

時系列特性を考慮した不規則波の波力の予測手法

——没水球体の場合——

岩田好一朗*・水谷法美**・原 基久***

1. 緒 言

構造物に作用する不規則波の波力を正確に算定することは工学上極めて重要な課題である。著者らは、これまで、没水球体に作用する波力について検討を加え(岩田・水谷, 1989), 規則波の波力係数の特性を明らかにするとともに, 不規則波の波力は, 波高や周期の変化など波の時系列特性によって大きく変化するため, 規則波に対する波力係数をそのまま使うと, 不規則波の波力の時間変化を正確に予測できず, 特に抗力が慣性力に比べて無視できない場合にその差異が大きいことを既に明らかにした(岩田・水谷ら, 1989a, 1989b)。しかし, 波の不規則性が波力に及ぼす影響, 特に波の時系列特性にともなう波力係数の変化特性は, これまで定量的には論議されておらず, 不規則波の波力の時間変化を正確に算定できないのが現状である。本研究では, 没水球体に作用する不規則波の波力に及ぼす波の時系列特性の影響を定量的に明らかにしたうえで, 波の時系特性を考慮した不規則波の波力の一予測手法を提案する。

2. 水理実験

実験は, 名古屋大学工学部土木工学科の二次元鋼製水槽(25m×0.95m×0.7m)で行われた。水槽の一端にはフラップ型不規則波造波装置が設置されており, 他端には消波装置が設置されている。

本研究では, 波力に及ぼす波高の変化の影響と周期の変化の影響を個別に定量的に評価するため, 2種類の波を生起させて実験を行った。すなわち, 式(1)で表される周期が一定で波高のみが変化する波(CASE—I)と式(2)で表される波高が一定で周期のみが変化する波(CASE—II)の2種類である。

$$\eta = (1/2)H \cdot \exp(\pm \alpha t) \cos(2\pi t/T) \cdots \cdots (1)$$

$$\eta = (1/2)H \cos(2\pi t/T), \quad T = \pm \beta t + C \cdots \cdots (2)$$

ここに, η は水位変動, H は波高, T は波の周期, α と β はそれぞれ波高と周期の変化率で符号は増大過程

の時に正, 減少過程の時に負とする。また, C は定数, t は時間である。これらの波は, パソコンで計算した時間波形の電気信号を DA 変換器を介して入力として生起させた。

実験条件は, 両ケースとも静水深 h を 70 cm で一定とし, 球径 D を 3 種類 (6.35, 2.5, 0.95 cm), 球体の設置位置 d を 4 種類 (12.5, 25, 37.5, 50 cm) 変化させた。そして, CASE—I では, 波の周期 T を 3 種類 (1.15, 1.6, 2.0 秒), 波高の変化率 α を 5 種類 (0.001, 0.005, 0.010, 0.025, 0.050), CASE—II では波高を 2 種類 (5 ~ 10 cm), 周期の変化率 β を 5 種類 (0.03, 0.04, 0.05, 0.07, 0.09) 変化させた。合計 552 ケースの実験種目に対して水位変動, x, z 方向の速流と波力の計測を行った。なお, x は波進行方向を正の向きとする水平軸, z は静水面上に原点を持ち鉛直上向きを正とする鉛直軸である。

3. 解析方法

実験で計測した水位変動, 流速と波力の時間変化の記録を時間間隔 0.05 秒で離散化し, 無次元量大波力などの無次元量と Morison 式中の波力係数をゼロ・ダウンクロス法で定義した波別解析波毎に計算した。なお, 波力係数の計算方法は最小自乗法を採用した。

波の時系列特性を, 波高の変動係数 δ_H と前後の波の波高の相関係数 γ_H , 周期の変動係数 δ_T と前後の波の周期の相関係数 γ_T で評価し(岩田・水谷ら, 1989b), 波力係数に及ぼす波高と周期の変化の影響を定量的に評価した。ついで, 時系列特性を考慮できる不規則波の波力の予測手法を提案し, 別に行った不規則波実験(岩田・水谷ら, 1989b)の結果を使って, 不規則波力の時間変化と極大波力の出現確率, および極大波力の 1/10 最大値などの平均統計量を計算した。

