

東京大学 学生員 磯部雅彦
東京大学 正員 堀川清司

1. はじめに

柱状構造物に作用する波力を計算するには Morison 式が広く用いられているが、式中の C_D , C_M は実験的に決める必要があり、このために円柱を使った多くの実験が行われている。たとえば、合田 (1964)¹⁾ は比較的大きな波高 ($H=0.1 \sim 0.4$) で水粒子速度の測定も含めた実験を行い、実験された水粒子速度を使って求めた C_D を Re 数によって整理すると定常流の場合に近い値になることを示した。また、Jen (1967)²⁾ は比較的小さな波高 ($H < 0.2$) で、Burton ら (1970)³⁾ は円柱表面の粗度を変化させて実験を行っており、さらにこれらの実験に新たな実験を加えたものをもとめて、土屋・ムロ (1972)⁴⁾ が整理している。これを見ると、 C_D , C_M にもある傾向を示しはげらかなりばらつきが大きい。一方、一様振動流による円柱の C_D , C_M については、Keulegan・Carpenter (1958)⁵⁾, Sarpkaya (1975)⁶⁾ の実験があり、 C_D , C_M ともに K_C 数によって非常によく整理され、両者の結果もよく一致している。そこで、本研究では一様振動流の結果を考慮しつつ、規則波に対する円柱の C_D , C_M を、参考文献 1) 2) 3) 4) の実験に加えて新たに実験を行ない、新たに提案したパラメータによって整理した。

2. パラメータ R_{Dz} の定義

円柱に働く波力を Morison 式によって表わし、これを微小振幅波理論によって水深方向に足まで積分すると、

$$F = C_D (\pi w D H^2 n / 8) \cos \omega t |\cos \omega t| - C_M (\pi w D^3 H \tanh kh / 8) \sin \omega t \\ = F_{Dmax} (R_{Dz} C_D / C_M \cos \omega t |\cos \omega t| - \sin \omega t)$$

$$\text{ここに } F_{Dmax} = C_M (\pi w D^3 H \tanh kh / 8), R_{Dz} = H n / \pi D \tanh kh, n = (1 + 2kh / \sinh 2kh) / 2$$

となる。ところで Keulegan ら⁵⁾ や Sarpkaya⁶⁾ の研究では、実験結果が K_C 数によってよく整理されているが、この場合、条件が一様振動流であるために、 K_C 数 ($= U_m T / D$) は半周期に発生する渦の個数と密接な関係を持つと同時に、 $F_{Dmax} / F_{Mmax} = (C_D / C_M) \cdot K_C / \pi^2$ となって抗力と質量力の比を表わすパラメータであるとも言える。したがって、波の場合に K_C 数をそのままの形で使っても、一様振動流のときに持っていた物理的意味を失うことになるので、それよりも抗力と質量力の比を代表するものとして、新たに $R_{Dz} = (F_{Dmax} / F_{Mmax}) (C_M / C_D)$ を定義する。こうすると一様振動流においては $R_{Dz} = K_C / \pi^2$ となり、また波の K_C 数を $\sqrt{H}$ を使って定義すると $K_C = (\pi H / D) \sqrt{H / kh} \tanh kh$ となり、 R_{Dz} になりに近いパラメータとなる。

3. データ整理の方法および結果

データ整理は、 H/L , D/L , Re , H/D , K_C , R_{Dz} などによって行なった。その結果、後の3つによると、 C_M が右下がり、 C_D のばらつきが右へいくほど小さくなるという傾向が見られたものの、あまりよく整理されなかった。データ処理の過程で微小振幅波理論を使って水粒子速度を計算しても誤差が小さいものだけを選択して整理することを考えた。すなわち、土屋・ムロ (1974)⁷⁾ が水粒子速度を測定した結果によれば、 $kh > 0.5$, $kh < 0.1$ の程度であれば微小振幅波理論からのずれは小さい。また、合田¹⁾, 勝井⁸⁾, および著者らのデータについては、水面変動をフーリエ解析した結果があるので、第2項と第1項の比が0.1以下のものを選んだ。なお、水粒子速度と波力の測定結果から C_D , C_M を求める方法としては、 u または $\dot{u}$ が0となる位相での波力を使うものと、フーリエ解析によるものとがあり、1) 2) は前者、3) 4) は後者によるものであるが、著者らのデータを2通りの方法で解析したところ、 C_M については平均3%、最大でも6.5%の差があるだけであつたので、解析法による結果の違いは考慮しなくてもよいと考えられる。以上により、選択したデータについて、 C_D , C_M を整理すると、 R_{Dz} によるものが相対的にはまとまりが見られたので、Sarpkaya⁶⁾ の一様振動流について得た曲線を $R_{Dz} = K_C / \pi^2$ とい

