

円柱に作用する斜交波の波力に関する実験的研究

Experimental Study on Wave Forces of Circular Cylinder in Crossing Wave Fields

姜 閔求*・倉田 克彦**・富田 孝史***・岡田全弘****・岩田好一朗*****

Yoon-Koo Kang, Katsuhiko Kurata, Takashi Tomita, Masahiro Okata and Koichiro Iwata

In this study, the pertinent characteristics of wave forces acting on vertical circular cylinder in two crossing wave fields are experimentally investigated. The maximum wave force of crossing waves is large in case of crossing angle 0-degree, compared with the linear vector sum of maximum wave forces of two waves trains. However it is small in case of any crossing angle. As the nonlinearity of two wave trains becomes to be strong, the double-peak occurs in the profile of wave forces. The inertia coefficients determined from the wave-by-wave analysis have the different tendency with the envelope shape of water surface elevation, under prominent inertia forces.

Keywords : (wave forces, vertical cylinder, crossing waves)

1. はじめに

小口径円柱に作用する波力は, Morison, *et.al.*(1950)を初めとして数多くの研究者が取り扱ってきており, 多方向不規則波の波動場の円柱に作用する波力も研究されている(Issacson & Nwogu, 1988). 異なる方向から伝播してくる複数の波の干渉により, 小口径円柱に作用する波力の特性がどのように変化するかは未だに明確になっていない. そこで, 本研究では, 斜交する二つの波, すなわち斜交波の波動場における小口径円柱に作用する波力を水理実験に基づいて考察する. なお, 波力の特性を流速や加速度と関連づけて検討する際に使用する流速や加速度には, 実験結果とともにKang, *et. al.*(1994)による斜交波の3次近似理論も使用する.

2. 水理実験

実験で使用した水槽は東洋建設(株)総合技術研究所鳴尾研究所の平面水槽(図-1参照)である. 水槽には, ピストンタイプの多方向不規則波造波装置が設置されており, 水槽内の周囲には, 反射波を極力小さくするために砕石による消波斜面や消波かごを設置した. 円柱に作用する波力を測定には, 図-2に示すように, 円柱の上端を固定した片持ちばり形式の波力計測装置を使用し, 円柱の上部に取り付けた三分力計により全波力を計測した. 使用した円柱は, 直径(D)が5cmと8cmとともに長さが84cmの2種類である. 実験では, 表-1に示すように, 静水深(h)を50cmに固定し, 斜交波を構成する一方の基本波(Wave A)の周期(T_A)を1.1s, その周期に対して波形勾配を2種類とし, もう一方の基本波(Wave B)の周期を2.0s, 1.3sの2種類, それぞれの周期に対して波形勾配が2種類の波を発生させた. また, Wave AとWave Bの交差角(θ ; 図-1参照)は 0° , 30° , 60° とし, 合計36ケースの実験を行った. なお, Wave Bの波高(H_B)12.0, 9.5, 8.0cmと, Wave Aの波高(H_A)8.4cmはWave AとWave Bにより構成される斜交波が砕波に近い状態になるように決められたものである. 水位変動の計測は, 図-1に示すように, 造波装置から7m離れた地点で, 直線配置された5本の電気容量式水位計で行い, 流速(u, v ; u, v は水平面上の直角2方向の x, y 方向流速)は造波装置の中心線上に設置された水位計の位置の静水面下12.5, 25.0, 37.5cmの深さにおいて超音波式流速計で計測された. 流速を計測した後, 円柱を流速計の設置位置に設置して, 水平2方向の波力を計測した. なお, 円柱の水中における固有振動周期は10Hzであった. データの解析では, 多重反射波が混入する前の約30s間のデータを対象にした.

