

円柱に作用する合成波力の実験的研究

河野 二夫*・仲座 栄三**・黒木 一寛***・高野 重利****

1. ま え が き

円柱に作用する波力は波の進行方向の直方向力と、直角方向の揚力の合成されたものと考えられる。直方向力に比較して揚力が大きくなると合成波力による設計が必要になる。合成波力に関する報告は極めて少ない。樁木らは直方向力と揚力を別々に計測した結果から合成波力は直方向力の1.4倍程度にもなることがあると述べている¹⁾。本論文は直方向力と揚力を同時に計測することによって、それらの合成波力を直接的に評価しようと試みたものである。とくに、合成波力は水面波形（以後水波形と略）に対する直方向力や揚力の位相差関係が重要であると思われるので、本報では両方向力の極大値の発生位相関係を明らかにすることを主眼とするとともに合成波力ベクトルについて実験的検討を加える。

2. 実験装置および実験方法

実験装置は幅 0.6m、長さ 15m、高さ 1m の造波水槽の中央付近に 図-2 に示すような直径 (D) が 5.6cm のアクリル製円柱を水底に固定し、水底より $S=22.7$ cm の位置に鉛直微小長 $dz=5$ cm の波力受圧部を設け、進行波を作用させた場合の受圧部に作用する波力を板ばねの手法を応用して計測した。波力受圧部は上部円柱に板ばねで固定され進行波による直方向力 (P_x) と揚力 (P_y) が板ばねの変位によって算定できるようになっている。実験は水路水深 h を 40, 50 cm とし周期 T や波高 H を変化させて行なった。板ばねの水中固有振動数は直方向力に対し 13.7 Hz、揚力に対し 12.7 Hz であったので波力に対する振動増幅率は無視した。

3. 実験結果と考察

(1) 水波形と波力波形の関係

図-3.1 に水面波形（実線）と直方向力（一点鎖線）および揚力（点線）の関係を示した。横軸には時間 t (秒) を取ってある。図の中で ㉑, ㉒ は波の周波数と揚

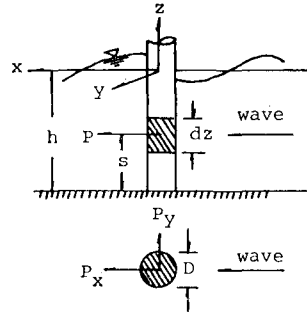


図-2 実験装置および座標系

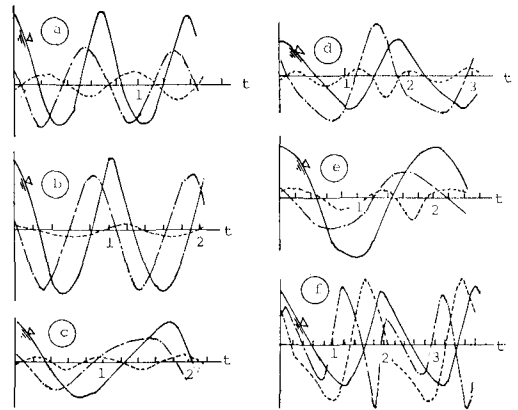


図-3.1 水面波形と波力波形の関係

力の周波数が一致する場合であり、㉑～㉒ は揚力の周波数が波の約 2 倍になる場合の例である。これらの波形に対する波の周期や KC 数を 表-3.1 に示す。

表-3.1 で P_M は微小振幅波理論で計算される質量力

表-3.1 KC 数と波の周期 (T) の値

	㉑	㉒	㉓	㉔	㉕	㉖
KC	1.22	4.27	5.00	7.18	9.14	10.40
T (sec)	0.85	1.05	1.75	1.89	1.90	1.92
P_M (g)	7.47	17.12	7.22	8.89	11.19	12.47