う関係によって書きかえた曲線も含めて、図1、図2に示した。ここで実験条件としては、 $D/L < 0.1$ 、 $Re < 5 \times 10^4$ であり、散乱波理論からは $G_H = 2.0 \sim 2.06$ と実験値のばらつきから見ればほぼ一定と見られる領域で、定常流の C_D は1前後である。まず図1を見ると、 Re が小さいところで C_D が大きくばらついていることがわかる。実際、Morison式を使ったとき、水面変動の測定位置が円柱からずれていたり、質量力の項の位相が実際には加速度の位相からずれていたりして、 $\zeta = \frac{H}{2} \cos \omega t$ に対して、 $F_H = -F_{Hmax} \sin(\omega t + \epsilon)$ と表わされるとすれば、 $\epsilon \ll 1$ で $F = F_{Hmax} (Re C_D / G_H \cos \omega t [\cos \omega t] - \epsilon \cos \omega t - \sin \omega t)$ となり、 Re が小さければ ϵ の影響によって見かけ上の C_D を負の値という不自然な値にしてしまう可能性が十分にある。したがって C_D を整理するには Re が小さいところは除いて Re 数などで整理する必要があるが、今のところ残るデータから特定の傾向は見い出せない。次に図2を見ると、水流方向に G_H が一定であるとしたために値が平均化されていることも考慮すれば、一様振動流の結果に近いと言える。これはすべてのデータを使った場合にも見られれば、その時にはばらつきがより大きくなる。さらに著者らの実験データをフーリエ解析した結果、Morison式では、 $F = F_{Hmax} [Re C_D / G_H \sum_{m=0}^{\infty} \{8(-1)^m / \pi(2m+1)(2m+3)\} \cos(2m+1)\omega t - \sin \omega t]$ となるのに、 $\cos$ の偶数項は奇数項に比べて小さいということはなく、また奇数項の係数の関係も理論値に一致しなかった。

4. 結論および今後の課題

フーリエ解析の結果から見て、Morison式は波力の時間的変化まで厳密に表わすものとは考えるべきではない。

G_H は一様振動流に似た傾向を示し、 C_D は抗力が相対的に小さいためにばらつく。そこで今後Morison式を使って波力を表現するためには、問題を ζ から u 、 $\dot{u}$ 、 u 、 $\dot{u}$ から F という2段階に分け、まず水粒子速度を計算するための波の理論の適用範囲をばらつきさせるとともに、水粒子速度の測定も含めた部分波力による実験を行ない、一様振動流の場合に得られている結果とも合わせて、合理的な C_D 、 G_H を決める必要がある。

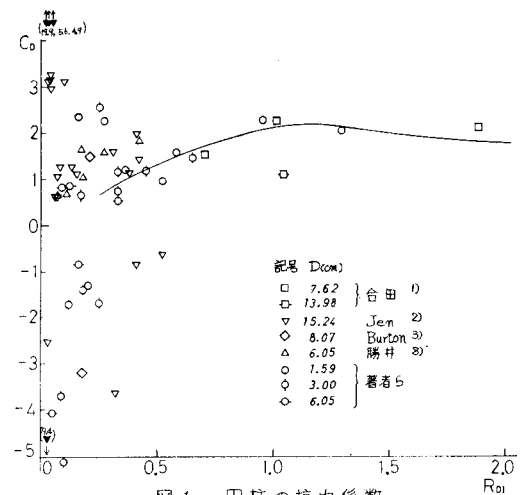


図1 円柱の抗力係数

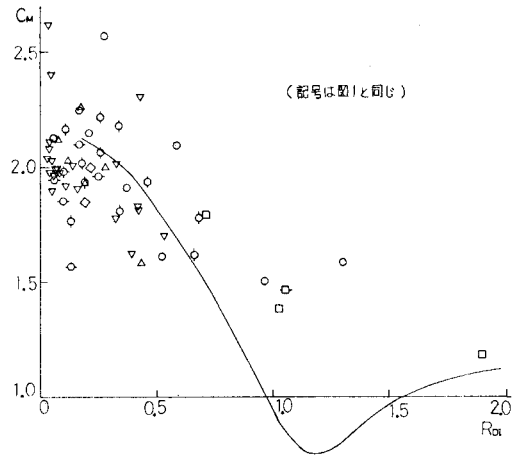


図2 円柱の質量係数

- 1) 田代: Report of Port and Harbour Tech. Res. Inst., No. 8. (1964)
- 2) Jen: Univ. of California, Berkeley, Hydraulic Eng. Laboratory, Technical Report, HEL 9-11. (1967)
- 3) Burton et al.: Texas A & M Univ., COE Report, No. 121. (1970)
- 4) 土屋・山口: 第19回 海岸工学講演会論文集, pp. 379 ~ 383. (1972)
- 5) Keulegan et al.: J. of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 60, No. 5, pp. 423 ~ 440. (1958)
- 6) Sarphaya: J. Applied Mechanics, Vol. 42, Series E, No. 1, pp. 32 ~ 37. (1975)
- 7) 土屋・山口: 第18回 海岸工学講演会論文集, pp. 97 ~ 104. (1971)
- 8) 勝井: 東京大学大学院土木工学専門課程修士論文. (1973)