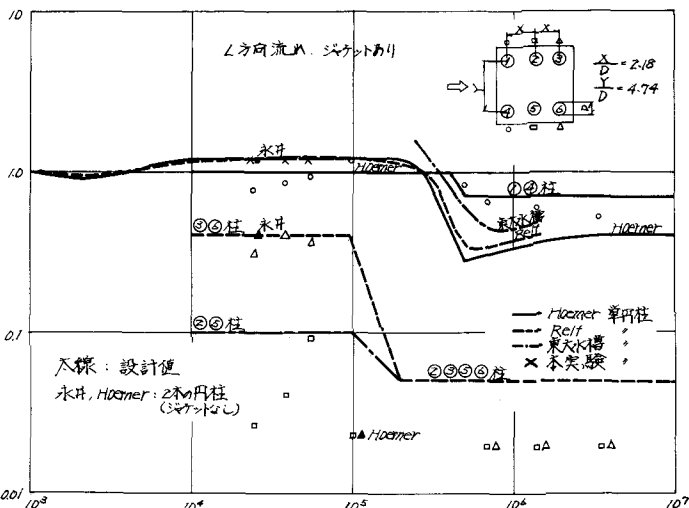


図16 試験結果の総括