

小口径円柱に作用する斜交波の波力と波力係数に関する研究

富田孝史*・姜 関 求**・倉田克彦***・岩田好一郎****

1. 序 論

海岸および海洋の多目的利用開発において、多方向不規則波による海岸および海洋構造物に作用する波力を精度高く予測することは非常に重要である。小口径円柱に作用する波力に関しては、Morisonら(1950)を始めとして数多くの研究成果が得られてきている。さらに、多方向不規則波の波動場における円柱に作用する波力も、例えば、Issacson・Nwogu(1988)により研究されている。しかし、多方向不規則波による波力と単一方向不規則波による波力の特性にどのような差異があるのかは明確ではなく、異なる方向から伝播してくる複数の波の干渉が波力に及ぼす影響についても十分検討されていない。

本研究では、非線形多方向不規則波の波動場に設置された小口径円柱に作用する波力の特性を解明する基礎として、異なる方向から伝播してくる2つの波による斜交波の波動場を取り上げ、小口径円柱に作用する斜交波の波力や波力係数の特性を水理実験に基づいて考察する。

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、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の測定には、図-2に示すように、円柱の上端を固定した片待ちばり方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円柱に作用する全波力を計測した。使用した円柱は、長さが84 cmの直径(D)が5 cmと8 cmの2種類である。実験では、表-1に示すように、静水深(h)を50 cm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1.1 s, 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(T_B)を2.0 s, 1.61 s, 1.3 sの3種類、それぞれの周

期に対して波形勾配が3, 2, 2種類とした。また、Wave AとWave Bの交差角(θ)は 0° , 30° および 60° とし、合計57ケースの波を発生させた。なお、Wave Bの波高(H_B)における12.0, 9.5, 8.0 cmと、Wave Aの波高(H_A)における8.4 cmは、Wave AとWave Bで形成される斜交波が碎波に近いが碎波しな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7 m離れた位置に直線配置された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 と y 方向流速)は中央の水位計の設置位置(図-1中の●)における静水面下12.5, 25.0および37.5 cmの深さで超音波式流速計により計測された。流速を計測した後、

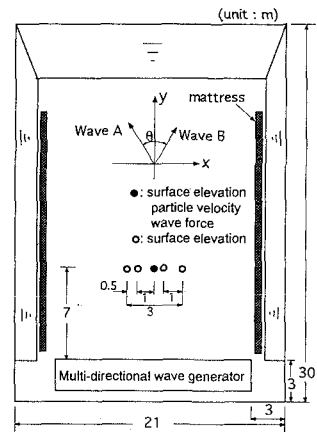


図-1 実験水槽の概略と水位、流速、波力の計測位置

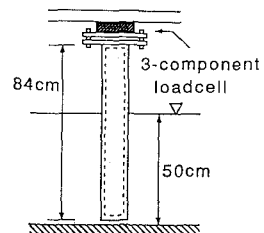


図-2 波力計測装置

* 正 会 員 工 博 名古屋大学助手 工学部土木工学科
 ** 学生会員 工 修 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻
 *** 正 会 員 工 博 東洋建設(株) 総合技術研究所 鳴尾研究所所長
 **** 正 会 員 工 博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

表一 実験条件

Wave A		Wave B		θ (deg.)	Depth (cm)	
T_A (sec)	H_A (cm)	T_B (sec)	H_B (cm)			
1.1	6.5	2.0	12.0	0	50	
			9.0	30		
			5.5	60		
		1.61	9.5			
			6.5			
			8.0			
			5.0			
		1.3	9.0			
			6.5			
			5.0			
8.4	2.0	9.0				
		6.5				
		5.0				

波力計測装置を中央の水位計の位置に設置して、 x と y 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10 Hzであった。データの解析は、多重反射波が混入する前の約30 s間のデータを対象に20 msで離散化して行った。

3. Morison 式と波力係数の算定

斜交波の波動場における小口径円柱に作用する全波力ベクトル F において、揚力が無視できると仮定するならば、全波力ベクトルは次式のように与えられる。

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

ここで、 C_D は抗力係数、 C_M は慣性力係数、 ρ は水の密度、 V は流速ベクトル(= $ui + vj$; i と j はそれぞれ x 方向と y 方向流速の単位ベクトル)、 η は水位変動である。また、式(1)より、波力ベクトル F の x と y 方向の成分、 F_x, F_y はそれぞれ式(2)と(3)で与えられる。