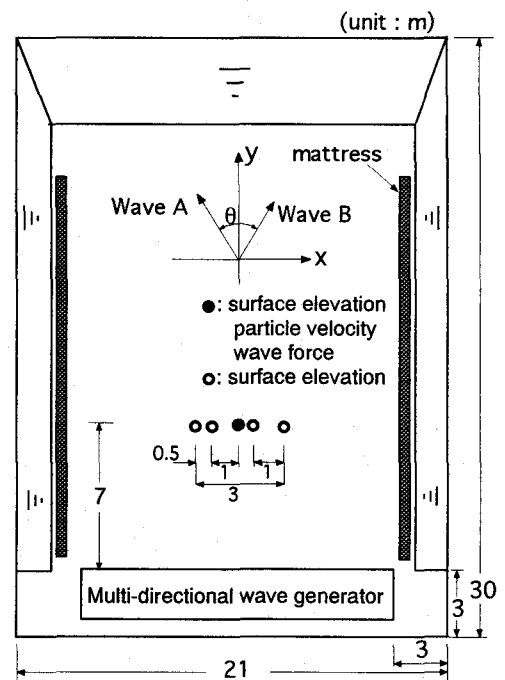


図-1 実験水槽

* 学生員 名古屋大学大学院工学研究科(〒406-01 名古屋市千種区不老町)
 ** 正会員 鳴尾研究所所長 東洋建設(株)総合研究所
 *** 正会員 名古屋大学助手 工学部土木工学科
 **** 愛知県
 ***** 正会員 名古屋大学教授 工学部土木工学科

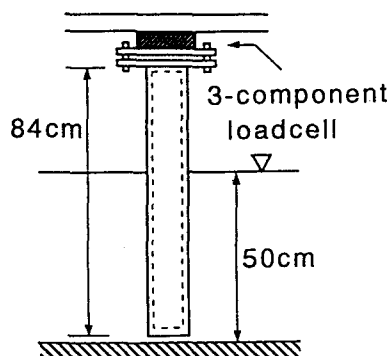


図-2 波力計測装置

表-1 実験条件

Wave A		Wave B		θ (deg.)	depth (cm)
T_A (s)	H_A (cm)	T_B (s)	H_B (cm)		
1.1	6.5	2.0	12.0	0	50
			9.0	30	
		1.3	8.0	60	
			5.0		
		8.4	2.0		
			1.3		

3. Morison式と波力係数算定

小口径円柱に作用する全波力ベクトル $\mathbf{F}$ における揚力は無視できるほど小さいと仮定し、次式に示されるように $\mathbf{F}$ は抗力と慣性力から構成されるものとする。

$$\mathbf{F} = \frac{\rho D}{2} \int_{-h}^{\eta} C_D \mathbf{V} |\mathbf{V}| dz + \frac{\rho \pi D^2}{4} \int_{-h}^{\eta} C_M \frac{d\mathbf{V}}{dt} dz \quad (1)$$

ここで、 C_D : 抗力係数, C_M : 慣性力係数, ρ : 水の密度, $\mathbf{V}$: 流速ベクトル ($=u\mathbf{i} + v\mathbf{j}$; u と v はそれぞれ x 方向と y 方向流速), η : 水位変動である。また、式(1)の波力ベクトル $\mathbf{F}$ を x 方向成分 F_x と y 方向成分 F_y に分離すれば、 F_x と F_y はそれぞれ式(2)と(3)で与えられる。

$$F_x = \frac{\rho D}{2} \int_{-h}^{\eta} C_D u \sqrt{u^2 + v^2} dz + \frac{\rho \pi D^2}{4} \int_{-h}^{\eta} C_M \frac{du}{dt} dz \quad (2)$$

$$F_y = \frac{\rho D}{2} \int_{-h}^{\eta} C_D v \sqrt{u^2 + v^2} dz + \frac{\rho \pi D^2}{4} \int_{-h}^{\eta} C_M \frac{dv}{dt} dz \quad (3)$$

上式中の抗力係数(C_D)と慣性力係数(C_M)の算定は次のように最小自乗法を使って計算し、その際、計算波力と実測波力の極大値と極小値における計算波力の精度を向上するため、実測波力の2乗の重みをかけた。なお、使用する流速や加速度は、富田ら(1994)によって、斜交波の水粒子速度場に対して十分適用可能なものと検証された斜交波の3次近似理論を採用した。

