

円柱に作用する波力の実験的再検討

野 田 英 明*・松 見 吉 晴**

1. 結 言

直円柱に作用する波力に関する研究は Morison ら以来今日まで数多くの研究が行われてきた。しかし、波動現象の複雑さや波力に関係する要素が多いため、Morison 公式中に含まれる抗力係数および慣性係数の算定結果には大きなばらつきが見られ、未だ一番単純な円柱に対してさえた確かな値が与えられているとはいえない。本研究では Morison 公式中に含まれる抗力係数および慣性係数を算定する際、従来の研究に対して、

- (1) 実験装置（波力測定装置の問題）
- (2) 実験方法（碎波および部分重複波の問題）
- (3) 実験資料の解析（波力モーメントの測定値に含まれる誤差の問題）

などの各点を再検討しできるだけばらつきの原因を排除して両係数を算定する試みを行った。さらに、円柱後流域に発生・発達する渦が円柱に作用する抗力と慣性力にどのような影響をもたらすかを明らかにする試みとして、円柱まわりの流況を可視化し、渦の発生・発達の過程を実験的に検討した。本論文は以上2点について検討した結果を報告するものである。

2. 実験装置および実験方法

実験は長さ 25 m、幅 0.6 m、高さ 1.0 m の片面一部ガラス張りの二次元波動水槽を用いて行なった。水槽の一端にはフラッター式造波機を、また他端には消波装置として勾配 1/10 の斜面を設けた。上述した (1) の問題すなわち、従来からよく使用されている上端固定片持梁式の波力測定装置では波動による振動現象を忠実に表わ

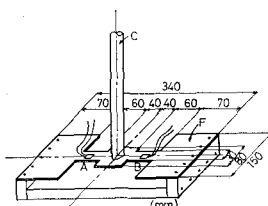


図-1 波力測定装置

しているか疑問であり、著者らは図-1に示すような波動による振動現象をより忠実に再現する下端固定片持梁式の波力測定装置を考案し使用した。この装置の構造は鉛直な円柱Cが同図に示す水平板Fと下端で固定され、さらに、水平板Fが測定台に両端で固定されているものである。水平板Fには二つのひずみゲージ(A, B)を接着し、実験にあたってはA, Bの中心を通る直線が波の進行方向に一致するように、この装置を水槽内に設置した。実験に使用した円柱は長さ55 cm、直径4.0 cm および6.0 cm の2種類であり、水深35 cmにおける波力測定装置の固有振動数はそれぞれ7~8 Hzであった。なお円柱はアクリル樹脂製であり、水平板は塩化ビニール樹脂製である。一方、円柱まわりの流況は円柱中心鉛直上静水面から70 cmの位置に設置した16 mm シネカメラを用いて撮影した。円柱まわりの流況を可視化するためにアルミニウムおよび塩化ビニール樹脂の粉末を混合して散布した。実験条件は周期 $T=0.86\sim 2.0$ sec、波高 $H=4\sim 16$ cmとし、実験は周期を一定に保って波高を段階的に増加して行なった。なお水深はすべての実験において35 cmと一定にした。

3. 実験資料の処理方法および両係数の算定法

実測された波力モーメントを用いて抗力係数 C_D および慣性係数 C_M を算定しようとする場合、従来から色々な算定法が用いられてきた。本研究では C_D および C_M の値が時間的にも水深方向にも変化しないと仮定し、波動理論として微小振幅波理論を適用して、全波力から位相差を利用して抗力と慣性力を分離し、 C_D および C_M の値を算定することにした。しかし、従来の研究においてこうした算定法の結果にも大きなばらつきが見られることから、その算定法について問題点がないかどうか再検討する必要がある。そこで著者らはこうした算定法において二つの問題点を考えた。その一つは水平水粒子速度ならびに加速度に対して微小振幅の進行波理論を適用する場合、上述した(2)の碎波および部分重複波が問題となる。もう一つの問題は波力モーメントの測定値に含まれる誤差の問題である。前者については実験資料の内でのこの仮定に適合しないものは除外して C_D および C_M