* 正会員 工博 宮崎大学教授 工学部

** 工修 沖縄県庁

*** 宮崎大学大学院 工学研究科

**** 正会員 宮崎大学技官 工学部

で質量係数 $C_M=1$ とした場合の値であり式 (1) になる。

$$P_M = \frac{1}{2} \rho \frac{\pi^3 D^3 H}{T^2} \cdot \frac{\cosh kh}{\sinh kh} \cdot dz \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$KC = \frac{T u_1}{D} = \frac{\pi H}{D} \cdot \frac{\cosh kh}{\sinh kh} \quad \dots\dots\dots (2)$$

上式で、 ρ は水の密度、 H は波高、 k は波数、 D は円柱直径である。 u_1 は Stokes 波理論の水粒子速度水平振幅の第一次近似値である。図-3.1 に示すように揚力波形は複雑なものが多いので、本文では比較的規則的なものか概周期的なものだけを扱うことにし、とくに水波形の倍の周波数で振動する揚力の大きさなどは平均値で評価することにする。

(2) 直方向力の波力係数

Stokes 波理論の第 2 近似解までを考え、抗力の速度の 2 乗の項をフーリエ級数に展開した結果を Morison らの波力算定式に代入すると直方向力 P_x は次式になる²⁾。

$$P_x = C_M \cdot F \cdot P_M \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$F = -\sin\theta - 2\alpha \cdot \sin 2\theta + \varphi(a_0/2 + a_1 \cos\theta + a_2 \cos 2\theta) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= 0.89\alpha - 0.27\alpha^2 \\ a_1 &= 0.849 + 0.062\alpha + 0.438\alpha^2 \\ a_2 &= 1.156\alpha + 0.249\alpha^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

θ は波の峰の位置からの位相角、 u_2 を Stokes 波理論の水粒子水平速度振幅の第 2 次近似値とすると $\alpha = u_2/u_1$ である。また C_D を抗力係数とすると $\varphi = (C_D/C_M) \times KC/\pi^2$ である。 F の値は質量力の大きさ（微小振幅波理論による質量的絶対値）を 1 とした時の波力波形（単位波力波形）を示す。直方向力の特性は F の値を把握することに帰着する。本文では F の中に含まれる単一の実験的比例係数 (C_D/C_M) の値と KC 数の関係を図-3.2 に示した^{3~7)}。

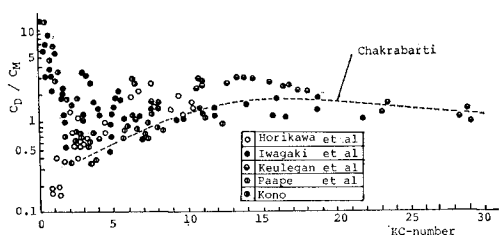


図-3.2 単円柱の波力係数と KC 数の関係

(3) 揚力係数

揚力係数を C_L とすると揚力 P_y は次式で示される。

$$P_y = \frac{1}{2} \rho C_L D u_1^2 \cdot dz \quad \dots\dots\dots (6)$$

式 (6) を用いて P_y の実測値から C_L の値を逆算すると KC 数との関係は図-3.3 になる。図の中の f_L と f_x はおのおの揚力と直方向力の周波数である。榎木ら

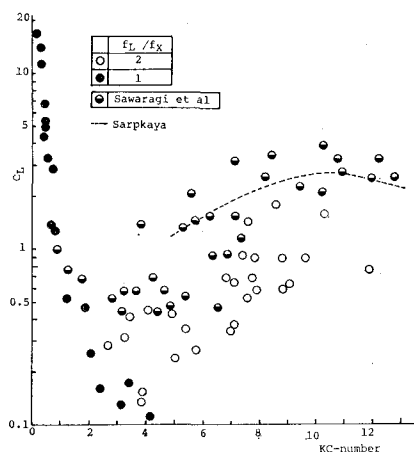


図-3.3 揚力係数

の値は (1/10) 有義極大揚力に対するものであるから平均的に算定した筆者らのものより若干大きな値になっている。この図から C_L の値は KC 数および揚力の周波数にも関係することが判断される。

