

円柱および角柱背後の後流渦に関する実験的研究

石 田 啓*・桑 山 勝 則**

1. 緒 言

柱状構造物に働く波力の算定に際し、波力公式としてモリソン公式を用いた場合に、抗力係数および慣性係数の値が Reynolds 数および Keulegan-Carpenter 数 (以下 K.C. 数と略記) に支配されること、およびこの原因の大半が後流渦の挙動にあることはすでに明らかにされている。この渦の挙動のうち、円柱背後の渦の形状特性については、従来二三の研究^{1),2),3)}があり、K.C. 数の増加に伴い、その形状は対称渦対、非対称渦対、Karman 渦列の順に変化することが確かめられている。

一方、定常流による円柱背後の渦については、すでに定量的な検討がなされており、たとえば、Nishioka ら⁴⁾の研究では、Reynolds 数が 100 以下では、後流渦の長径は、Reynolds 数に比例して増大することが示されている。しかしながら、波の場の後流渦については、これを定量的に考察したものはほとんど見られず、また円柱以外の断面形を有する柱体、たとえば角柱による後流渦については、全く検討されていないと言える。

したがって、本研究では、規則波により円柱および正四角柱の背後に発生する渦を、8 mm 撮影機を用いて連続撮影し、その時間変化を検討すると共に、渦の最大直径および最大流下距離に着目し、Reynolds 数および K.C. 数によるそれらの変化特性を調べることにする。

2. 実験装置および方法

実験は、金沢大学工学部土木工学科実験室に設置された幅 50 cm、深さ 60 cm、長さ 14 m の造波水槽を用いた。図-1 に実験装置の概要を示すが、水槽の一端には

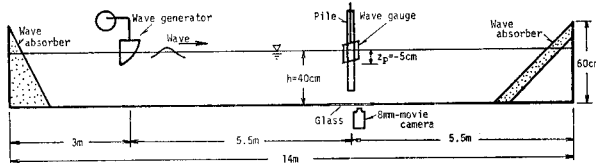


図-1 実験装置概要

プランジャー型の造波機が設置されており、その前方約 5.5 m の位置に、直径 3 cm の円柱あるいは一辺 3 cm の正四角柱を設置した。ただし、角柱は、一つの対角線と波の進行方向が一致するように設置した。これらの柱体壁面からは、直径 0.1 mm の白金線を水平に張り渡し、水素気泡発生装置を用いて気泡列を発生させたが、これをトレーサーとした後流渦の様相を、一部ガラス張りの水槽底面から、8 mm 撮影機を用いて連続撮影した。ただし、撮影の対象とした渦は、波の峯側の位相において発生する渦のみであり、谷側の位相の渦は考慮しなかった。撮影時には、照明用ライト (500 W) を 4 個用いると共に、水槽全体を暗幕で覆うことにより、鮮明な写真が得られるよう工夫した。

表-1 円柱の場合の実験ケース

水深 $h=40$ cm
測定点 $z_p=-5$ cm

実験 No.	周期 T (sec)	波高 H (cm)
1	1.7	4.1~6.6
2	1.8	3.6~5.6
3	1.9	3.2~5.2
4	2.0	4.5~8.0
5	2.2	1.7~4.8
6	2.4	1.8~3.6
7	2.7	1.9~2.0
8	3.3	1.6~4.3
9	3.7	1.2~3.6

表-2 角柱の場合の実験ケース

水深 $h=40$ cm
測定点 $z_p=-5$ cm

実験 No.	周期 T (sec)	波高 H (cm)
1	0.7	0.8~0.7
2	0.8	7.4
3	0.9	6.7~7.2
4	1.2	0.4~5.8
5	1.5	0.8
6	1.8	0.4~6.6
7	1.9	3.9
8	2.2	1.6~4.9
9	3.5	1.6~4.0

実験時の水深 h は 40 cm とし、白金線の鉛直方向位置すなわち測定点 z_p は、静水面下 5 cm とした。実験ケース数は、円柱の場合が 70 ケース、角柱の場合が 30 ケースであり、用いた波の周期 T と波高 H の範囲については、それぞれ表-1 および表-2 に示す。