* 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科

** 学会員 工修 大阪大学大学院 土木工学専攻

の値を算定する必要がある。そこで、(1) 反射波の影響をできるだけ小さくする。(2) 円柱前面での波のはいがりのあるものは避ける、という条件を設けて実験資料を選定し、 C_D および C_M の値を算定した。条件(1)は造波機の回転が定常に達してから反射波の影響が表われるまでの実験資料を用いることにした。条件(2)はつぎのようにして判定した。波の周期 T 、水深 h および円柱の直径 D を一定にして波高 H を順次大きくしていくとある波高 H_0 より大きい波で円柱前面での波のはいがりが見られるようになる。このはいがりの程度を写真撮影によって判定した。図-2 はその結果を示した

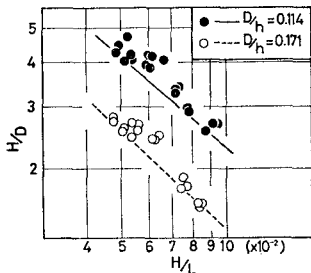


図-2 H/D と H/L との関係

ものであって H/D と H/L との関係を D/h をパラメータとして示したものである。その結果それぞれのパラメータ D/h の値に対して波のはいがりの限界が求められ、この限界線の上側領域が明らかにはいがりのあることを下側領域が顕著なはいがりが見られないことを意味する。したがって解析に使用する実験資料は限界線の下側領域となるものに限った。一方、後者はつぎのように考え実験資料の取捨選択を行ない波力モーメントの測定値に含まれる誤差をできるだけ少なくするように考慮した。いま Morison 公式に微小振幅波理論を適用すると、全波力 F は

$$F = F_{D \max} [\cos \omega t] \cdot \cos \omega t - F_{I \max} \sin \omega t \quad \cdots (1)$$

となる。ここに、 $F_{D \max}$ および $F_{I \max}$ は抗力および慣性力のそれぞれの最大値であり、

$$F_{D \max} = (1/2) \rho g C_D D U_{\max}^2 \quad \cdots (2)$$

$$F_{I \max} = (1/4) \pi \rho g C_M D^2 (\partial u / \partial t)_{\max} \quad \cdots (3)$$

となり、 $U_{\max}$ および $(\partial u / \partial t)_{\max}$ はそれぞれ水粒子の水平方向の最大速度および加速度である。そこで $\eta/h \ll 1$, $\eta/L \ll 1$ と仮定して $F_{D \max} = F_{I \max}$ とおけば式(2)および(3)より

$$\frac{H}{D} = \frac{C_M}{C_D (h/L)} \left[\frac{\sinh^2 2\pi h/L}{1 + \{(\sinh 4\pi h/L) / (4\pi h/L)\}} \right] \quad \cdots (4)$$

となる。なお岩垣¹⁾は式(4)に C_D および C_M の特定の値を代入して H/D と h/L との関係より抗力および慣性力が卓越する領域を示している。

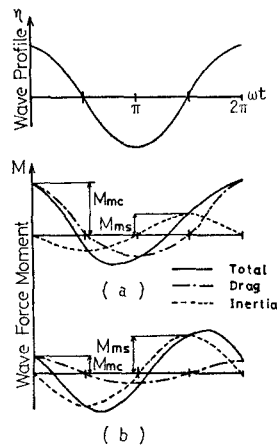


図-3 波力モーメントの時間的変化

図-3 は波形と波力モーメントの時間的変化を模式的に波の一周期にわたって示したものである。同図(a)および(b)はそれぞれ抗力および慣性力が卓越する場合を示している。同図(a)において M_{mc} および M_{ms} を測定した場合、測定の誤差が同程度であっても M_{ms} に対する相対誤差が大きくなることが予想され、その結果これから算出される C_M の値には

M_{ms} の測定誤差が大きく影響すると考えられる。一方、同図(b)の場合には M_{mc} すなわち C_D の値に対して同じことがいえる。ところが C_D および C_M の真の値がわからない以上、式(4)を利用して抗力が卓越するか慣性力が卓越するかを決定することはできない。そこで著者らはつぎの方法によって卓越領域を定め、 C_D および C_M の最確値を決定することにした。その手順はつぎのようである。すなわち、(1) 波力モーメントの測定結果から M_{mc} および M_{ms} の値を求め一応 C_D および C_M の値を算定する。(2) この C_D および C_M の値は不確実なものであるが、算定されたこれらの値ならびに与えられた水深 h および波長 L を用いて式(4)の右辺を計算し、その値を C_T とする。つぎに与えられた波高 H および円柱の直径 D を用いて

$$X = \{(H/D) - C_T\} / C_T \quad \cdots (5)$$

の値を計算する。もし $X > 0.5$ であれば抗力が卓越するとし(1)で計算した C_D の値を妥当なものとして採択する。一方、 $X < -0.5$ であれば C_M の値は妥当なものとして採択する。それ以外は誤差が大きくなると考えて棄却する。