(4) 直方向力 (P_x) と揚力 (P_y) の振幅比

直方向力と揚力の振幅比を図-3.4 に示した。図によるとこれらの比率は KC 数が 4 程度になると極小値が存在することがわかる。

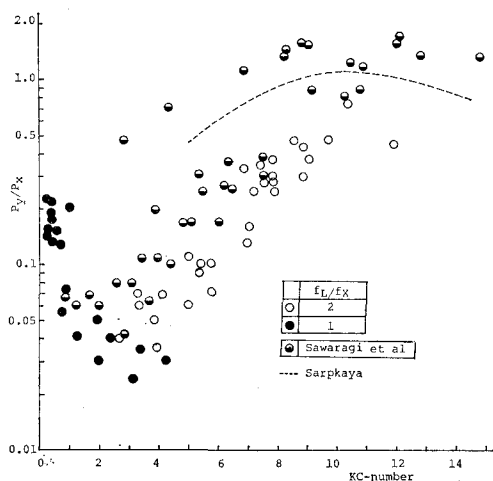


図-3.4 直方向力と揚力の振幅比 (f_L : 揚力の振動数, f_x : 直方向力の振動数)

(5) 合成波力ベクトル

直方向力 P_x と揚力 P_y のベクトル和が合成波力である。表-3.1 に示した実験ケースに対応するベクトル図を図-3.5 に示した。これらのベクトルは図は式 (1) の P_M の値によって無次元表示してある。図中の数字は水波形の峯の時刻を基点に $\pi/4$ ごとに描いた位相差の順位を示している。ベクトル図は KC 数が 4 付近を境にして異なる形状をしていると思われる。

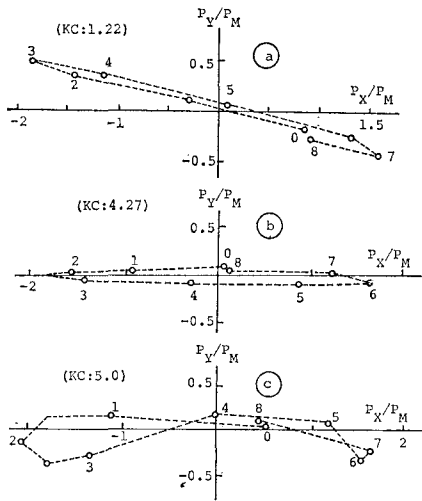


図-3.5 合成波力ベクトル

(6) 水面波形と波力波形の位相関係

水波 (wave), 直方向力 (in-line force), 揚力 (lift force) の時間 (t) に対する波形の略図を図-3.6 に示した。水波の峯の位置からの極値波力の発生する位相差を実験的に調べることにする。

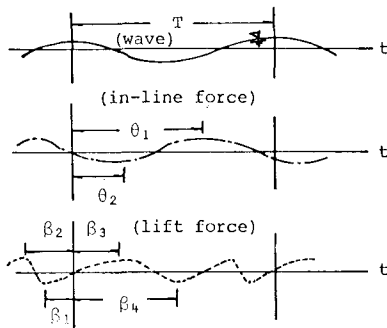


図-3.6 極値波力の発生位相差 (略図)

a) 直方向力の極値の発生位相差

図-3.6 の θ と KC 数の関係は図-3.7 のようになる。 θ_2 の散らばりは KC 数の増加に伴って大きくなるが、全体的には KC 数が大きくなると θ_1 は増大し、逆に θ_2 は減少している。直方向力の極値の発生する水面波形の峯の位置からの位相差は単位波力波形 F の極値を求めることにより得られる。式 (4) を θ によって微分すると次式に示す極値の条件式が得られる。

$$\cos \theta + 4\alpha \cdot \cos 2\theta + \varphi(a_1 \cdot \sin \theta + 2a_2 \cdot \sin 2\theta) = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

微小振幅波理論を適用すると式 (7) は次式に変形される。

$$\theta = \tan^{-1} \left\{ -\frac{3\pi^3}{8(C_D/C_M) \cdot KC} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

