

小口径円柱に作用する多方向不規則波の波力と 波力算定式に関する実験的研究

ESTIMATION METHOD AND CHARACTERISTICS OF WAVE FORCE ON A SMALL-DIAMETER CYLINDER IN DIRECTIONAL WAVES

水谷法美¹・吉田幸一²・栗本あかね³・川嶋直人⁴・岩田好一朗⁵
Norimi MIZUTANI, Yukikazu YOSHIDA, Akane KURIMOTO, Naoto KAWASHIMA
and Koichiro IWATA

¹正会員 工博 名古屋大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²学生会員 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 (同上)

³正会員 日本電気㈱ (〒108-8001 東京都港区芝5-7-1)

⁴正会員 中部電力㈱電力技術研究所 (〒459-8522 名古屋市緑区大高町字北関山20-1)

⁵フェロー 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Wave forces on a vertical cylinder in directional waves have been investigated. Morison equation has been utilized to express the wave force. In directional waves, the effect of the lift force may dominate over the drag and inertia forces when one component of the horizontal water particle motion dominates over the other one. Under such conditions, the Morison equation is confirmed to be less accurate in estimating the wave force. The effect of the lift force, however, becomes less important in estimating the wave force acting on a whole cylinder. This paper shows that the wave force on the cylinder can be evaluated with the drag and inertia coefficients obtained in this study. Moreover, it is confirmed that the wave forces in directional waves, for a given magnitude of the velocity, is larger than that of the uni-directional waves. Thus, effect of the directional spreading should be properly considered in the estimating the wave force.

Key Words : Directional waves, circular cylinder, wave force, Morison equation,

1. 緒言

海岸・海洋構造物の設置水深の増大とともに波の多方向性の影響が重要になる。また、日本沿岸での設計波は、通常、台風時や冬季の季節風による暴浪であり、最盛時は短波峰性の波である。したがって、波の多方向性が構造物の耐波安定性に及ぼす影響を十分検討しておく必要がある。小口径円柱に作用する多方向不規則波の波力の特性はこれまでもいくつか行われてきており、一般に、多方向不規則波による小口径円柱の作用波力は一方向不規則波の波力に比べて小さく、一方向不規則波の設計は安全側になることが指摘されている¹⁾⁴⁾。一方、著者らは、波高で無次元化した波力は従来の成果と同様、多方向不規則波の方が一方向不規則波の値よりも小さくなるが、流速を基準に作用波力を比較すると、多方向不規則波の方が一方向不規則波よりも大きくなることを明らかにしている⁵⁾。しかし、彼らの行った実験範囲は、比較的KC数が小さく慣性力が卓越した

範囲に限られている。台風や季節風による暴浪時には抗力が卓越する場合も十分考えられ、したがって、抗力が有意な大きさとなる場合の多方向不規則波の波力特性についても十分に検討しておく必要がある。

本研究は、これまでよりKC数の大きな範囲を対象に、直立円柱に作用する全波力と部分波力を水理実験によって計測し、波力に及ぼす波の多方向性について考究するものである。

2. 水理実験

実験を、中部電力㈱電力技術研究所所有の平面水槽（長さ30m、幅23m、深さ1.2m）で行った。水槽の一端には、幅0.5mの独立した駆動系を有するピストン型造波装置41台から構成されるスネーク式多方向造波装置が設置されており、他の三面には反射波を極力小さくするために砕石による消波装置が設置されている。

実験では、全波力、部分波力、および流速の3回に分けて計測を行った。直径 $D=4\text{cm}$ のアクリル製円柱模型を使用し、まず、 x 、 y 方向の全波力 F_x と F_y を水槽上部の台車に固定した三分力計（KYOWA LSM-5KBS）に円柱模型を取り付けて計測した。ついで、小口径円柱のセグメントに作用する x 、 y 方向の部分波力 dF_x と dF_y を、図-1に示す円柱模型の3カ所（静水面下15.0、25.0、45.0cm）に高さ $dz=2\text{cm}$ の部分波力計をセットして同時に計測した。この際、円柱は台車に直接固定されている。部分波力計はキャンチレバー式であり、その詳細は図-1に示すとおりである。さらに部分波力計中心位置の x 、 y 方向流速 u と v を3台の電磁流速計を使用して計測した。なお、 x と y はそれぞれ造波装置に垂直と平行な水平軸である。