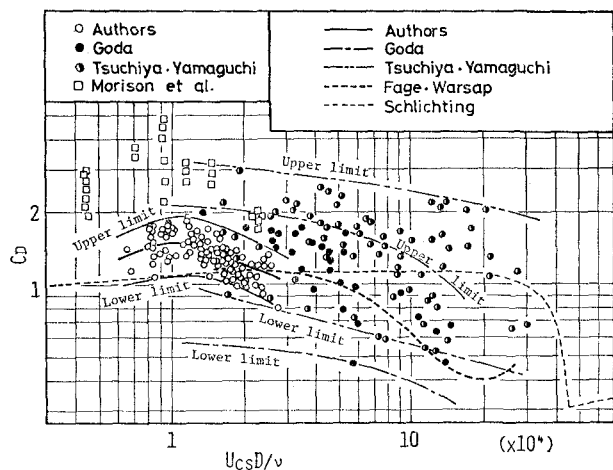
4. 実験結果および考察

(1) 渦の影響を考慮しない場合

a) 抗力係数

従来の研究より明らかなように C_D の値は Reynolds 数の関数であると考えられる。そこで波動運動のような非定常流の場合、Reynolds 数を算定するための代表流速として何を選ぶかが問題であるが、著者らは円柱中心位置に波の峯がきたときの静水面における水平水粒子速度を微小振幅波理論にもとづいて計算した値 U_{os} を代表流速として用いた。

図-4 は C_D と Reynolds 数の関係を示したものである。

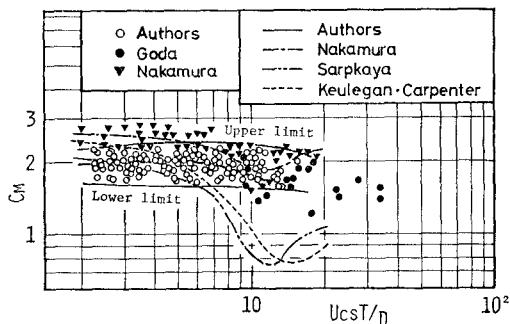
図-4 C_D と Reynolds 数の関係

る。この図には合田²⁾、土屋・山口³⁾および Morison ら⁴⁾の実験結果も示してある。なお合田の実験結果は上述した解析方法で著者らが再整理したものである。また図中にはそれぞれの実験結果に対して C_D の上限値および下限値を示しておいた。この図から明らかなように、著者らの実験結果において Reynolds 数の範囲は狭いが上述した方法によって C_D を算定するならば C_D の変動幅が合田、土屋・山口のそれと比べてかなり小さくなることわかる。このことから C_D の値を算定しようとする場合、上述した条件を課せればかなり明確に C_D と Reynolds 数の関係を求めうと期待できる。ただこの実験に用いた水槽では広範囲の Reynolds 数についてこれらの関係を検証することができなかった。また Morison らの結果³⁾は彼らが用いた波の特性から抗力が卓越すると考えられるが、同図から C_D の値は大きくばらついているが、この点については明確にできなかった。同図には以上のようにして求めた関係と定常流で求めた関係を比較するため、Schlichting⁵⁾および Fage-Warsap の C_D の値をも示した。Reynolds 数 1.4×10^4 以下で Schlichting の C_D の値は著者らのその下限値を表わしている。また Reynolds 数 $1.4 \times 10^4 \sim 2.5 \times 10^4$ で Fage-Warsap が求めた C_D の値と著者らのそれとの間には顕著な相違が認められずば妥当な結果を与えている。

b) 慣性係数

図-5 は C_M と Keulegan-Carpenter 数の関係を示したものである。この図には合田および中村⁶⁾の実験結果ならびに平均値曲線も示してある。同図から、平均値曲線は K-C 数が 7 付近まではほぼ 2.0 の一定値を示し、K-C 数が 7~14 付近の範囲では K-C 数の増加にともなって若干減少する傾向にある。しかし、著者らの実験結果は狭い範囲の K-C 数について検討したに過ぎない