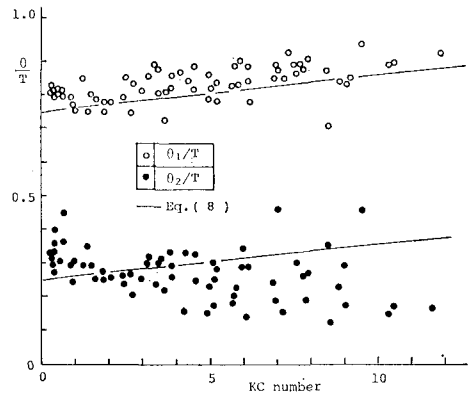
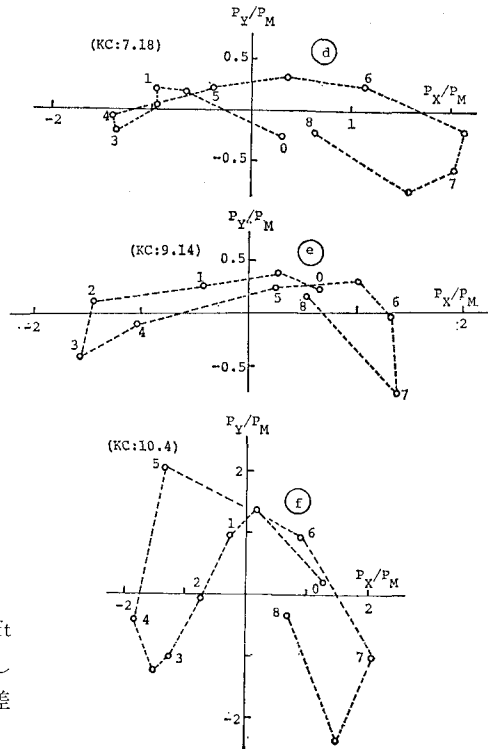
図-3.7 θ と KC 数の関係

図-3.7 には式 (8) で $C_D/C_M=1$ とした場合の計算値が実験値と比較して示してある。

b) 揚力の極値の発生位相差

i) $f_L=f_x$ の場合

揚力の振動数 (f_L) と直方向力の振動数が一致する場合、図-3.6 に示した β と波の周期 T の比と KC 数の関係は図-3.8 のようになる。図中の点線は平均的傾向を示すと思われる線を適当に引いたものである。

実験資料が少ないのと、現象が複雑であることから、上記のような線を引くことが妥当かは問題があるが、各々の β の値が KC 数に対して異なる性質を有すること

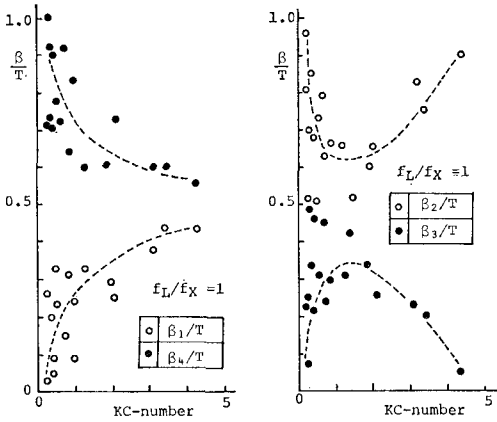


図-3.8 β と KC 数の関係 ($f_L=f_X$)

は明らかである。

ii) $f_L=2f_X$ の場合

揚力の平均的な振動数が直方向力の振動数（水面波形の振動数にほぼ一致する）のほぼ 2 倍になる場合の β と KC 数の関係を 図-3.9 と 図-3.10 に示した。図-3.9 に示した点線は 図-3.8 の場合と同じ内容のものである。

図-3.9 によると、揚力の振動数が波の約 2 倍の場合は 図-3.6 の β_1 と β_3 は KC 数の増加に伴って増加するが、 β_3 と β_4 は逆に減少する傾向にある。また、 $(\beta_1+\beta_4)$ と $(\beta_2+\beta_3)$ が周期 T に対する比率はほぼ同じ値になり、KC 数が約 5 のとき 0.5 程度となり、KC 数とは逆比例の関係になる。この物理的意味は KC 数が小さい程揚力の振動数は波の振動数に一致する傾向があり、KC 数が増加すると波の振動数の 2 倍以上で振動する可能性を示している。