周期の異なる基本波から形成される斜交波は波群を形成し、その波群の中の各素波は1波ごとに異なる。そこで、一つの波群の時系列記録内では波力係数は一定であると仮定する方法(方法(I))と波力係数が波別解析波ごとに異なると仮定する方法(方法(II))でそれぞれ波力係数を計算した。

4. 結果とその考察

4.1 波力の時間波形

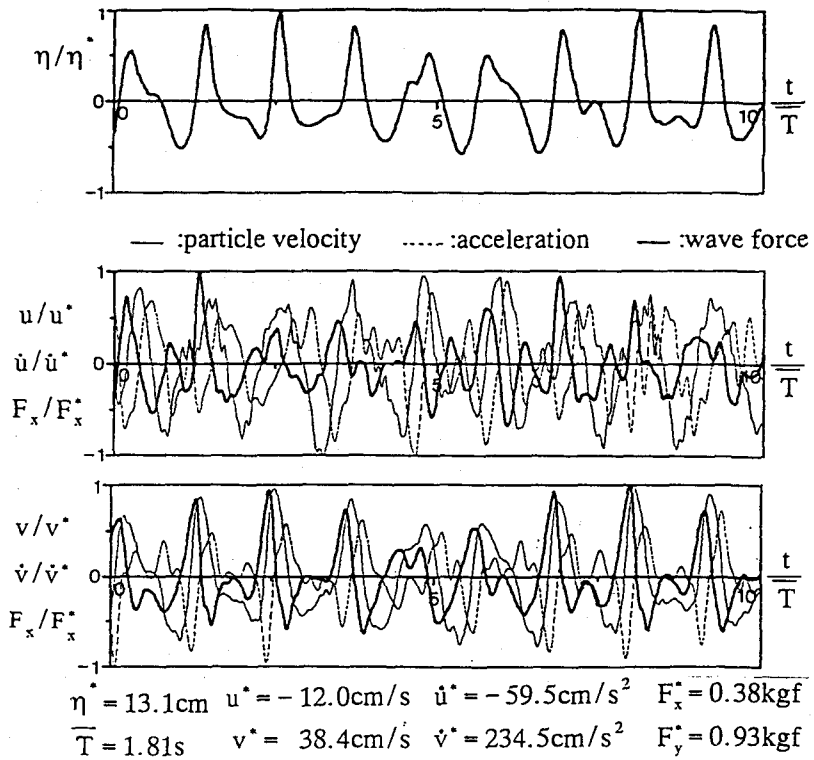
図-3は基本波の非線形性により変化する水位、流速、加速度および波力の無次元時間波形の特性を示した一例であり、流速と加速度は静水面下12.5cmにおいて計測したもので、波力は直径8cmの円柱に対して計測したものである。本研究では非線形性を表わすパラメータとして、アーセル数($Ur = \eta_{rms} L_p / h^3$, η_{rms} : 一波群中の水位の自乗平均根, L_p : ゼロアップクロス法による最大周期の波別解析波の波長)を採用した。図-3(a)は $Ur=7.2$ であり、図-3(b)の $Ur=4.0$ より非線形性が強い斜交波を示したものである。また、図-4は、図-3に示した実験ケースにおける水位、 y 方向の流速、加速度および波力の振幅スペクトルを示したものであり、それぞれの振幅スペクトルはその最大値により無次元化されている。図-3と図-4より、 Ur が大きな場合には、高周波数成分の寄与が大きくなり、そのため、水位、流速、加速度および波力の波別解析波の時間波形は上下にかなり非対称になる。とくに、水位などのそれぞれの波形の負値側の包絡線の変化が小さくなっている。さらに、波力の波別解析波の時間波形には二つの極大値が認められる。一方、 Ur が小さい場合