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

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

式(2)および(3)中の抗力係数 C_D と慣性力係数 C_M は、実測波力に基づいて最小自乗法を使って求めた。その際、波力の極値において計算波力の精度を向上させるために、計測波力の2乗の重みをかけた。また、流速や加速度には、富田ら(1994)によって、斜交波の流速場に対して適用可能なものと検証された斜交波の3次近似理論(Kangら, 1994)を採用した。

周期が異なる2つの基本波から形成される斜交波は、波群を形成し、波群中の各素波(波別解析波)は1波ごとに異なる。そこで、波力係数の求める際、波力係数が、一つの時系列記録内で一定であると仮定する方法(方法

(I))と波別解析波ごとに異なると仮定する方法(方法(II))の2種類の方法を使用した。

4. 結果とその考察

4.1 最大波力

非線形な斜交波の場合、斜交波を形成する Wave A と Wave B は相互に干渉しあう。そこで、斜交波の1波群中における最大波力に及ぼす Wave A と Wave B の相互干渉による効果を水理実験結果に基づいて検討する。

図-3は、斜交波の1波群中における最大波力ベクトルの大きさ $|F_{AB}^{max}|$ と、Wave A あるいは Wave B のみで行った単一規則波の実験から得られたそれぞれの最大波力ベクトル F_A^{max} と F_B^{max} の線形和 $|F_A^{max} + F_B^{max}|$ を比較したものである。交差角が 0° の場合には、斜交波における最大波力ベクトルの大きさは2つの基本波の最大波力ベクトルの線形和より全体的に大きくなっている。しかし、交差角が 30° や 60° の場合には、斜交波の方が線形和より小さくなる傾向が認められる。すなわち、斜交波を形成する基本波の相互干渉の効果は、基本波の交差角の影響を受け、そのため最大波力も交差角により変化することが指摘できる。このことから、多方向不規則波の場合でも、それを形成する各成分波間の相互干渉の効果を考慮する必要があることが推察される。

4.2 波力係数

まず、波力ベクトルを直角2方向の波力成分に分けるときの直交座標系の採り方が、波力係数にどの程度の影響を及ぼすのかを検討する。本研究で検討した座標系は、図-1に示される $x-y$ 座標系と流速ベクトルの大きさが最大になる方向(p 方向)とそれに直交する方向(t 方向)、すなわち、 $p-t$ 座標系の2種類である。

図-4は斜交波を構成する Wave A あるいは Wave B のみの場合において得られた $x-y$ 座標系と $p-t$ 座標系による波力係数を示すものである。なお、波力係数は前

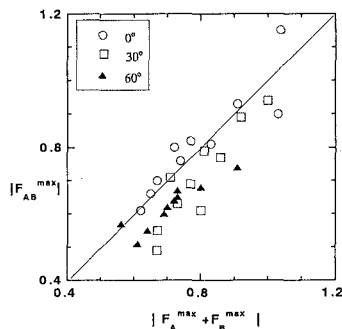


図-3 2つの基本波による最大波力の線形和と斜交波による最大波力

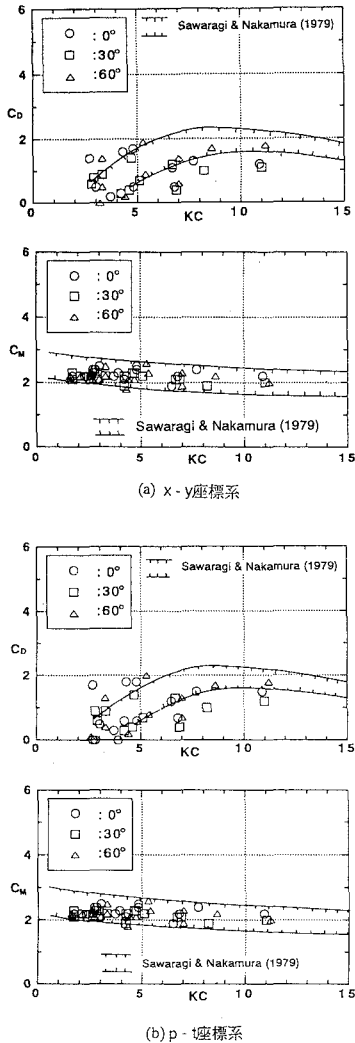


図-4 1成分波の場合の波力係数とKC数の関係

述した方法(I)より求めたものである。図の横軸のKCは、クーリングン・カーペンター数(= $U_{max} \bar{T} / D$; KC数)であり、ここに、

$$U_{max} = \left[\frac{1}{h + \eta} \int_{-h}^{\eta} V^2 dz \right]_{max} \dots\dots\dots (4)$$