4. 実験結果とその考察

(1) 波高の変化の影響

(a) 慣性力係数 C_{Mx}, C_{Mz}

慣性力係数は, 二成分波の場合(岩田・水谷ら, 1989a)と同様, 波高増大過程のとき規則波の値よりも大きく,

* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 名古屋大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 五洋建設(株) 土木本部土木設計部

波高減少過程のとき規則波の値よりも小さくなる。図—1は、規則波と実験波の C_{MX} の差 C_{MX}' と δ_H の関係を γ_H をパラメーターにして示したものである。なお、ダッシュ (') は実験波と規則波の波力係数の差を示し、実験波の C_{MX} が規則波の C_{MX} より大きいときを正とする。図—1に例示したように、この規則波の値との差 C_{MX}' は、 δ_H が大きい程大きくなる。また同一の δ_H に対しては γ_H の小さい方が大きくなり、波高の変化が大きい程 C_{MX}' は大きくなることが一般的な傾向として認められた。これは、粘性抵抗など流速と位相差のある抗力成分が慣性力に含まれる割合が波高の変化が大きくなる程大きくなること、また、先行波で形成された剥離渦の影響の大きさがより大きく変化するためであると考えられる。また、 C_{MX}' は、K.C. 数、 d/h と h/gT^2 によっても変化する。同一の δ_H 、 γ_H に対しては、K.C. 数が大きい方が小さくなる。これは、非剥離域では、K.C. 数が大きくなると Re 数も大きくなり、粘性の効果が小さくなること、また、剥離域では K.C. 数が大きくなる程渦が発達し、先行波で形成された渦との差が

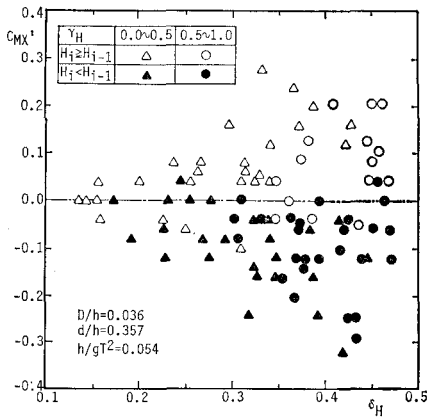
小さくなることが考えられる。また、 d/h が大きく、 h/gT^2 が小さくなり、水粒子の楕円軌道が扁平になる方が C_{MX}' は大きくなる傾向がある。

C_{MZ}' と δ_H の関係を 図—2 に示す。同 図に例示したように、 C_{MZ} の基本的な特性は C_{MX}' の場合と同様であり、波高の変化が大きいほど C_{MZ}' は大きくなる。そして、紙面の都合上 図示できないが、同一の γ_H と δ_H に対しては K.C. 数の小さい方が大きくなる (原, 1990)。

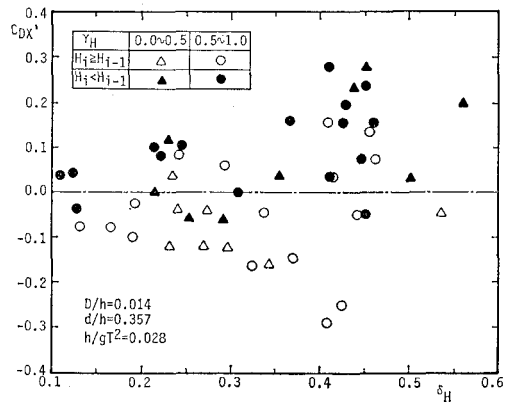
(b) 抗力係数 C_{DX} , C_{DZ}

剥離域における C_{DX} と C_{DZ} は、波高増大過程では規則波の値よりも小さく、波高減少過程では規則波の値よりも大きくなるが、非剥離域ではこれらの大小関係は逆転する。この結果も二成分波の結果と一致し、その原因として、流速と抗力の位相差や先行波の剥離渦の影響が挙げられる。そして、規則波の抗力係数との差 C_{DX}' 、 C_{DZ}' は、一例として 図—3 に示すように、 δ_H が大きく、 γ_H が小さい方が大きくなる。