には、基本波の周波数成分以外の周波数成分は小さく、図-3(b)に示される水位などの時間波形の包絡線の形状は、図-3(a)に示されるものよりも上下に対称になっている。さらに、図-4(a)より、高周波数成分の寄与が大きな場合では、水位や流速に比べて加速度や波力における高周波成分の寄与が大きいことが認められる。これは、加速度は流速を時間で微分したものであるから当然のことと言えるかもしれないが、加速度と同様に波力においても高周波数成分の振幅が大きくなっていることは、本研究で使用する円柱では慣性力が卓越していることを示していると考えられる。

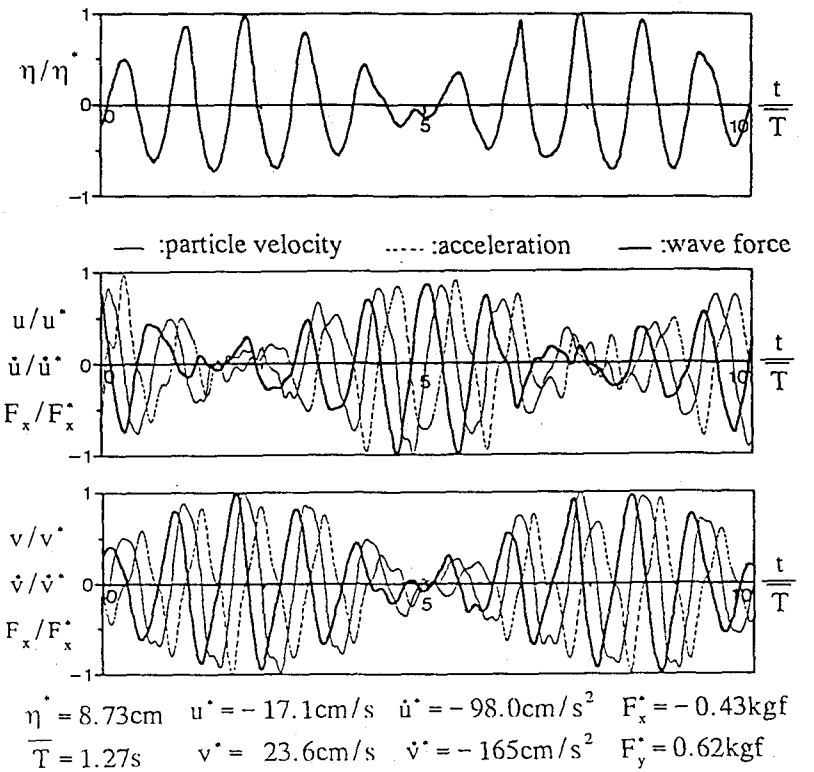
図-5は前述した波力係数の決める方法(I)と方法(II)によって求められた波力係数を使用して計算した波力の時間波形と実験結果の比較した一例である。この図より、方法(I)によって計算した波力係数を用いた場合は波群全体としてはある程度一致しているが、極値における精度があまりよくない。一方、方法(II)によって算定された波力係数を用いて計算した結果は方法(I)によるものよりも実験結果とよく合い、とくに、極値でもよく一致することが認められる。また、両方法の結果と図4-(a)の結果から、波力係数算定に使用する斜交波の3次近似解によって流速や加速度を精度高く表現することが重要であり、1次近似解より2次や3次の高次近似解が必要になる。

4.2 最大波力

図-6は、斜交波における最大波力ベクトルの(F_{ABmax})大きさと、基本波Wave AやWave Bの1成分波に対して行った実験から得られたそれぞれの最大波力のベクトル(F_{Amax}, F_{Bmax})の線形和を比較したものである。Wave AやWave Bの最大波力の線形和の大きさ($|F_A^{max} + F_B^{max}|$)と斜交波による最大波力の大きさ($|F_{AB}^{max}|$)を比べると、交差角 0° の場合は線形和より全体に大きくなるが 30° 、 60° の場合は線形和より小さくなる傾向が見られる。しかし、交差角によりWave AとWave Bの位相速度が異なるため、この傾向は計測位置によって変化する。そこで、位相差を考慮した F_{Amax} と F_{Bmax} の線形和とは異なるが、図-7に、1次近似解を使用して得た最大波力 $F^{(1)max}$ と3