\bar{T} はゼロアップクロス法によって波別解析された斜交波の1波群間における平均周期、 V は斜交波の3次近似解に基づく流速ベクトルの大きさ、下付添字maxは最大値を示す。 $x-y$ 座標系を使用したときの波力係数は、 $p-t$ 座標系から得られた波力係数より、抗力係数 C_D の場合には平均的に0.1程度、慣性力係数 C_M の場合には平均的に0.05程度小さくなっているが、座標系の採り方が波力係数に及ぼす効果はほとんど無視してもよいことが指摘できる。さらに、図-5は、 $x-y$ 座標系と $p-t$ 座標系に

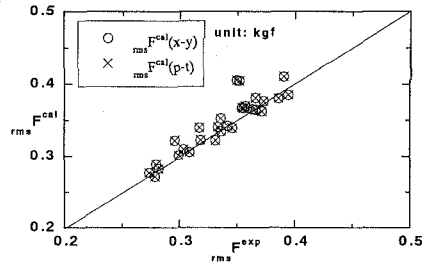


図-5 1成分波の場合、 $x-y$ 座標系と $p-t$ 座標系で計算した波力の自乗平均根

おいて得られた波力係数を使用して計算した波力と実測波力の1波群間の時間波形の自乗平均根の関係を示している。この図からも、座標系による差異はほとんど認められない。したがって、多方向不規則波の場合でも、波力係数を実測波力を使用して決定するときの直交座標系は任意に採ることができると考えられる。なお、本研究では今後、 $x-y$ 座標系に基づいた波力係数を取り扱うことにする。

また、本研究で用いた波力係数の算定方法の妥当性を検証するために、図-4にはSawaragi・Nakamura(1979)が、実験から得た波力係数の分布の範囲も併記してある。本実験において得られた波力係数とSawaragi・Nakamura(1979)の結果を比較すると、抗力係数には多少ばらつきがみられるが、全体的に両者はほぼ一致しており、本研究で得られた波力係数はほぼ妥当な値を与えていると判断できよう。

つぎに、 $x-y$ 座標系で方法(I)によって決められた波力係数とKC数や斜交波の交差角の関係より、斜交波の波力係数の特性を調べる(図-6参照)。本研究で行われた単一規則波(図-6中、regular wave)の結果と比較すると、KC数が5以下の場合の抗力係数(C_D)において、斜交波による抗力係数が単一規則波によるものより若干大きくなる場合が認められるが、斜交波による波力係数(C_D と C_M)は、全体的には単一規則波による波力係数と同程度である。しかし、交差角別に分けてみると、交差角が小さくなるほど抗力係数は小さくなり、交差角が0°の場合の抗力係数は単一規則波の抗力係数にほぼ一致するようになった。一方、慣性力係数に及ぼす交差角の効果は抗力係数とは逆の傾向を示している。また、 D/h の値が小さいほど、この傾向はより明確に現われている。これらのことから、斜交波の交差角が大きくなるほど円柱周りに発生する渦の影響が強くなると考えられる。

斜交波の交差角による波力係数の変化を水粒子運動の軌跡の楕円度 γ ($= R_s/R_l$, R_s と R_l はそれぞれ水粒子運動の軌跡の短軸と長軸の長さである)と関連づけて検討する。図-7から、楕円度 γ が大きく、水粒子が円運動に

