

II-25 複数円柱に作用する波力に関する実験

東京大学工学部 正員 堀川 清司
 東京大学大学院 学生員 勝井 秀博

1. はじめに

海中に置かれた構造物に作用する波力は、Morison らの実用式を用いてある程度まで算定する事ができる。しかし、多くの物体が接近して存在する場合、個々に作用する波力は互いに他の干渉を受けて、単独に置かれた物体の場合とは異ってくる筈である。このような波力の相互干渉に関する研究は比較的新しく、実験的研究としては、Morison (1954年)が実験室で、Ross (1959年)が現地 scale でそれぞれ3本の円柱を対象にして行なった研究が目にとまる程度である。一方 Laird ら (1959~1966年)は2~24本の円柱を種々の配列に並べ、これを静水中で振動させた実験結果を報告しているが、波力との対応が明らかでない。理論的研究としては、非粘性・微小振幅波の仮定を用いた Chappellear の研究 (1959年)、静水中で振動する円柱によって発生する渦を考慮した Laird (1961年)の研究等があるが、いずれも実用には供し難い。これに対して大槻 (1972年)は *diffraction theory* を発展させて、微小振幅波の場合、複数円柱の任意配列に対する波力の厳密式と近似式を展開し、あわせて検証実験を行なった。

以上述べたように、この問題に関する研究はいまだ十分とは言えず、更に多くの実験データの蓄積と実用式の完成が必要とされる。本研究は、円柱に働く全波力を実験的に求めて、抗力係数及び質量係数を算出し、円柱相互の近接効果を調べたものである。

2. 実験装置及び実験方法

実験は二次元造波水路(長さ約23 m、幅0.8 m、高さ1.0 m)の中央に、図-1に示すような波力計と波高計を設置して行なった。波力計は上端を固定した鋼製板ばね(幅30 mm、長さ250 mm、厚さ6 mm)の先にアクリル製の円柱(外径30 mm、長さ850 mm)をねじで取り付けたもので、板ばねの表裏に合計4枚の *strain gage* を貼り、波による水平力を電磁オシログラフに記録させる事ができる。使用した波力計は3本で、滑車と分銅を使って得られた静的キャリブレーションカーブの直線性は良好であり、水中での固有振動数は3本共に4.8 Hzであった。

実験は1~3本の円柱を種々の配列に置き、その中心間の間隔 S を漸次変化させて行なった。なお、水深は60.0 cm、円柱の直径は3.0 cmと一定にし、波高2.0, 4.0, 6.0 cm、周期1.0秒 (*flap* 式造波)、1.5, 2.0秒 (*piston* 式造波)の9種類の波を作用させた。

3. 解析法

3-1. 抗力係数、質量係数の計算法

図-2に示すような

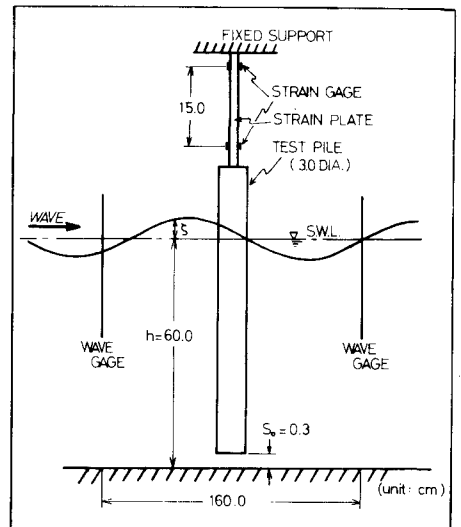


図-1 実験装置

円柱全体に働く各位相θでの波力F(θ)は、Morisonらの表示法に従うと

$$(1) \quad F(\theta) = C_D \rho D \int_{s_0}^{h+s} \frac{u|u|}{2} ds + C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} \int_{s_0}^{h+s} \dot{u} ds$$

ここで、 C_D : 抗力係数, C_M : 質量係数, h : 水深, s : 水面の高まり, s_0 : 水底からの鉛直座標, s_0 : 水底と円柱底面との間隔, D : 円柱の直径, ρ : 流体の密度, u : 水粒子水平速度, \dot{u} : 水粒子水平加速度である。
Stokes 第3次波理論によれば、

$$(2) \quad \zeta = a \left\{ \cos \theta + \left(\frac{ak}{2}\right)^2 \cos 2\theta + \left(\frac{ak}{2}\right)^3 \cos 3\theta \right\}$$

$$(3) \quad u = \frac{\sigma}{R} (F_1 \cosh ks \cos \theta + F_2 \cosh 2ks \cos 2\theta + F_3 \cosh 3ks \cos 3\theta)$$

$$(4) \quad \dot{u} = \frac{DU}{Dt} = \frac{\sigma^2}{R} \left[F_1 \cosh ks \sin \theta + 2F_2 \cosh 2ks \sin 2\theta + 3F_3 \cosh 3ks \sin 3\theta \right.$$