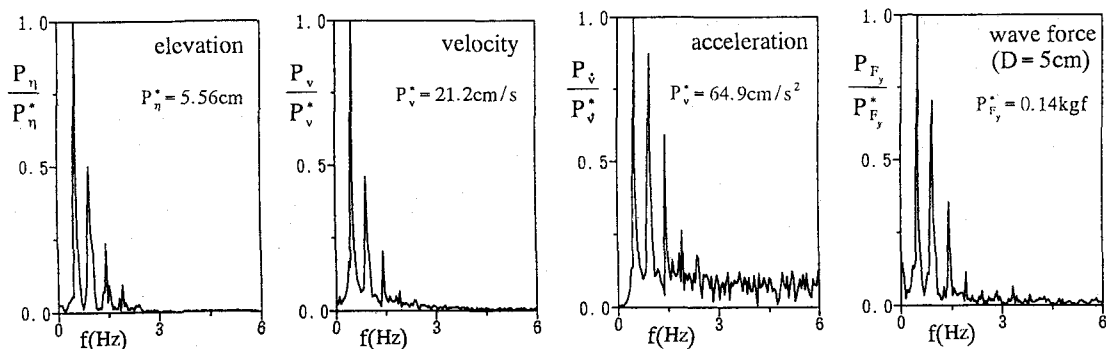


(a) $T_A=1.1\text{s}$, $H_A=6.5\text{cm}$, $T_B=2.0\text{s}$, $H_B=12.0\text{cm}$, $\theta=30^\circ$, $Ur=7.2$

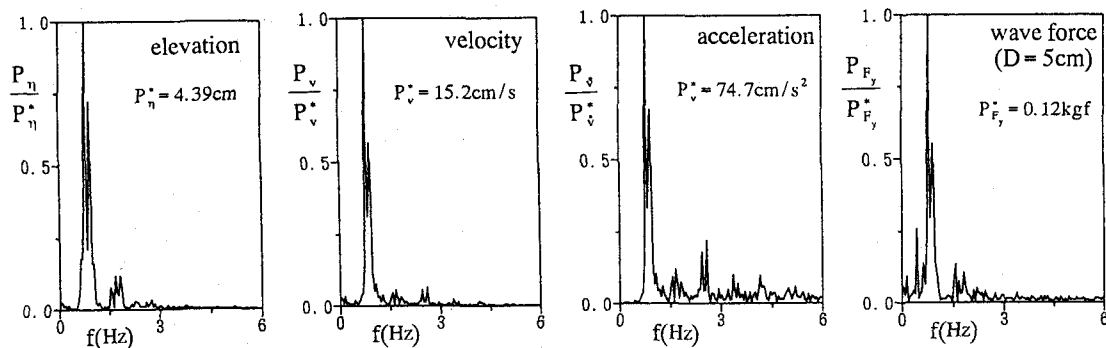


(b) $T_A=1.1\text{s}$, $H_A=6.5\text{cm}$, $T_B=1.3\text{s}$, $H_B=8.0\text{cm}$, $\theta=60^\circ$, $Ur=4.0$

図-3 水位，流速，加速度および波力の無次元時間波形



(a) $T_A=1.1s$, $H_A=6.5cm$, $T_B=2.0s$, $H_B=12.0cm$, $\theta=30^\circ$, $Ur=7.2$



(b) $T_A=1.1s$, $H_A=6.5cm$, $T_B=1.3s$, $H_B=8.0cm$, $\theta=60^\circ$, $Ur=4.0$