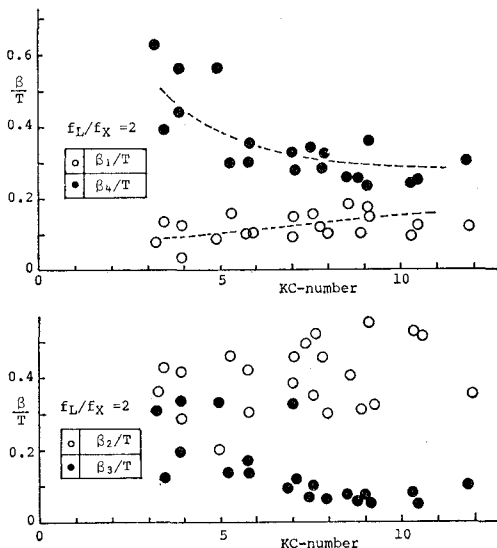


図-3.9 β と KC 数の関係 ($f_L=2f_X$)

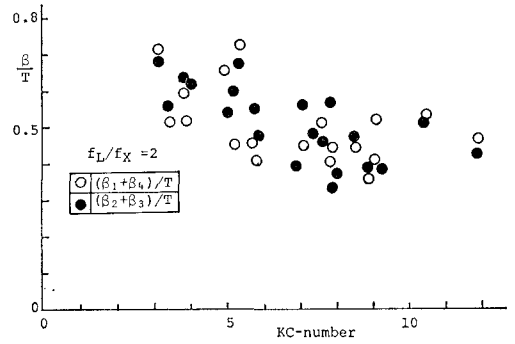


図-3.10 $(\beta_1+\beta_4)$ および $(\beta_2+\beta_3)$ と KC 数の関係

4. む す び

以上、筆者らは進行波中に固定された単円柱に作用する直方向力と揚力を同時に計測した結果に基づいて合成波力を直接的に評価することを試みた。とくに、合成波力は水面波形に対する直方向力や揚力波形の位相差が重要になることに注目し、それらの位相差の特性を明らかにした。主な結論は次のように要約される。

- (1) 揚力と直方向力の比率は KC 数が 4 付近で極小になる。このことは揚力係数の場合でも同様である。
- (2) KC 数が 4 付近を境に揚力波形の周波数は異なる。すなわち、KC 数が 4 程度より小さい場合は波と同一となり、大きくなると波の倍の周波数になる。
- (3) 水波形の峯近く（位相角 $\div 7\pi/4$ ）では揚力は大きくなり、KC 数が 10 前後になると合成波力は直方向力の 1.7 倍以上になる場合もある。ただし、この結論に対しては今後多くの資料による検討が必要である。
- (4) KC 数が小さいほど揚力の振動数は波の振動数に一致する傾向があり、逆に KC 数が大きくなると、波の振動数の 2 倍以上で振動する可能性が見られる。

参 考 文 献

- 1) 榎木 亨・中村孝幸・喜田 浩：円柱に作用する規則波による揚力について，第 22 回海講演集，pp. 525~530, 1975.
- 2) 河野二夫：円柱構造物に作用する波力の研究，宮崎大学・工学部研究報告，第 29 号，pp. 47~57, 1983.
- 3) 堀川清司・勝井秀博：複数円柱に作用する波力に関する実験，第 27 回年講演集，pp. 59~62, 1972.
- 4) 岩垣雄一・石田 啓・佐藤道彦：円柱に作用する規則波と振動流による波力の比較，第 32 回年講演集，pp. 99~100, 1977.
- 5) Keulegan, G. H. and Carpenter: Forces on cylinders and plates in oscillating fluid, Jour. of Res. of NBS, Vol. 60, No. 5, pp. 423~440, 1958.
- 6) Paape, A. and H. N. C. Breusers: The influence of pile dimension on forces exerted by waves, Coastal Eng., Vol. 12, pp. 840~849, 1966.
- 7) Chakrabarti, S. K.: In-line forces on fixed vertical cylinder in waves, Jour. of W.W.P, Coastal and Ocean Division, WW2, pp. 145~155, 1980.