$$- (F_1 \cosh ks \cos \theta + F_2 \cosh 2ks \cos 2\theta + F_3 \cosh 3ks \cos 3\theta)$$

$$\times (F_1 \cosh ks \sin \theta + 2F_2 \cosh 2ks \sin 2\theta + 3F_3 \cosh 3ks \sin 3\theta)$$

$$+ (F_1 \sinh ks \sin \theta + F_2 \sinh 2ks \sin 2\theta + F_3 \sinh 3ks \sin 3\theta) (F_1 \sinh ks \cos \theta + F_2 \sinh 2ks \cos 2\theta + F_3 \sinh 3ks \cos 3\theta)$$

ただし、 $k = \frac{2\pi}{L}$, $\sigma = \frac{2\pi}{T}$, $\theta = kx - \sigma t$, L : 波長, T : 周期, H : 波高, x : 水平座標, t : 時間であり、 a は $\frac{H}{2}$ と k , f_3 の関数, f_2, f_3 は ak, kh の関数, F_1, F_2, F_3 は kh の関数である。

故に $\theta = n\pi$ (n : 整数) の時、 $\dot{u} = 0$ 、 $\theta = \frac{2n-1}{2}\pi$ の時、近似的に $u = 0$ が成立する。したがって C_D, C_M は式 (1)~(4) を使って次のように評価する事ができる。

$$(5) \quad C_D = F(\theta) / \left(\rho D \int_{s_0}^{h+s} \frac{u|u|}{2} ds \right) \quad (\theta = 0^\circ, 180^\circ)$$

$$(6) \quad C_M = F(\theta) / \left(\rho \frac{\pi D^2}{4} \int_{s_0}^{h+s} \dot{u} ds \right) \quad (\theta = 90^\circ, 270^\circ)$$

3-2. パラメータ 実験で得られた C_D の整理には円柱径を用いたレイノルズ数

$$(7) \quad Re = \frac{UD}{\nu}$$

を使用した。ただし、 ν : 動粘性係数, U : u の鉛直分布の自乗平均であり次のようにして表わされる。

$$(8) \quad U = \sqrt{\int_{s_0}^{h+s} u^2 ds / (h+s-s_0)}$$

また C_M の整理には、Keulegan & Carpenter によって提案された "period parameter" を用いた。これは微小振幅波において $u = U_{max} \cos \theta$ とおいた時、 $U_{max} T / D$ で定義されるものであるが、本文では $U_{max} = U$ とおいた。

4. 実験結果及び考察

4-1. 単柱の場合 $H = 2 \sim 6$ cm, $T = 1 \sim 2$ sec の範囲の9種の波に対して求められた C_D, C_M が図3、図4に示してある。 C_D はほぼ定常流の場合に近い値を示しているが、この Re 数の範囲における従来の実験値 (1.0~3.5) よりやや小さい。また、波の山 ($\theta = 0^\circ$) に

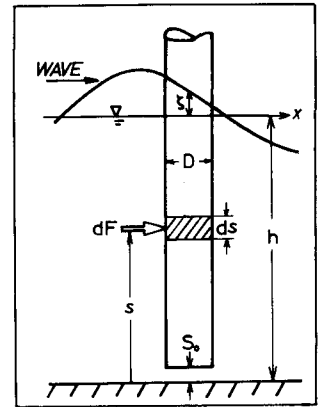


図-2

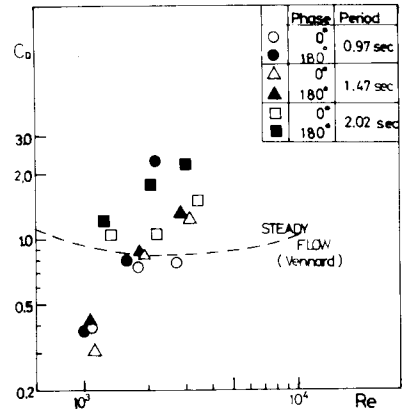


図-3 単柱に対する抗力係数とレイノルズ数の関係

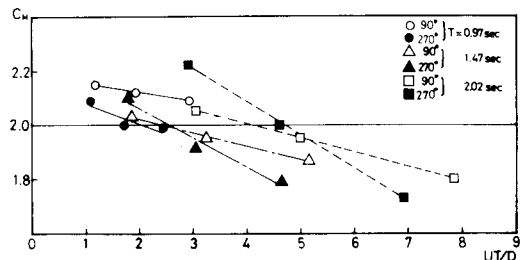


図-4 単柱に対する質量係数とperiod parameterの関係

おける C_D の方が、谷 ($\theta = 180^\circ$) におけるものより小さい値を示す事は、Morison の結果と逆である。図4において $\theta = 90^\circ$ の時の C_H には $U_c T/D$, $\theta = 270^\circ$ の時の C_H には $\bar{U} T/D$ を対応させてプロットした。(U_c は波の山における U , \bar{U} は波の谷における U を表わす。) 図によると、 $U T/D < 8$ の範囲では C_H と $U T/D$ はほぼ直線関係にあると言える。また、この直線の勾配は周期によらず一定のようであるが、 $\theta = 90^\circ$ の場合と $\theta = 270^\circ$ の場合とで明らかなる差異がある。