図-4 水位、流速、加速度および波力の無次元振幅スペクトル

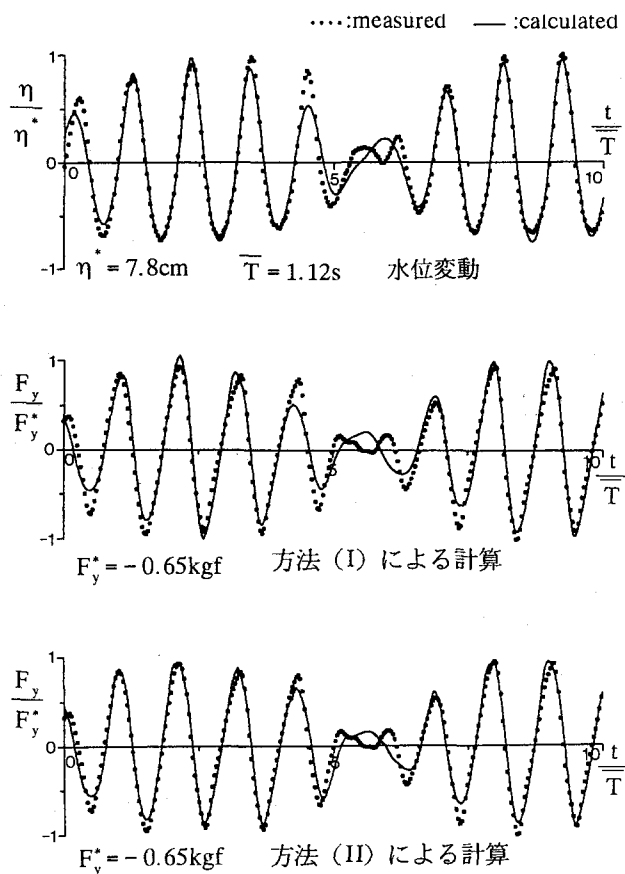


図-5 水位変動と方法 (I) と方法 (II) による計算波力と実測波力の時間波形
($T_A=1.1s$, $H_A=6.5cm$, $T_B=1.3s$, $H_B=8.0cm$, $\theta=30^\circ$)

