

I - 59 円柱に作用する波力について

京大工教養 正員 野田英明
建設省 正員 〇日野峻栄

1) まえがき 円柱の微小部分 Δz に作用する波力 ΔF は、

$$\Delta F = \left(\frac{1}{2} \rho C_D d |u| u + \rho C_M \frac{\pi d^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} \right) \Delta z \quad (1)$$

と表わされる。ここに、 ρ は水の密度、 d は円柱の直径、 u は水粒子の速度、 C_D は抵抗係数および C_M は仮想質量係数である。 C_M は、波の特性、水深あるいは円柱の直径などによって変化しないと考えられるが、 C_D は Reynolds 数によって変化するから、水深方向ならびに時間的にも変化するはずである。著者らは、これらの点を考慮した係数を提案し、実験によってその妥当性を検証し、浅海領域の波によって円柱がうける波力の算定に適確な指標を与えようと試みた。

2) 実験概要 実験は、長さ 24m、巾 0.5m および深さ 1.0m の両面ガラス張り水槽を用い、水深を 0.60m および 0.45m として行なった。実験装置の概略図は図-1 に示すように、直径 1.50, 2.02, 3.02 および 5.69 cm、長さ 80cm のアクリル製円柱を用い、その支柱の G_1 点と G_2 点にストレインゲージをはり、それらの点のモーメントを電磁オシログラフに自記させた。実験に用いた波の周期は 0.76 ~ 1.96 sec であり、波高は 1.20 ~ 6.50 cm であった。

3) 理論的ならびに実験的考察 浅海領域では水粒子の速度は、

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh m(h-z)}{\sinh mh} \sin \omega t, \quad u_0 = \frac{\pi H}{T} \quad (2)$$

である。ここに、 h は水深、 H は波高、 L は波長、 T は周期であり、 $\omega = 2\pi/L$ 、 $\omega = 2\pi/T$ である。円柱に作用する波力の合力 F は、円柱の F 部がほとんど水槽の底に達しているから、 $h_1 = h$ として、

$$F = \int_0^h dF = \frac{1}{2} \rho d \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 h \cdot K_{D1} |\sin \omega t| \sin \omega t + \rho \frac{\pi d^2}{4} \left(\frac{\pi H}{T} \right) \frac{2\pi}{T} h \cdot K_{M1} \cos \omega t \quad (3)$$

となる。ここに、

$$K_{D1} = \int_0^1 \frac{\cosh^2 mh (1 - \frac{z}{h})}{\sinh^2 mh} d\left(\frac{z}{h}\right), \quad K_{M1} = \int_0^1 C_M \frac{\cosh mh (1 - \frac{z}{h})}{\sinh mh} d\left(\frac{z}{h}\right) \quad (4)$$

である。ここで、抵抗係数 C_D は Reynolds 数の関数であり、時間的に変化するが、 C_D の値は二次元定常流の場合の円柱の抵抗係数に等しいと仮定して、たとえば $\omega t = \pi/2$ に対して数値積分を行なうと、 K_{D1} は図-2 の実線のようになる。合力 F を実験的に求める方法は、図-1 から明らかなように、 $F = (M_1 - M_2) / (l_1 - l_2)$ であるが、 $(l_1 - l_2)$ は G_1, G_2 点間の距離であるから、この二点のモーメントの差より求める

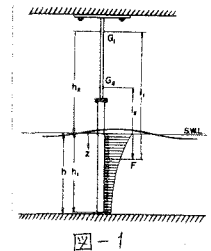


図-1

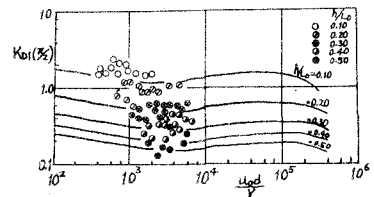


図-2

$K_{D1}(\pi/2)$ と $\frac{u_0 d}{\gamma}$ との関係

ことができる。したがって、 $K_{D1}(\%)$ の実験値を(3)式にもとづいて求めると図-2のようになる。この図から、実験値と理論曲線は、パラメーター h/L_0 による傾向はよく一致しているが、実験値の方がやや大きくでている。また、 K_M については、従来の研究により、 C_M の値は波の特性、水深あるいは円柱の直径などにより変化せず、 $C_M=2.0$ とされている。したがって C_M を一定と仮定すると、 $K_M=C_M \cdot \frac{1}{mh}$ となる。この C_M に対する考察はのちにのべる。つぎに、 G_1 点のまわりのモーメント M_1 は、(1)および(2)式より、

$$M_1 = \int_0^h (h_2 + z) dF = \frac{1}{2} \rho d \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 h^2 \cdot K_D |\sin \omega t| |\sin \omega t| + \rho \frac{\pi d^2}{4} \left(\frac{\pi H}{T} \right) \left(\frac{2\pi}{T} \right) h^2 \cdot K_M \cdot \cos \omega t \quad (5)$$