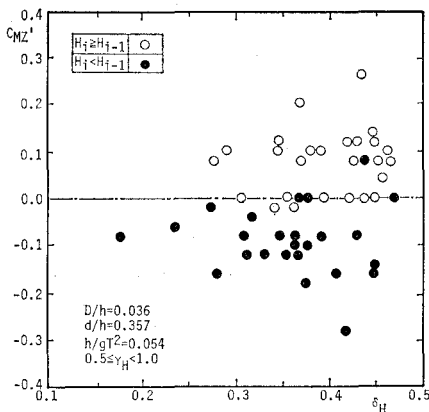
C_{DX}' と C_{DZ}' は K.C. 数によっても変化する。図—4に例示した C_{DX}' と K.C. 数の関係からも認められる



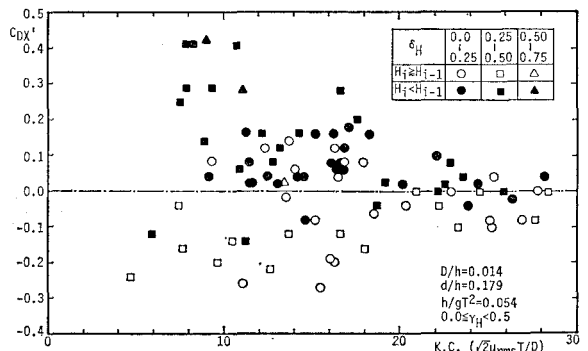
図—1 C_{MX}' と δ_H の関係



図—3 C_{DX}' と δ_H の関係



図—2 C_{MZ}' と δ_H の関係



図—4 C_{DX}' と K.C. 数の関係

ように, K.C. 数が約20前後になると実験波と規則波との差はかなり小さくなる. これは, この範囲では, 剝離渦がかなり発達しており, 先行波の渦の効果は波高が変化してもあまり抗力係数に影響を及ぼさないためであると考えられる. また, h/gT^2 が小さい方が, $C_{DX'}$ と $C_{DZ'}$ は小さくなる傾向があるが, d/h の効果は明瞭ではない.

(2) 周期の変化の影響

(a) 慣性力係数

CASE-II の実験波の C_{MX} と K.C. 数の関係を図-5 に示す. C_{MX} は周期増大過程では規則波の値よりも大きく, 周期減少過程では小さくなる. これは, 波高が一定で周期が変化する場合も CASE-I の場合と同様, 流速と加速度の相対的な大小関係が変化し, 流速と位相差のある抗力成分の影響の程度が変化するためである.

図-6 は周期増大過程の波に対する $C_{MX'}$ と δ_T の関係を示したものである. 実験値はばらついているため, γ_T の効果は明瞭ではないが, 周期の変化が大きくなる程 $C_{MX'}$ は大きくなるといえる.

この結果は, 図示しないが C_{MZ} の場合も同様であり, 周期の変化が慣性力係数に大きく影響を及ぼすことが解明された.

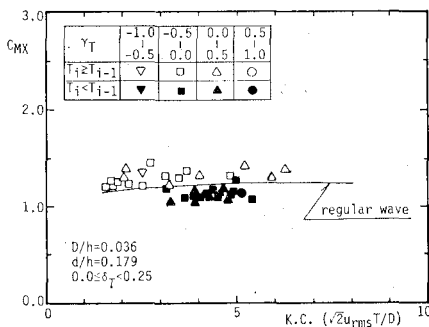


図-5 C_{MX} と K.C. 数の関係

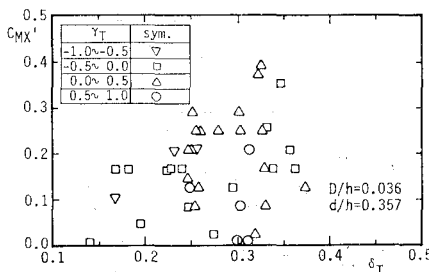


図-6 $C_{MX'}$ と δ_T の関係

(b) 抗力係数

抗力係数 C_{DX} , C_{DZ} は, 剝離渦の影響がほとんどない K.C. 数が約5より小さい範囲では, 規則波の場合と同様 (岩田・水谷, 1989), h/gT^2 によって大きくば

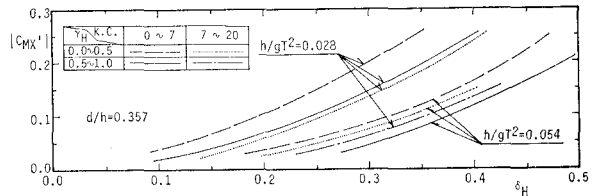


図-7 $|C_{MX}'|$ と δ_H の関係 (実験曲線)