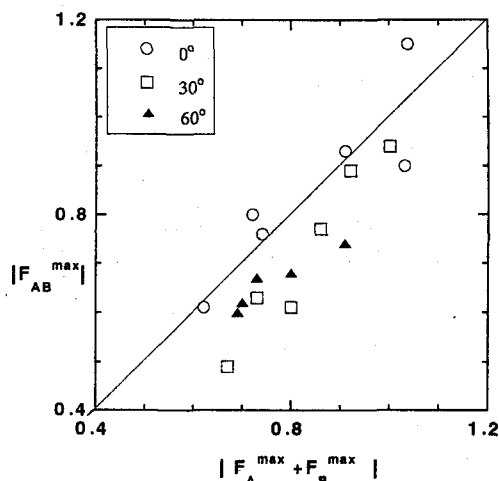


図-6 二つの基本波の最大波力の線形和と斜交波の最大波力

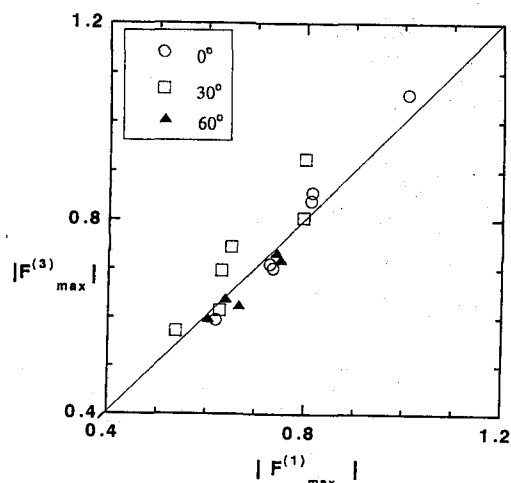


図-7 斜交波の1次近似解と3次近似解による最大波力

次近似解を使用して得た $F_{\max}^{(3)}$ を比較したものを示す。なお、使用した波力係数は方法IIにより算定されたものである。交差角が 30° の場合、3次近似解に基づく最大波力は1次近似解によるものよりも大きくなり、交差角が 0° の場合には、波力が大きく作用する場合に3次近似解に基づく最大波力が1次近似解によるものよりも若干大きくなる。一方、交差角が 60° の場合には、大きな波力が作用するときのデータが少ないが、1次近似解に基づく最大波力の方が3次近似解によるものよりもわずかに大きくなっている。このように、1次近似解と3次近似解に基づく最大波力の差、すなわち最大波力に及ぼす高周波数成分の影響は、基本波の交差角により異なり、さらに、交差角にともなう基本波の位相速度の差による影響も図-6と図-7の大きな差から指摘できよう。

4.3 波別解析波ごとの波力係数

本実験の範囲は、概ね慣性力の卓越領域であったので、慣性力係数について検討することにする。図-7は交差角度 0° と 30° の場合の斜交波の水位、流速、加速度および波力の時間波形と水位の波別解析波に対応する慣性力係数を示したものである。この図から認められるように、水位変動の上下の包絡線の形によらず波高減少過程では $u^* > \dot{u}^*$ (u^* と $\dot{u}^*$ はそれぞれ無次元流速と加速度の最大値) である。一方、波高増大過程では水位変動の上下の包絡線の形により u^* と $\dot{u}^*$ の大小関係は異なる。すなわち、上下の包絡線がほぼ対称の場合は $u^* > \dot{u}^*$ となり、非対称の場合は $u^* < \dot{u}^*$ となる。この波高増大過程における u^* と $\dot{u}^*$ の関係により、慣性力係数の1波群中の変化は特性づけられる。すなわち、波高増大過程で $u^* > \dot{u}^*$ となる図-8(a)では最大波が現われる少し前の位相で慣性力係数は最大になり、その後徐々に小さくなる。一方、波高増大過程で $u^* < \dot{u}^*$ となる図-8(b)では波別解析波の波高の変化とは逆の変化をし、慣性力係数は最大波が生じる位相で最小になり、最小波高を示す位相で最大となる。

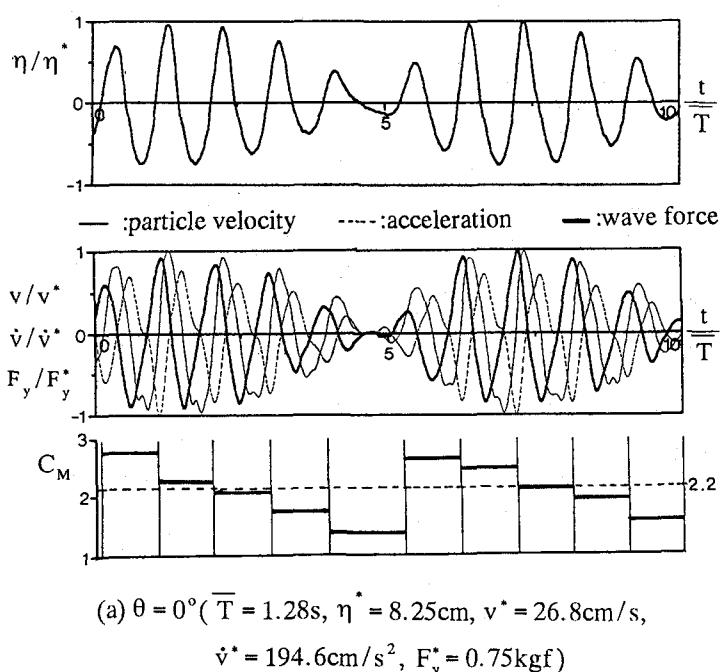


図-8 斜交波の水位、流速、加速度および波力の無次元時間波形と波別解析波ごとの慣性力係数
($T_A=1.1s$, $H_A=6.5cm$)

