

II-27 円柱に働く波力について

東京工業大学 工学部 正員 吉川 秀夫
 琉球大学 理工学部 正員 河野 二夫
 前田建設 〇 滝口 健一

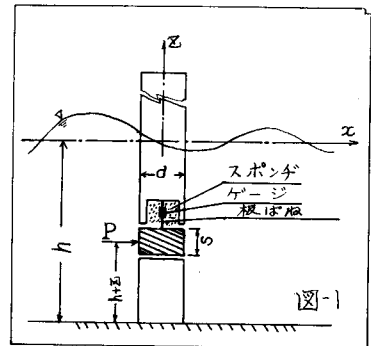
1. 概要

海中構造物に作用する波力に関する研究は、例えば *Ippen* の著書に見られるように、数多くなされている。しかしながら、充分に問題が解決しているとはいえない。たとえば、円柱に働く波力と考える場合は、一般に^{速度抵抗}加速度抵抗との和が全体の波力であるとして、質量係数や抗力係数と実験的に求めている。厳密には、この2つの抵抗は複雑に組み合わされていると考えられる。従って、基本的問題として、非定常流の中におかれた物体に作用する流体力と考える場合、質量力と抗力の単純な加え算で定義するのが妥当かと云ったことも考えられる。あるいは、これまでの研究では海面から水面までの円柱全体の波力に対し、平均的な質量係数や抗力係数と実験的に求めている。実際問題として、鉛直方向の波力の分布なども必要になるとと思われる。

本論文は、図-1に示すように、波動の中に置かれた直円柱の微小な長さ(s)の部分に作用する波力についての実験を行ない、かつ質量係数や抗力係数と算定する場合に、G. H. Kennelegan and L. H. Carpenter が重複波の中の円柱(水路底に平行)の質量係数、抗力係数と求める時に用いた手法、(流体力の Fourier 級数による表示)と応用したものである。また、静水中の直円柱と加速度運動(単振動)させ、その結果と波動による場合とと比較することによって、波動の中の円柱に作用する流体力の水面変動の影響やその他について実験的な考察を行なったものである。

2. 実験内容

実験に用いた造波水路は長さ約20m、水路巾40cm、高さ60cmの二次元水路で、flutter type の造波板が取り付けられている。実験に使用した円柱は直径(d)が6cmの塩化ビニール製品で、これと、図-1に示すように3箇に分割した。上部のものは水路上端で固定し、下端のものは水路底に固定した。真中の微小な長さ(s)の円柱と上部円柱の下端に薄青銅の板はねで固定し、この円柱の波力によるたわみと、strain gage によってビジグラに記録させるものである。



実験に使用した板はねの固有振動数(水中)は 43.3 rad/sec , 83.7 rad/sec の2種類であり、水路水深は30, 40cm だけについて行なった。なお、図-1で、 $s = 4\text{cm}$, $h + z = 20\text{cm}$ である。

3. 円柱に作用する波力の表示と質量係数および抗力係数

図-1に示した円柱の微小区間(s)に作用する波力と P とすれば、実用的には P は次式で示めせる。

$$P = C_M \cdot \rho \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot s \cdot \frac{\partial U}{\partial t} \pm C_D \cdot \rho \cdot d \cdot s \cdot \frac{U^2}{2} \quad (1)$$

式(1)で、 C_M , C_D は各々質量係数、抗力係数である。また ρ : 流体の密度、 U : 水粒子速度の水平方向の成分である。座標軸の原点で考えれば、 U と $\frac{\partial U}{\partial t}$ は式(2)になる。

$$\left. \begin{aligned} U &= -\frac{H\omega}{2} \frac{\cosh \frac{2\pi}{L}(h+Z)}{\sinh \frac{2\pi}{L}h} \sin \omega t \\ \frac{\partial U}{\partial t} &= -\frac{H\omega^2}{2} \frac{\cos \frac{2\pi}{L}(h+Z)}{\sinh \frac{2\pi}{L}h} \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)で、 H : 波高、 ω : 角速度、 L : 波長、 h : 水深、 t : 時間を示めす。

故に(2)式と(1)式に代入し、無次元表示で流体力と示めせば、

$$\frac{P}{P_0} = -C_H \cdot M_1 \cdot \cos \omega t \pm C_D \cdot M_2 \cdot \sin^2 \omega t \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{たゞし} \quad P_0 &= \frac{1}{8} \rho \cdot d \cdot S \cdot H^2 \cdot \omega^2 \\ M_1 &= \frac{\pi d}{H} \frac{\cosh \frac{2\pi}{L}(h+Z)}{\sinh \frac{2\pi}{L}h} \\ M_2 &= \left\{ \frac{\cosh \frac{2\pi}{L}(h+Z)}{\sinh \frac{2\pi}{L}h} \right\}^2 \end{aligned} \right\} \quad (3')$$