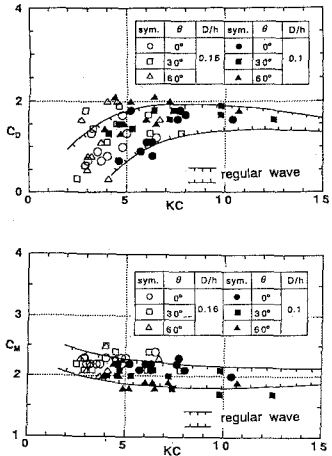


図-6 方法(I)による波力係数と交差角や KC 数の関係

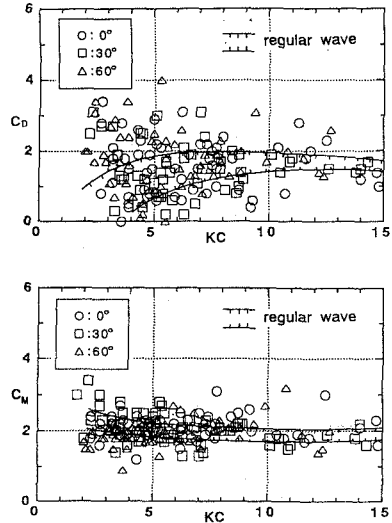


図-8 方法(II)による波別解析波ごとの波力係数と KC 数の関係

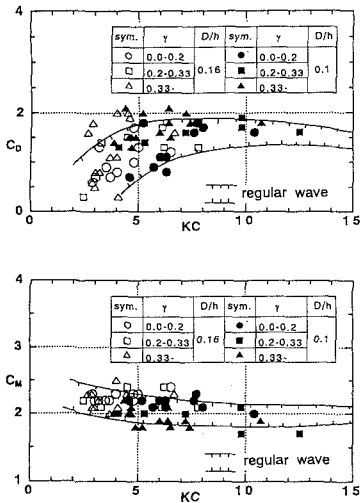


図-7 方法(I)による波力係数と水粒子の運動軌跡の楕円度 γ や KC 数の関係

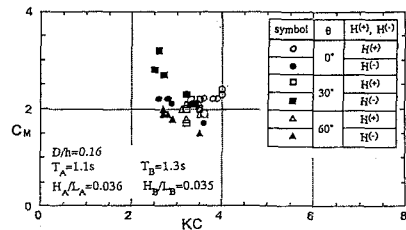


図-9 波高増加過程 $H^{(+)}$ と波高減少過程 $H^{(-)}$ における慣性力係数と KC 数の関係

ことに起因していると判断される。

本実験は、概ね慣性力の卓越領域であったので、斜交波の波別解析波ごとの慣性力係数の特性を調べることとする。図-9は、交差角が異なる3種類の実験結果から得られた慣性力係数とKC数の関係を示したものであり、水面変動の包絡波形における波高増大過程 $H^{(+)}$ や波高減少過程 $H^{(-)}$ と関連づけて示している。交差角が0°の場合では、波高増大過程における慣性力係数は波高減少過程のものよりやや大きいが、交差角が30°の場合では波高減少過程における慣性力係数は波高増大過程のものよりかなり大きくなり、その値も1.6から3.3と広い範囲に分布している。このように波高増大過程と減少過程で慣性力係数の特性が変化することから、波別解析波ごとの波力は、対象としている波別解析波の1波あるいは2、3波前の波からの影響を受けることを示唆しているものと思われる。

4.4 計算波力と実験波力の比較

図-10は前述した方法(I)と方法(II)によって決め

より近いほど抗力係数は大きくなり、慣性力係数は小さくなる傾向が現われている。このことから、多方向不規則波の場合には、方向分散性が大きいほど抗力係数は大きく、慣性力係数は小さくなるのが予想される。

4.3 波別解析波ごとの波力係数

方法(II)による波別解析波ごとの斜交波の波力係数の特性を検討する。図-8は、Wave Aの波高が6.5cmであり、Wave Bの各周期における波高が最も大きな3ケースに対する波力係数を示したものである。斜交波による波力係数は単一規則波によるものと比べて、KC数が5以下の場合に、単一規則波の値を中心にして大きくばらついている。このばらつきは、図-8と図-6を比較することにより、波別解析波の1波ごとの波力係数が違う

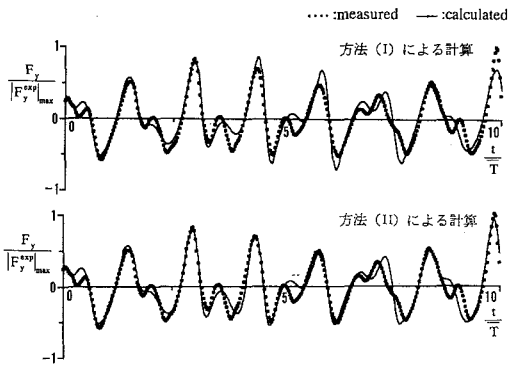


図-10 方法(I)と方法(II)による計算波力と実験結果の時間波形 ($T_A=1.1$ s, $H_A=6.5$ cm, $T_B=2.0$ s, $H_B=12.0$ cm, $\theta=30^\circ$)