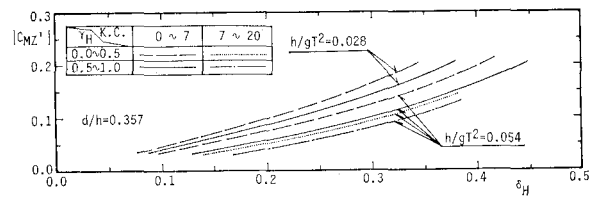


図-8 $|C_{MZ}'|$ と δ_H の関係 (実験曲線)

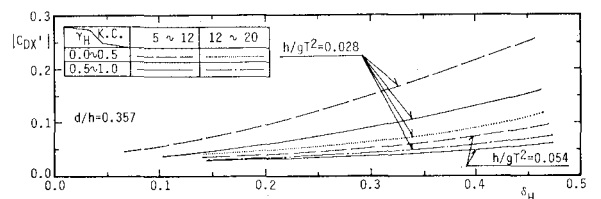


図-9 $|C_{DX}'|$ と δ_H の関係 (実験曲線)

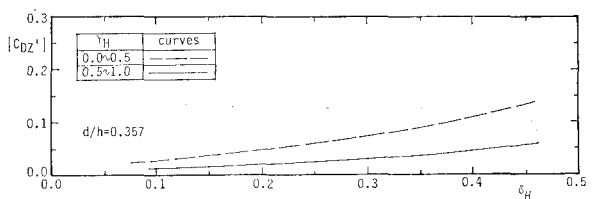


図-10 $|C_{DZ}'|$ と δ_H の関係 (実験曲線)

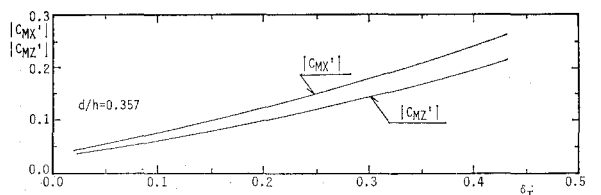


図-11 $|C_{MX}'|$, $|C_{MZ}'|$ と δ_T の関係 (実験曲線)

らつき、周期の変化が抗力係数に及ぼす効果は明瞭でなかった。この範囲では、慣性力が支配的であるため、抗力係数の変化が全波力に及ぼす効果は非常に小さい。また、剥離渦は、K.C. 数に大きく支配されるが、波高が一定のもとでは周期が変化しても、引き続き波の K.C. 数はあまり変化しない。このため、剥離が始まる K.C. 数が 5 から 10 以上では、周期の変化が抗力係数に及ぼす効果はほとんどないと考えられる。紙面の都合上図示できないが、K.C. 数が約 5~10 以上では、抗力係数は周期の増大・減少過程に関係なくほぼ規則波の値に近いことが実験からも確認され（原，1990），周期の変化による抗力係数の変化は実用上考慮しなくともよいといえる。

(3) 不規則波力の予測手法

前節までで論議した結果にもとづき、波力係数の変化量 C_{MX}' , C_{MZ}' , C_{DX}' と C_{DZ}' の平均値を求めると、図-7~11 をうる。ただし、これらの値は、波高および周期の増大過程と減少過程では、絶対値は一致するとみなせるため、図では絶対値のみを示した。また、K.C. 数が 20 以上になると抗力係数が慣性力に対して卓越し、慣性力係数の変化が全波力に及ぼす影響は小さいため、 C_{MX}' と C_{MZ}' については K.C. 数が 20 以下の範囲について示した。また、同様に、K.C. 数が約 5 以下では抗力は慣性力に比べて非常に小さいため、 C_{DX}' と C_{DZ}' については K.C. 数が 5 以上の範囲について示した。なお、周期の変化が抗力係数に及ぼす効果は小さいため、考慮しなくともよい。これらの図から、波高が変化した場合や周期が変化した場合の波力係数の変化量が評価できることになる。