フィルムデーターの解析には、8 mm 映写機を用いてスクリーンボックスに断続的に映した像を、トレーサー紙に描き取る方法を用いたが、

写真-1 に示した角柱による渦の一例からもわかるように、一般に渦領域の判定は必ずしも容易でなく、また渦そのものも円形とは限らない。したがって、

* 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 滋賀県彦根土木事務所河川砂防課

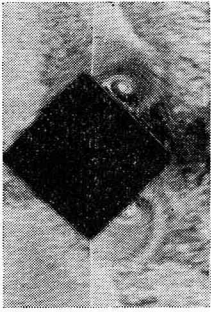


写真-1 角柱による後流渦

ここでは、渦のスケールを表わす代表量として、渦の長径および短径を平均した値を渦の直径 d と見なしたが、この値はある程度の幅を有するものであることは言うまでもない。

3. 実験結果および考察

(1) 円柱および正四角柱による渦の位相変化

図-2 および 図-3 に、それぞれ円柱および角柱背後に発生する左右一対の後流渦の位相変化を示す。位相 t/T は、0 および 0.5 が、水面が静水位を切る時であり、0.25 が峯の時刻である。図中の $[K.C.]_m$ および Re_m は、最大水粒子速度を用いた K.C. 数および Reynolds 数の値である。

図-2 よりわかるように、一般に円柱による渦の直径

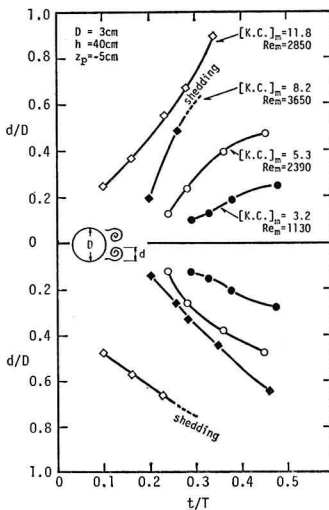


図-2 渦の直径の位相変化 (円柱)

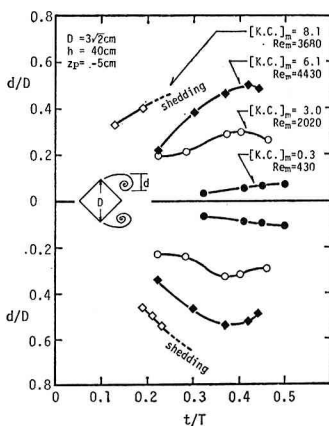


図-3 渦の直径の位相変化 (角柱)

d は、半周期の間で増大し続けると言えるが、 $[K.C.]_m = 8.2$ および 11.8 の場合の渦対は、一方の渦は $t/T = 0.25$ 付近で流下し、他方の渦はさらに成長する。流下した方の渦の直径は一層判読し難くなるため、図には示していないが、一般に流下直前よりも小さくなる傾向があると思われる。また、K.C. 数が大きい渦ほど、早くから成長し始めることがわかる。

図-3 の角柱による渦の直径は、 $[K.C.]_m$ が 0.3 と小さい場合には半周期の間で増大し続けるが、 $[K.C.]_m = 3.0$ および 6.1 の場合には、 $t/T = 0.4$ 付近で最大直径を呈し、以後若干減少する。これは渦が流下し始めることにより、その成長が停止するためと考えられる。

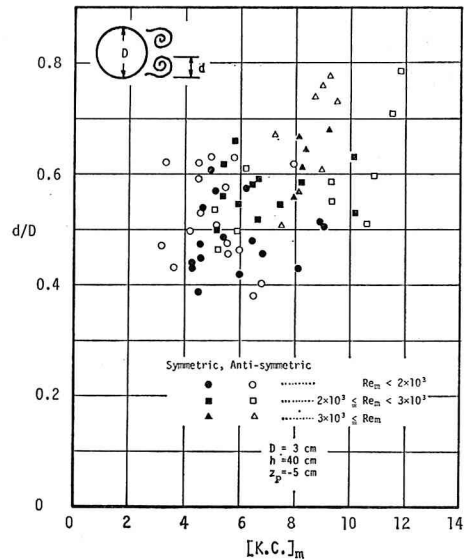


図-4 K.C. 数による渦の直径の変化 (円柱)