なお、式(2)の右辺の2項の正負は、 $\sin \omega t \geq 0$ に対応する。

式(3)に対し、Fourier 級数で表示すれば、式(4)になる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{P}{P_0} &= \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \sin n \omega t + B_n \cos n \omega t) \\ A_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{P}{P_0} \sin n \omega t \cdot d(\omega t) \\ B_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{P}{P_0} \cos n \omega t \cdot d(\omega t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(3)と式(4)の関係から、 C_H 、 C_D を求めるのであるが、詳細は参考文献(2)に説明されてあるので、本文では結果だけと示めすと式(5)になる。

$$\left. \begin{aligned} C_H &= -\frac{B_1}{M_1} - \frac{B_3}{M_1} \frac{\cos 3 \omega t}{\cos \omega t} - \frac{B_5}{M_1} \frac{\cos 5 \omega t}{\cos \omega t} - \dots \\ C_D &= -\frac{A'_1}{M_2} - \frac{A'_3}{M_2} \frac{\sin 3 \omega t}{\pm \sin^2 \omega t} - \frac{A'_5}{M_2} \frac{\sin 5 \omega t}{\pm \sin^2 \omega t} - \dots \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{たゞし、} \quad A'_1 &= \frac{A_1}{a_1}, \quad A'_3 = A_3 - \frac{a_3}{a_1} A_1, \quad A'_5 = A_5 - \frac{a_5}{a_1} A_1, \dots \\ a_1 &= \frac{8}{3\pi}, \quad a_3 = -\frac{8}{15\pi}, \quad a_5 = \frac{8}{105\pi}, \dots \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

A_1, B_1 ; A_2, B_2 ; $\dots$ などは式(4)で、 $n=1, 2, \dots$ などに対応する

また、レイノルズ数(Re)は動粘性係数と V とすると、

$$Re = \frac{dU}{\nu} = -\frac{dH\omega}{2\nu} \frac{\cosh \frac{2\pi}{L}(h+Z)}{\sinh \frac{2\pi}{L}h} \sin \omega t \quad (7)$$

4. 波による質量係数と抗力係数

式(3)で、 $\omega t = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3}{2}\pi, \dots$ などの時刻における波力と実験により測定すれば、 C_M, C_D の値が、逆算によって求められる。このようにして求めた値と示めたものが、図-2と図-3である。図-2の実験値の範囲は図-3の中に示めてある。

図によると、質量係数はすべての波に対し、ほぼ一定と考えて良い。しかもこの値は、potential flow として計算出来る C_M の値 ($C_M = 2.0$) に近い値である。