つぎに、実際に不規則波力の予測手法について論議する。不規則波の水位変動が与えられれば、波別解析波毎に波別解析波と同じ波高と周期を持つ規則波に対する波力係数を岩田・水谷の結果（1989）から求めることが可能である。また、 γ_H , γ_T , δ_H と δ_T および K.C. 数などから図-7~11 を使って、波高と周期の変化にともなう波力係数の変動量も与えられる。しかし、実際の不規則波は、波高と周期が同時に変化するため、波高の変化量と周期の変化量を同時に考慮する必要がある。

CASE-I の波に対する速度ポテンシャル ϕ は次式で与えられる。

$$\phi = \frac{Hc}{2} \frac{\cos(\alpha+i)k(h+z)}{\sin(\alpha+i)kh} e^{(\alpha+i)k(x-ct)} \quad \dots\dots (3)$$

ここに、 k は波数、 c は波速で、 k と c は $c^2(\alpha+i)k = g \tan(\alpha+i)kh$ を満たす。また、 g は重力加速度、 i は虚数単位、 x は波進行方向を正の向きとする水平軸、 z は静水面上に原点を持ち、上向きを正とする鉛直軸である。

式（3）を使うと、波別解析波の加速度と流速の振幅の比は次式で与えられる。

$$\dot{u}_m/u_m = \dot{w}_m/w_m = \sqrt{\sigma^2 + \alpha^2} \quad \dots\dots (4)$$

上式より、波高の変化は α の項に含まれると考えられる。一方、CASE-II の波の速度ポテンシャルは非常に複雑であり、式（3）のような簡単な形で表現できないが、式（4）のような形で加速度と流速の比が表現できると仮定すれば、 σ の項に周期の変化の影響が含まれると考えられる。そこで、波高と周期が同時に変化する場合の慣性力係数の補正方法として式（5）を採用した。

$$C_{MX} = (C_{MX})_r \pm \sqrt{[\pm(C_{MX})_r]^2 \pm (C_{MX}')H^2} \quad \dots\dots (5)$$

ここに、添字 r は規則波の値を示し、 H と T はそれぞれ波高の変化と周期の変化にともなう変化量であることを示す。また、根号の中の符号は、波高、及び周期が増大過程のとき正、減少過程のとき負の値をとり、根号の外の符号は、絶対値の中の符号と一致させるものとする。 C_{MZ} も同様に計算できる。

一方、抗力係数の場合は、波高の変化だけを考慮すればよいので、次式から求めることができる。

$$C_{DX} = (C_{DX})_r \pm (C_{DX}')H \quad \dots\dots (6)$$

なお、符号は、波高増大過程のとき負、波高減少過程のとき正であり、 C_{DZ} も同様に計算できる。

式（5）と式（6）から計算した波力係数を使って計算した不規則波力の時間変化の例を図-12 に示す。なお、計算は、第 3 波目から行った。規則波に対する波力係数は、岩田・水谷（1989）の値を使ったが、 h/gT^2 が異なる波に対する値は、内挿および外挿によって求めた。また、流速と加速度は実測の流速とそれから求めた加速度を使用した。図-12 より、規則波の波力係数をそのまま使用した場合でも実測波力と計算波力の対応は良好であるが、本研究で新たに提案した補正方法を採用した場合は、より実測波力に近いことが明らかであり、時系列特性を考慮することにより、不規則波力をさらに正確に予測できるようになったといえる。