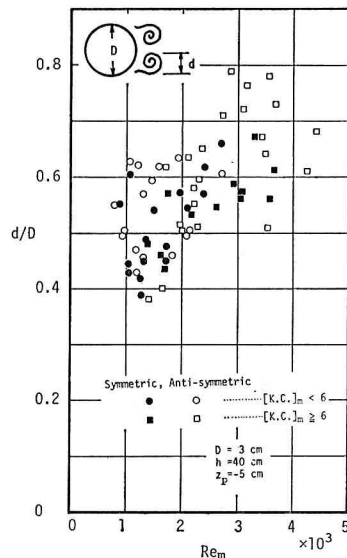


図-5 Reynolds 数による渦の直径の変化 (円柱)

(2) 円柱および正四角柱による渦の最大直径

円柱による渦の半周期の間における最大直径 d と、K.C. 数および Reynolds 数との関係を、それぞれ 図-4 および 図-5 に示す。図-4 より、渦の最大直径 d は、 $[K.C.]_m$ の増加に伴い、増大すること、特に、 $[K.C.]_m \div 12$ では、 d/D が 0.8 程度の大きな値になることがわかる。また、図-5 より、 $Re_m < 3000$ の領域では、 Re_m の増加に伴い、同様に渦の直径が増大することがわかる。

一方、角柱による渦の最大直径と K.C. 数および Reynolds 数との関係を、それぞれ 図-6 および 図-7 に示す。角柱の場合には、 $[K.C.]_m$ が 1 以下においても渦が発生し、 $[K.C.]_m$ が 4 程度までは、渦の直径は急激に増大する。特に、 $[K.C.]_m \div 4$ では、 $d/D=1.4$ も

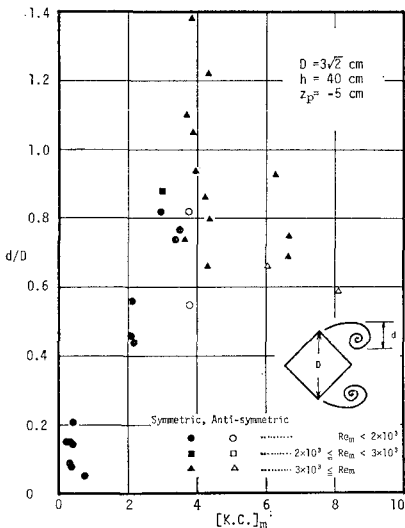


図-6 K.C. 数による渦の直径の変化 (角柱)

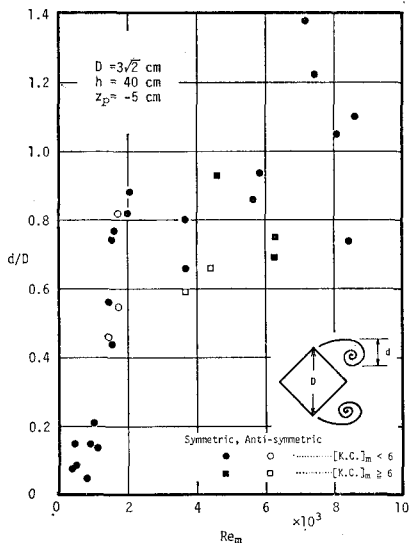


図-7 Reynolds 数による渦の直径の変化 (角柱)

の大きな値となる。これは、角柱側壁により主流が側方へ押し広げられるため、円柱の場合よりも一層大きな後流領域が形成されることを示している。ところが、 $[K.C.]_m > 4$ では、むしろ d/D は減少する。これは、渦が流下するために、その成長が防げられることに起因すると考えられる。

図-7 より、 d/D は、概して、 Re_m の増加と共に増大する傾向が見られるが、特に、 Re_m が 2000 までは、 d/D は急激に増大する。しかし、 Re_m が 2000 以上の領域では、 d/D の値は大きく分散しており、これは K.C. 数の影響が強く混入しているためと考えられる。

(3) 円柱による渦の流下距離

円柱による渦の最大流下距離 L と K.C. 数および Reynolds 数との関係を、それぞれ 図-8 および 図-9 に示す。ただし、ここに用いた L は、図中に示すように、円柱中心と渦中心との間隔である。