ため合田の実験結果をも参考にしてさらに広い範囲について検討すると C_M は K-C 数の増加とともにさらに減少する傾向にあることがわかる。またこの図から明らかなように、中村が波動場において求めた C_M の値は著者らのそれより 0.1~0.6 程度大きい。中村の実験結果には円柱への波のはいがりの影響が含まれているためではないかと考えられる。さらに、Sarpkaya⁷⁾の振動流による実験結果および Keulegan-Carpenter⁸⁾の重複波による関係曲線も示した。なお Sarpkaya の実験結果は Reynolds 数が 1.5×10^4 以下に対するものである。両者の結果における特徴は Keulegan-Carpenter のそれは K-C 数が 12 付近で、Sarpkaya のそれは 14 付近で極小値をとることである。しかし、中村および

図-5 C_M と K-C 数の関係

著者らの結果ではこうした顕著な変化が見られないが、極小値が現われる K-C 数の値はほぼ一致している。極小値に相違が見られるのは波動場と振動流との相違である自由水面の有無によると考えられる。

(2) 渦の影響を考慮した場合

(1) で述べた C_D および C_M は渦の発生発達について全く考慮しないで算定してきた。そこでこれらの値に及ぼす渦の影響を検討するために著者らはつぎのように考えた。図-6 は渦の発生・発達・消滅の過程を示したものである。この図には時間経過を示すため水面の時間的变化および渦の位置、大きさをも示してある。渦の中心は円柱中心からの角度 θ と距離 R によって、渦の大きさはその半径 r によって示し、また波の進行方向と直角な断面を円柱の中心で二つの領域 A, B に分け、各領域で発生する渦を区別した。同図から波の 1 周期において渦の発生・発達・消滅の過程は 5 区間に分けられ、とくに区間 II および IV では渦が存在しないことがわかる。このことから (1) で述べた C_D および C_M と渦の存在しないこれらの区間でのそれらの値を比較検討する。

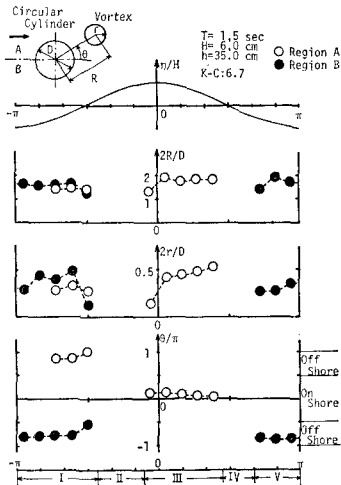


図-6 渦の発生・発達・消滅の過程

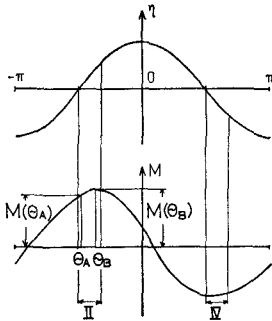


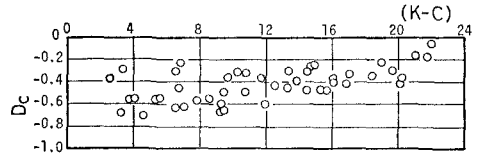
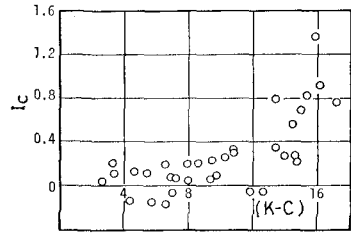
図-7 波力モーメントの時間的変化