4-2. 二本柱の場合 図5、図6は二本の円柱が波の進行方向と直角に並んだ場合の C_D , C_H と円柱間隔 S の関係を示したものである。図中の C_{D0} , C_{H0} はそれぞれ単独に置かれた円柱に対する C_D , C_H である。図5によると、 C_D の値は S/D が小さくなると急激に増加し、 C_{D0} の3倍近くに達する。実際、二本の円柱の間隙から単独の円柱の場合には見られなかった scale の大きい渦が流されて行く事が観察された。 S/D が3を越えると干渉の影響は認め難くなる。これらの傾向は $\theta = 180^\circ$ の場合や他の Re 数の場合でも大差なかった。図6を見ると、 C_H も C_D と同様の傾向を示すが、 $S/D = 1.3$ でたかだか C_{H0} の $1.1 \sim 1.2$ 倍程度である。以上の結果より、二本柱が波の進行方向に直角に並ぶ場合、二本柱の接近による円柱間の流速増加が、加速度変化や回折現象よりも大きく波力に影響を及ぼすと考えられる。

4-3. 三本柱の場合

図7、図8は三本の円柱が波の進行方向に直角に並んだ場合の C_D , C_H である。図7と図5を比較してみると、 S/D が小さい時、三本柱の場合には二本柱の場合より更に大きな抗力を受ける事がわかる。特に真中の円柱に働く力は両