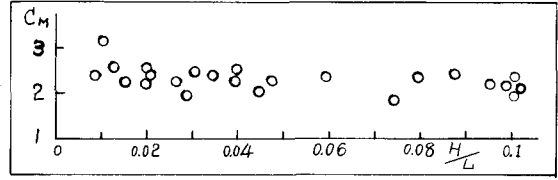


図-2: C_M と $\frac{H}{L}$ の関係{式(3)による}

つぎに C_D の測定値と示めたものが、図-3である。図の中には、California 大学で行なった室内および現場での実験値も比較して示めた。

図によると、波動による抗力係数は定常流の場合の値と相当に異なっている。

この原因がどこにあるのか簡単には理解出来ないが、円柱の周りの流れの状況と、波動の場合と定常流の場合と比較しながら観測

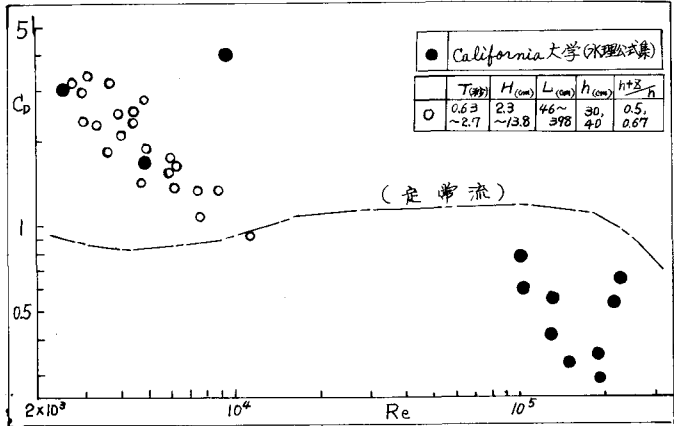


図-3: C_D とRe数の関係{式(3)による}

すると、非常に異なっている。定常流の場合は剥離点ほとんど固定しているが、波動の場合はこれが周期的に移動していることである。

故に Wake の状況も両者は非常に異なる。

このようなことが差異の大きい原因だと思われる。

つぎに、式(5)による値の1例と示めたものが、図-4と図-5である。

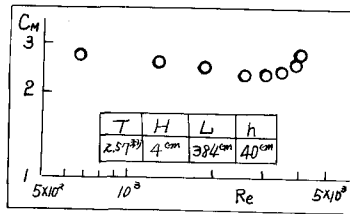


図-5: C_M とReの関係

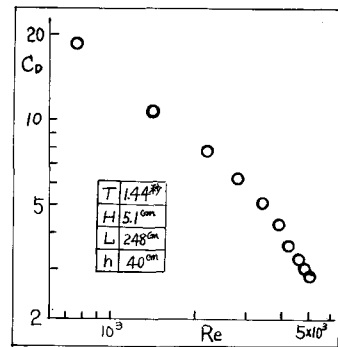


図-4: C_D とReの関係

図に示めた測定値は波の1周期について、式(4)で $d(\omega t)$ と $\Delta(\omega t) = 0.05\pi$ として、数値積分し、式(5)により、1周期の中の $\Delta(\omega t)$ 毎の C_D および C_M の値と、その時のRe数の値(式(7)による)との関係と示めたものである。これらの図と、図-2,3と比較すると大体一致する傾向にある。

5. 静止水中と加速度運動させた場合

図-6は、Carriage に固定された円柱を適当な深さまで水中に入れ、造波番の回転板に連絡した Carriage を單振動させることによって、円柱を静止水中で加速度運動させようとするものである。

図で(1)は Carriage; (2)(3)(4)は円柱を示す。円柱の構造は図-1と同じであるが、ここでは円柱(2)が Carriage (1)に充分に固定され、円柱(4)は円柱(2)に充分固定されている。

また、Carriage は造波水路一端にしかれた軌道と移動し、かつ、移動速度は移動距離の 0.5cm 間隔毎に測定出来るようになっている。この実験の目的は、主として波形勾配の影響や加速度の connection term の影響と調べるためのものである。

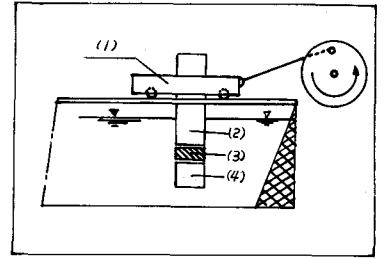


図-6. 説明図

実験結果を図-7、図-8に示す。図の中の測定値は式(5)の手法によるものである。なお、図の中の U_m の値は円柱の移動速度の最大値、 T は周期を示す。

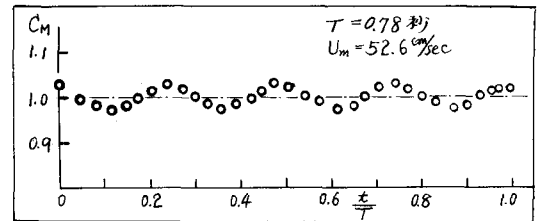


図-7. 単振動による円柱の C_D と $\frac{t}{T}$ の関係

図-7は単振動の1周期について、 C_D の値と示したものであり、振巾はそれほど大きくないが周期的に変動しており、平均的には Potential 理論によって計算出来る値 ($C_D=1.0$) に大体等しい。

図-8は単振動の1周期について、各時刻 ($\Delta \omega t = 0.05\pi$) 毎の C_D の値とその時の Re 数の関係と示したものである。図-8と波動による場合の図-4、或は図-3と比較すると傾向は大体一致する。以上のことから、 C_D の値に対する水面変動による影響はあまりないと考えられる。

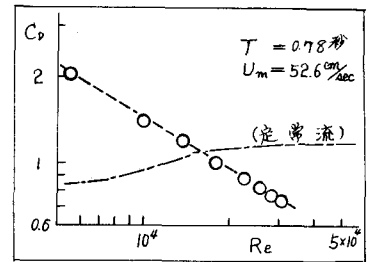


図-8. 単振動による円柱の C_D と Re の関係

6. 結論

以上、波動の中におかれた円柱の抵抗力について、主に質量係数、抗力係数の関係から、その特性と実験的に調べようとしたのであるが、実験資料も少ないことなどのため、十分な結論に至らなかった。しかし、本実験の結果の範囲内にけに限定するなら、質量係数は実用的には、Potential flow としての計算値で或る程度近似出来るようであり、また抗力係数は、波の特性(周期、波長、波高等)により、定常流の場合とは非常に異なった値になる。

この理由と主に水面変動の立場から考察したが、その影響はあまりみられず、むしろ円柱のまわりの流況と観察した結果により、定常流の場合と波動の場合の Wake の流体力学的相違に起因すると思われる。

— 参考文献 —

- 1) Ippen, A.T.; Estuary and Coastline Hydrodynamics; Mc Graw Hill Book Co New-York, 1966.
- 2) Gr. H. Keulegan and L. H. Carpenter; Forces on cylinders and plates in an oscillating Fluid: J. Res. National Bur standards, 60. 5 (May, 1958).