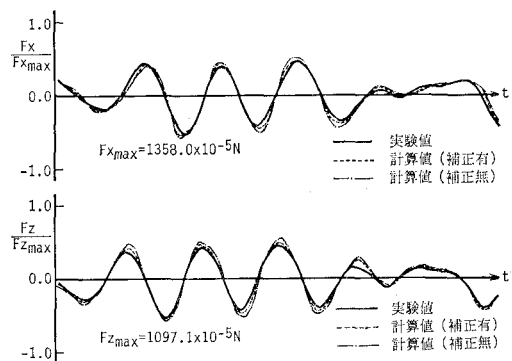


図-12 波力の時間変化の比較例

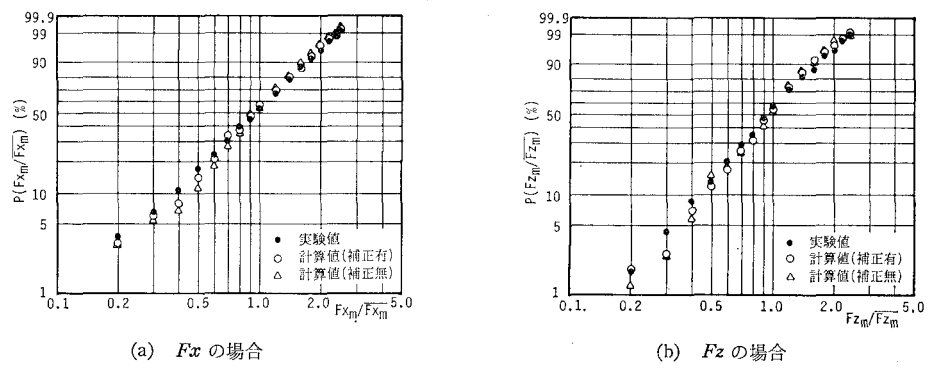


図-13 極大波力の出現確率の比較例

表-1 極大波力の比較例

極大波力 ($\times 10^{-5} \text{N}$)	RUN-1B			RUN-6A		
	実測値	計算値 (補正有)	計算値 (補正無)	実測値	計算値 (補正有)	計算値 (補正無)
$(Fx_m)_{1/10}$	850.4	877.1	794.0	1108.0	1105.7	1132.4
$(Fx_m)_{1/3}$	680.2	697.3	648.3	857.4	868.4	893.4
$(Fx_m)_{\text{ave}}$	433.7	442.5	430.0	553.4	560.9	559.2
$(Fz_m)_{1/10}$	625.3	647.0	655.9	763.0	795.0	828.4
$(Fz_m)_{1/3}$	485.9	536.1	544.4	574.6	617.3	634.5
$(Fz_m)_{\text{ave}}$	331.9	372.4	374.3	380.4	417.0	430.6

つぎに、1/10 最大値などの平均統計量の予測に極めて重要な、極大波力の出現確率について論議する。図-13 に例示したように、本手法を採用すると、極値の出現分布も全体的に実測波力の出現確率に近いことがわかる。そして、その結果、極大波力の 1/10 最大値、1/3 最大値や平均値のような平均統計量も、表-1 に示すように、かなり正確に予測できる。したがって、本研究で提案した予測手法を採用することにより、時系列特性を考慮しない場合に比べて、不規則波力をより高精度に予測できることが指摘できる。

5. 結 論

以上、本論では、波の時系列特性が波力係数に及ぼす効果を明らかにし、波の時系列特性を考慮した不規則波の波力の一予測手法を提案した。本論で得られた結論を以下に要約する。

(1) 慣性力係数は、波高、および周期の変動にともない規則波に対する値から変化し、その変化量は波高、および周期の変化が大きい程大きくなる。一方、抗力係数は、波高の変動にともなって規則波に対する値から変化し、その変化量は波高の変化が大きい程大きくなるが、周期の変動が抗力係数に及ぼす効果は小さく、規則

波に対する値との差は非常に小さい。

(2) 波高増大過程と波高減少過程の波、および周期増大過程と周期減少過程の波の波力係数の規則波に対する値からの偏差特性と支配無次元物理量を明らかにし、その偏差を、 δ_H と γ_H 、 δ_T と γ_T 、および K.C. 数、水深波長比と相対設置水深の関数として図式化した。

(3) 本研究で提案した手法を採用すると、規則波の波力係数をそのまま使用する方法に比べて実測の不規則波力の時間変化や極大波力の 1/10 最大値、1/3 最大値と平均値のような平均統計量などもより正確に予測できる。

参 考 文 献

岩田好一朗・水谷法美 (1989)：没水球体に作用する波力の特性に関する研究，土木学会論文集，第405号/II-11，pp. 215～224。
岩田好一朗・水谷法美・都築克嘉 (1989a)：没水球体に作用する二成分波の波力の特性，土木学会論文集，第411号/II-12，pp. 177～186。
岩田好一朗・水谷法美・都築克嘉 (1989b)：没水球体に作用する不規則波の波力の特性，土木学会論文集，第411号/II-12，pp. 207～216。
原 基久 (1990)：没水球体に作用する不規則波の波力の予測手法に関する研究，名古屋大学修士論文，23 p。