となる。ここに、

$$K_D = \int_0^1 \left(\frac{h_2}{h} + \frac{z}{h} \right) C_D \frac{\cosh^2 mh (1 - \frac{z}{h})}{\sinh^2 mh} d\left(\frac{z}{h}\right) = K_{D1}\left(\frac{h_2}{h}\right) + K_{D2} \quad (6)$$

$$K_{D2} = \int_0^1 \left(\frac{z}{h} \right) C_D \frac{\cosh^2 mh (1 - \frac{z}{h})}{\sinh^2 mh} d\left(\frac{z}{h}\right), \quad K_M = \int_0^1 \left(\frac{h_2}{h} + \frac{z}{h} \right) C_M \frac{\cosh mh (1 - \frac{z}{h})}{\sinh mh} d\left(\frac{z}{h}\right) \quad (7)$$

であり、 K_{D2} についても前と同様に、 C_D の値を二次元定常流れの場合の値を用いて数値積分を行ない、 $K_D(\%)$ の値を求めると、図-3の実線のようにになる。この図には、 G_1 点のモーメントの実験結果も示しているが、 K_{D1} の場合と同様に実験値の方がやや大きい値を示している。この原因として考えられることは、実験室で造波した波の水粒子の速度が、浅海波の速度(2)式とある程度相違があったこと、円柱のまわりの渦の影響とか、円柱が自由水面上に突出している

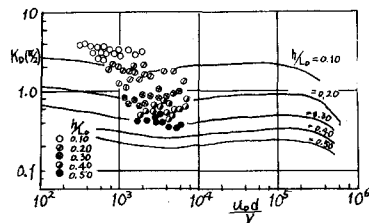


図-3

$K_D(\%)$ と $\frac{U_0 d}{\gamma}$ との関係

る場合の造波抵抗の影響などが考えられる。また、(7)式の K_M については、 K_M の場合と同様に $C_M=2.0$ とすると、 $K_M=2.0 \left\{ \left(\frac{1}{mh} \right) \left(\frac{h_2}{h} \right) + (\cosh mh - 1) \left(\frac{mh^2}{\sinh mh} \right) \right\}$ となり、たとえば $h=45\text{cm}$ の場合に、図-4の実線のようにになる。この図には K_M に対する実験値もプロットしたが、理論曲線とかなりよく一致している。

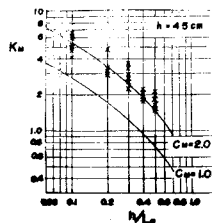


図-4

つぎに、実際に円柱構造物を設計する場合に問題となる最大モーメントについて、その最大モーメントの生じる位相およびその瞬間の最大モーメントを理論的に求め、実験値と比較検討した。図-5の実線(A)は C_D を時間的に一定と考えて最大モーメントの生じる位相 ωt と $M_1/M_{10}(\%)$ の関係を理論的に求めたものである。また、実線(B),(C),(D)は C_D を ωt の関数と考えた場合で、 $\frac{U_0 d}{\gamma}$ の範囲により各曲線にわけられる。この図には実験値もプロットしたが、理論曲線とかなりよい一致を示している。図-6の線(A),(B)は上で求めた位相における最大モーメントと M_H との比 $M_{1, \max}/M_H$ と

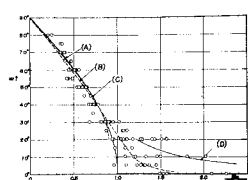


図-5

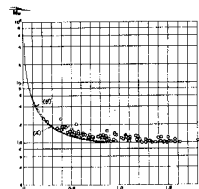


図-6

$M_H/2M_0(\%)$ との関係を理論的に求めたものであり、同時に実験値もプロットした。以上の結果を用いれば、円柱に作用する波力とくに最大モーメントを求めることができる。