図-7 は水面および波力モーメントの時間的変化を模式的に示したものであって区間 II および IV で渦が発生していないと考える。いまこの区間での抗力係数および慣性係数を (1) のそれらと区別するためそれぞれ C_D^* および C_M^* と表わす。さて区間 II における位相 $\omega t = \theta_A$ および θ_B における波力モーメントをそれぞれ $M(\theta_A)$ および $M(\theta_B)$ とすればこれらは実測値から求めることができる。一方、波力モーメントは抗力によるモーメント $M_D(\theta_A)$, $M_D(\theta_B)$ と慣性力によるモーメント $M_I(\theta_A)$, $M_I(\theta_B)$ とに分ければ、これらは Morison 公式を用いて計算することができる。したがって

$$\left. \begin{aligned} M(\theta_A) &= C_D^* M_D(\theta_A) + C_M^* M_I(\theta_A) \\ M(\theta_B) &= C_D^* M_D(\theta_B) + C_M^* M_I(\theta_B) \end{aligned} \right\} \dots\dots (6)$$

が得られる。この式から渦の影響を含まない場合の C_D^* および C_M^* の値が算定できる。なお円柱まわりの流況を撮影した結果から著者らの実験では $\theta_A = -5\pi/12$ および $\theta_B = -\pi/3$ とできることがわかった。

つぎに C_D および C_M と C_D^* および C_M^* とを比較するためつぎのパラメータを導入した。すなわち、 $D_0 = (C_D - C_D^*)/C_D^*$, $I_0 = (C_M - C_M^*)/C_M^*$ である。もし $C_D = C_D^*$

図-8 D_0 と K-C 数の関係図-9 I_0 と K-C 数の関係

あるいは $C_M = C_M^*$ であれば D_0 および I_0 はゼロになる。したがって D_0 および I_0 は渦の効果を示す一つの指標である。

図-8 は D_0 と K-C 数の関係を示すものであって実験における Reynolds 数の範囲は $4.6 \times 10^3 \sim 1.6 \times 10^4$ である。この図から明らかなように、若干のばらつきは見られるが K-C 数の増加とともに D_0 の値もやや増加する傾向にあり、 $C_D^* > C_D$ であることを示している。一方、図-9 は I_0 と K-C 数の関係を示すものである。この図から顕著な傾向は K-C 数の増加とともに I_0 の値が増大することである。とくに K-C 数が 10 以上ではばらつきが大きい I_0 の値が急激に増加している。すなわち、 C_M^* の値が K-C 数 12~14 付近から急激に減少することを意味しており、図-5 の Sarpkaya および Keulegan-Carpenter の実験結果における C_M の値が急激に減少を示す領域と一致しているのは興味深い。

5. 結 語

以上の結果を要約するとつぎのようである。

(1) C_D の値を算定する際、著者らが設けた条件のもとでは従来の研究における C_D と Reynolds 数の関係に比べてかなり明確にそれを見出せることがわかった。

(2) C_M の値は渦が発生・発達し始める K-C 数が 7 付近までほぼ 2.0 と一定値を示し、それより大きい K-C 数で減少する。

(3) 波の 1 周期にわたって渦の発生・発達・消滅の過程を明確にするとともに、渦の影響を含む C_D の値が渦の影響を含まない C_D^* の値よりも減少することおよび C_M の値が C_M^* の値よりも増大することがわかった。とくに C_M の値は K-C 数が 10 以上で顕著にそれを示した。

参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一：波浪に対する構造物の動的応答，1971 年度水工学に関する夏期研修会講義集，B コース。
 - 2) Goda, Y.: Wave Forces on Vertical Circular Cylinder; Experiments and a Proposed Method of Wave Force Computation, Rep. Port and Harbour Tech. Res. Inst., No. 8, pp. 1~74, 1964.
 - 3) 土屋義人・山口正隆：波による円柱の抗力係数および質量係数について，第 19 回海講論文集，pp. 379~383, 1972.
 - 4) Wiegel, R. L.: Oceanographical Engineering, Prentice-Hall, 532 p., 1964.
 - 5) Schlichting: Boundary-Layer Theory, McGraw-Hill, 789 p., 1968.
 - 6) 中村孝幸：海洋構造物に作用する波力特性とその振動応答に関する研究，大阪大学博士学位論文，1977.
 - 7) Sarpkaya, T.: In-line and Transverse Forces on Cylinders in Oscillatory Flow at High Reynolds Numbers, Offshore Tech. Conf., OTC. 2533, 1976.
 - 8) Keulegan, G. H. and Carpenter, L. H.: Forces on Cylinders and Plates in an Oscillating Fluid, Jour. Res. N.B.S., Vol. 60, No. 5, pp. 423~440, 1958.
-