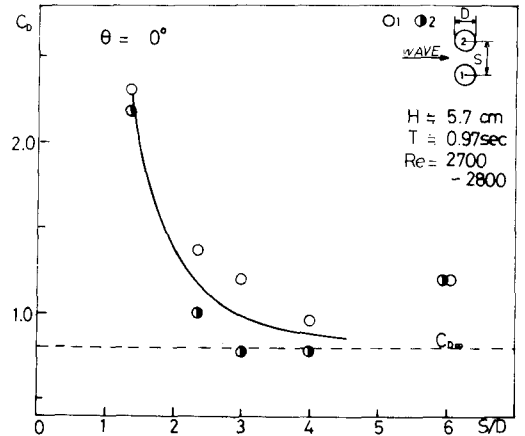


図-5 抗力係数と spacing の関係

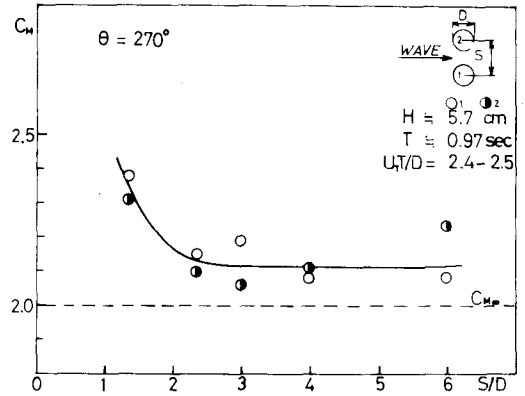


図-6 質量係数と spacing の関係

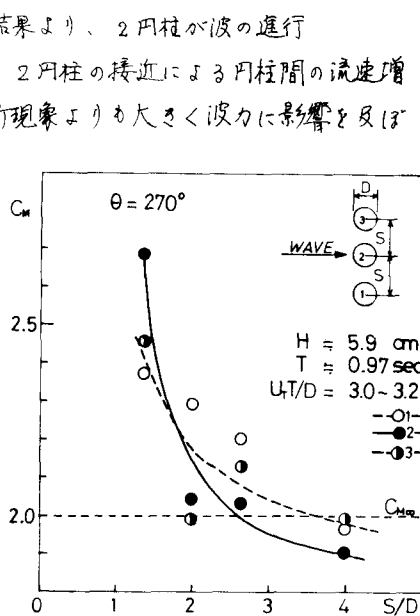


図-8 質量係数と spacing の関係

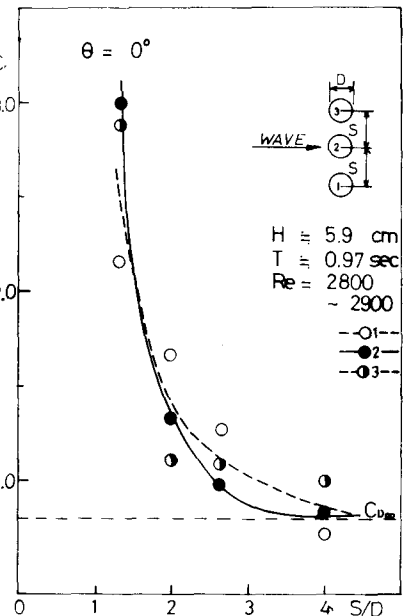


図-7 抗力係数と spacing の関係

端のそれより相当大きい。質量力も同様であるが、両端の円柱に作用する質量力は2本柱の場合と余り変りない。図-9は波の進行方向に直角に並べられた円柱1,3の間隔 S' を一定に保ったまま($S/D = 1.3$)その後方に置かれた円柱2を次第に遠ざけて行く場合の C_M の変化を表わしている。 S/D が小さい時、後方の円柱は明らかに前方の二円柱の遮蔽効果を受けて、波力は弱まる。 S/D が増加し、5を越えると前方の円柱の影響を受けなくなる。これに対して、前方の二円柱は後方の円柱の影響をほとんど受けない。図-6の $S/D = 1.3$ の時の値を保っているようである。ところで図-9は $\theta = 270^\circ$ 即ち波の進行方向に質量力が働く場合の C_M を示す図であるが、力の作用方向が逆転している $\theta = 90^\circ$ の場合でもやはり、後部の円柱2は前方の円柱より小さな力しか働かない。これは理解に苦(む)現象であるが、一応次のように考えてみる。この実験は質量力が抗力よりも遙かに卓越しているため、回折波の影響を強く受ける。前方2本の円柱後部領域は回折波のため、入射波の位相にかかわらず、常に波高が小さい。そのためこの領域にある円柱には常に前方の円柱より小さな力しか働かないのではなからうか。図-10はLaird(1960年)が行った実験結果をプロットしたものである。これは波を当てる代わりに腕の長い振り子の先端に円柱を取り付け静水中で単振動させて抵抗力を測定したもので、図中 F_{max} は抵抗力の最大値、 $F_{max\infty}$ は単円柱の場合のものである。図によれば、本実験の結果と大体一致している。

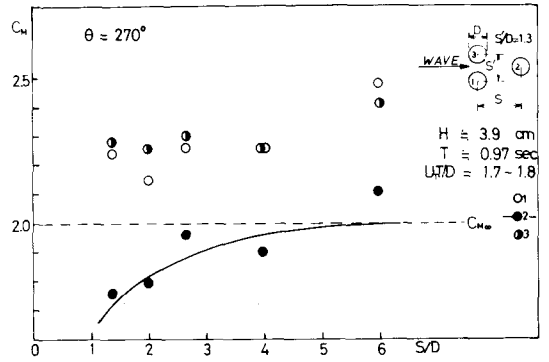


図-9 質量係数と spacing の関係

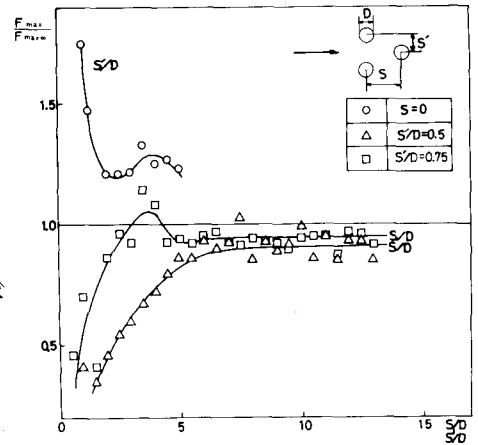


図-10 Laird(1960年)の実験

5. 結論と問題点

今回の実験では十分なデータが得られず、一般的結論は引き出し得ないが、本実験に限定して考えると次の事が言えよう。波の進行方向に直角に置かれた円柱列に作用する波力は、 S/D が2以下になると、単独に置かれた円柱の場合の2倍以上になりうる。 S/D が5を越えると、相互干渉はほとんど無視できる。この実験では、質量力が抗力より卓越しているため、Morison流の解析法では算出された C_D の値に大きな誤差が生じやすい。なお、解析にはStokes第2次近似波及び微小振幅波理論もあわせて適用してみたが、計算の結果 C_D 、 C_M の値はStokes第3次近似波理論と比べて1%しか差がなかった。

参考文献

- Laird, A.D.K., et al. (1960): Water Eddy Forces on Oscillating Cylinders, HY. No. 9, Proc. ASCE, Vol. 86, pp. 43 ~ 54.
 Keulegan, G.H. and L.H. Carpenter (1968): Forces on Cylinders and Plates in an Oscillating Fluid, J. Res. N.B.S. Vol. 60.
 Skjelbreia, L. (1958): Gravity Waves, Stokes Third Order Approximation, Tables of Functions, Council on Wave Res.