表-2 波力の時間波形における計算値と実験値の相関係数 (R) と計算値と実験値の最大値の比 ($F_{max}^{cal}/F_{max}^{exp}$)

method	R		$F_{max}^{cal}/F_{max}^{exp}$	
	range	mean	range	mean
方法(I)	0.826-0.969	0.937	0.894-1.057	0.953
方法(II)	0.910-0.985	0.960	0.929-1.044	0.986

られた波力係数を用いて計算した波力と実測波力の時間波形を比較した1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には全体的にある程度合うが、極値における一致度がよくない。一方、方法(II)によって決められた波力係数を用いた場合は、極値も含めてよく一致することが認められる。方法(I)と方法(II)による波力係数を使用して計算した波力の時間波形の差異をより明確にするために、表-2に、全実験ケースに対する実測波力と計算波力の時間波形の相関係数 (R) とそれらの最大値の比 ($F_{max}^{cal}/F_{max}^{exp}$; F_{max}^{cal} と F_{max}^{exp} はそれぞれ計算値と実験値の最大波力ベクトルの大きさ)を示す。なお、相関係数は次式で定義されるものである。

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_i \{(F_{xi}^{cal} - F_{xi}^{exp})^2 + (F_{yi}^{cal} - F_{yi}^{exp})^2\}}{\sum_i (F_{xi}^{exp2} + F_{yi}^{exp2})}} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 F_{xi}^{exp} , F_{yi}^{exp} は実験波力の x, y 方向成分の時間波形の離散データ、 F_{xi}^{cal} , F_{yi}^{cal} はそれに対応する計算波力の x, y 方向成分である。表-2より、方法(II)を使用した場合の方が、相関係数と最大波力の比ともにより結果が得られている。

斜交波による波力係数は、前述したように単一規則波のものとはほぼ同じであったが、波別解析波ごとに異なる

ため、より精度高い波力を得るためには方法(II)による波力係数を使用する必要があることが指摘できる。なお、どちらの方法を使うにしても、波力における誤差は波力係数を算定するとき使った水位、流速および加速度の計算値で誤差が含まれているので、それらを精度高く表現することに問題が残される。

5. 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や波力係数の特性を水理実験結果に基づいて考察した。本研究で得られた主要な結論を以下にとりまとめる。

(1) 斜交波を形成する2つの基本波の相互干渉は、斜交波の交差角の影響を受け、それにより、最大波力も交差角の影響を受ける。

(2) 波力係数は座標系の採り方の影響をほとんど受けない。

(3) 波力係数が1つの時系列の記録の内で一定であると仮定して決められた斜交波の波力係数は単一規則波の波力係数にかなり近い値を示す。さらに、抗力係数は斜交波の交差角が小さくなるほど小さくなり、慣性力係数波はその逆の傾向を示す。

(4) 水粒子が直線運動よりも円運動に近いほど抗力係数は大きくなり、慣性力係数は小さくなる。

(5) 斜交波の波力を精度高く予測するためには、波別解析波ごとの波力係数を得るとともに、精度高い水位、流速、加速度が必要である。

最後に、本研究を行うに当たりご協力をいただいた岡田全弘君(当時、名古屋大学4年生)に謝意を表します。

参 考 文 献

富田孝史, 姜 闕求, 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, pp. 301-306.
 Issacson, M. and N. Nwogu (1988): Short-crested wave forces on a vertical pile, Proc. 7th Int' l. Conf. on Offshore Mech. and Arctic Eng. pp. 47-54.
 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.
 Morison, J. R., M. P O' Brien, J. W. Johnson. and S. A. Schaaf (1950): The forces exerted by surface wave on piles, Petroleum Trans. AIME, Vol. 189, pp. 149-157.
 Sawaragi, T. and T. Nakamura (1979): Analytical study of wave forces on a cylinder in oscillatory flow, Proc. of Coastal Structure's 79, ASCE.