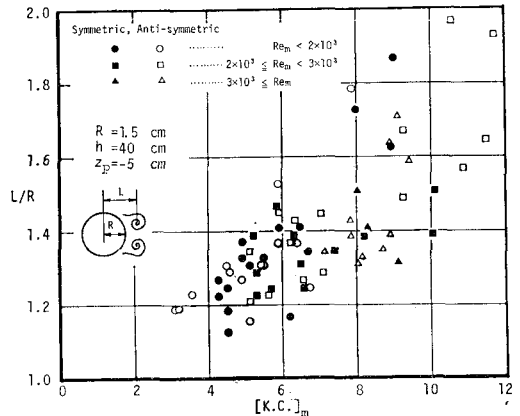


図-8 K.C. 数による渦の流下距離の変化 (円柱)

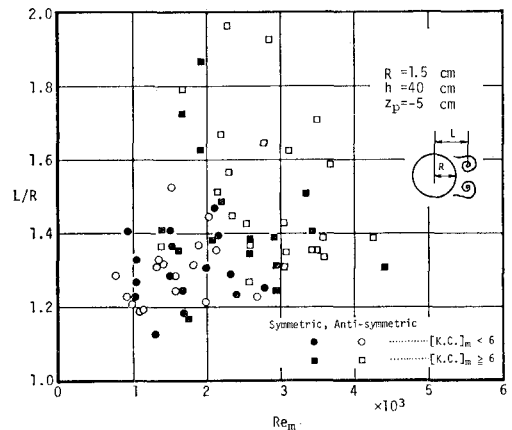


図-9 Reynolds 数による渦の流下距離の変化 (円柱)

図-8 より、 L と円柱の半径 R との比 L/R は、 $[K.C.]_m$ の増加に伴い、増大することがわかる。しかし、図-9 では、 L/R の値の分散が著しく、 Re_m との関係は、明確でないと言える。

4. 結 語

本研究は、柱体背後の後流渦の特性を考究するための一段階として、円柱および正四角柱による渦のスケールを検討したものであり、得られた結果を要約すると次のようである。

(1) 円柱による後流渦は、 $[K.C.]_m$ が 12 以下では、半周期の間で成長し続け、流れが反転する直前に最も直径が大きくなる。角柱の場合には、 $K.C.$ 数が小さい場合には、円柱と同様であるが、 $K.C.$ 数が大きくなると、半周期の間の途中の位相で最大直径を示す。

(2) 円柱の場合の渦の最大直径の値は、 $K.C.$ 数の増加に伴い増大する傾向があり、 $[K.C.]_m=10\sim12$ 程度で、円柱直径の 0.8 倍程度となる。さらに Reynolds 数の増加に伴い、同様に増大する傾向がある。渦中心の流下距離は、 $K.C.$ 数の増加に伴い増大するが、Reynolds 数による変化特性は、分散の程度の著しく、必ずしも明確ではない。

(3) 角柱の場合には、 $[K.C.]_m$ が 1 以下においても渦が発生し、 $[K.C.]_m=4$ において、渦の直径は角柱の

対角線長の 1.4 倍にもなる。しかし、それ以上 $K.C.$ 数が増加すると、逆に渦の直径は減少する傾向が生じる。Reynolds 数による変化特性としては、 Re_m が 10^4 以下の領域では、渦の直径は、Reynolds 数の増加に伴って増大する傾向が見られる。

最後に、本実験を行うに際し、終始協力して頂いた学部学生の広瀬登喜夫君(現在石川県庁)、鏡田昌孝君(現在東洋建設)および大谷省三君(現在神戸市)に厚く感謝すると共に、この研究は、文部省科学研究費によるものであることを付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Bidde, D. D.: Laboratory study of lift forces on circular piles, Proc. ASCE, Vol. 97, No. WW4, pp. 595~614, 1971.
- 2) 岩垣雄一・石田 啓: 小口径円柱まわりの波圧分布と後流渦について, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 531~537, 1975.
- 3) 岩垣雄一・楳木 亨: 海岸工学, 共立出版, 463 p., 1979.
- 4) Nishioka, M. and H. Sato: Measurements of velocity distributions in the wake of a circular cylinder at low Reynolds numbers, Jour. Fluid Mech., Vol. 65, pp. 97~112, 1974.