このように、波群中における慣性力係数の変化特性は、水位変動の包絡線の形状により概ね判断できる。

5. 主要な結論

本研究では、斜交波の波動場に設置された小口径円柱に作用する波力を水理実験に基づいて検討した。本研究で得られた主要な結論を以下にまとめる。

- (1) 円柱に作用する斜交波の最大波力は斜交波を構成する二つの基本波の最大波力の線形和より、交差角が 0° の場合には大きく、 30° や 60° の場合には小さくなる。このような傾向は二つの基本波の非線形干渉や交差角にともなうその位相速度の差に起因するものと考えられる。
- (2) 二つの基本波の非線形性が強いほど高周波数成分の影響によって、高周波数成分の加速度が大きくなり、それにともない高周波数成分の波力も大きくなる。
- (3) 波力係数算定に使用する流速や加速度の理論は1次近似解より2次や3次の高次近似が必要である。
- (4) 斜交波による波力の時間変化の正確な算定ためには、波別解析法に基づく波力係数を使う必要がある。
- (5) 波別解析波ごとの慣性力係数は、水位変動の包絡線形状と、流速や加速度の大きさの相対的な関係によって異なる特性を示す。

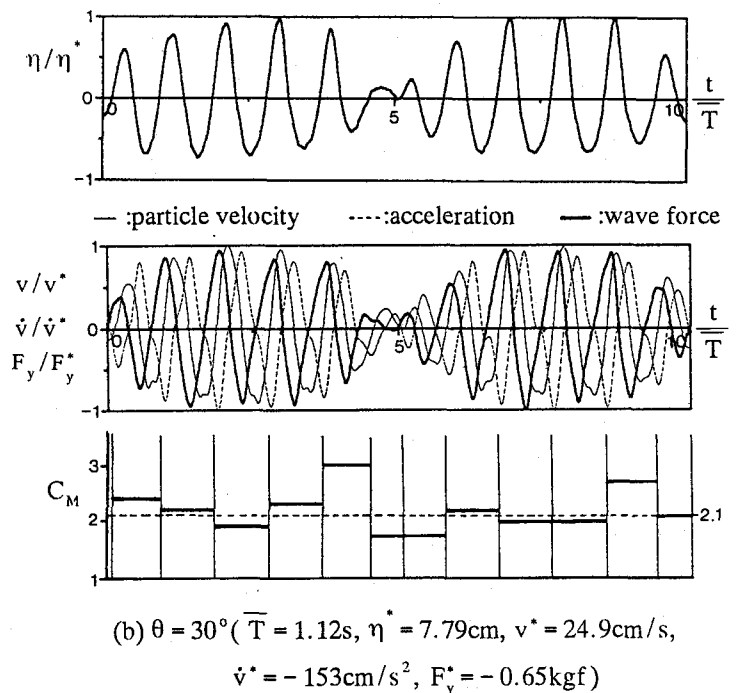


図-8 斜交波の水位、流速、加速度および波力の無次元時間波形と波別解析波ごとの慣性力係数
($T_B=2.0s$, $H_B=12.0cm$)

参考文献

- Kang, Y.K., T.Tomita, K. Kurata and K. Iwata(1994) : *Wave Kinematics of Nonlinear Crossing Waves*, Proc., 4th Int'l. Offshore and Polar Eng. Conf., Vol.3, pp.91-98.
- Issacson, M. and Nwogu, N.(1988) : *Short-Crested Wave Forces on a Vertical Pile*, Proc. 7th Int'l. Conf. on Offshore Mech. and Arctic Eng. pp.47-54.
- Morison, J.R., O'Brien, M.P., Johnson, J.W. and Schaaf, S.A.(1950) : *The Forces Exerted by Surface Wave on Piles*, Petroleum Trans. AIME, Vol.189, pp.149-157.
- 富田 孝史, 姜 閔 求, 岩田好一朗, 倉田 克彦(1994) : 斜交波の水粒子速度に関する研究, 海洋開発論文集, Vol.10(印刷中).