実験では、静水深 h を70cmで一定とした。作用波の有義波高を3種類（ $H_{1/3}=8, 10, 12\text{cm}$ ）、有義波周期を3種類（ $T_{1/3}=1.2, 1.6, 2.0\text{s}$ ）、方向集中度パラメータを4種類（ $S_{\text{max}}=10, 25, 75, 999$ ）変化させた。なお、これらの条件は著者らの行った実験⁹⁾と同じである。

いずれの実験でも、円柱前面10cmの固定点で水位の計測を行うと同時に、波高計4本からなる星型波高計アレイ2台による発生波の計測も行った。

計測した水位、流速、全波力、部分波力の時間波形は、計測と同時にサンプリング間隔50msで離散化し、各成分とも4096個のデータを光磁気ディスクに記録した。

解析では、個別に行った計測結果を円柱前面における水位変動の時間波形にもとづいて位相を合わせ、その後の計算を行った。

3. 極大波力の特性

図-2に部分波力の1/3最大値を有義波高で無次元化した $dF_{x1/3}/\rho g H_{1/3} D^2$ 、 $dF_{y1/3}/\rho g H_{1/3} D^2$ と S_{max} の関係

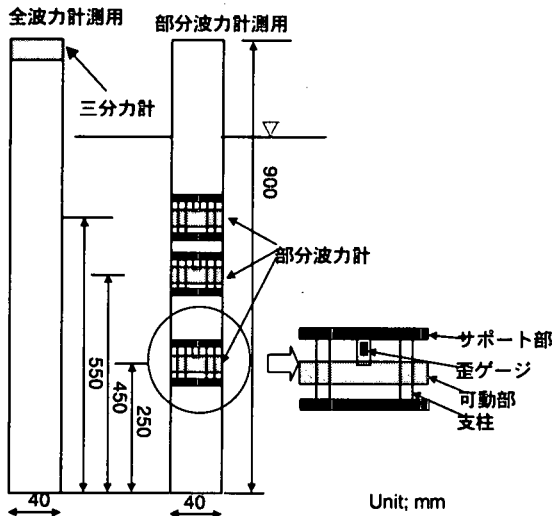


図-1 波力計測円柱の概略図

を例示する。図より、 S_{max} の増加とともに y 方向の水粒子の運動は小さくなるため、 $dF_{y1/3}/\rho g H_{1/3} D^2$ は減少する。一方、 $dF_{x1/3}/\rho g H_{1/3} D^2$ は図-2に例示するように、 $S_{\text{max}}=75$ で若干減少するものの、従来と同様、一方向波である $S_{\text{max}}=999$ で値は大きくなっており、一方向不規則波の波力が多方向不規則波の場合よりも大きくなる傾向が認められた。

これに対して、1/3最大波力を流速の1/3最大値を使って無次元化した場合の結果を図-3に示す。同図に例示するように、主波向きの値 $dF_{x1/3}/\rho u_{1/3}^2 D dz$ は、 S_{max} が小さくなるほど、換言すれば方向分散性が大きくなるほど大きくなる傾向が一般的に認められた。この結果は、同じ流速に対する波力は多方向不規則波の方が一方向不規則波よりも大きくなることを示すもので、KC数の比較的小さい範囲で行った著者らの結果⁹⁾と同様である。これは、多方向性が強くなると、同一の u に対して v が大きくなり、流速ベクトルの大きさは大きくなる。そのためこのような結果になったと考えられる。なお、流速ベクトルの大きさの効果は、Morison式から判断すれば抗力により強く現れることが予想される。したがって、 S_{max} にともなう無次元波力の変化はKC数の大きい本実験の方が従来の実験結果よりも強く現れることが予想されたが、むしろ本実験の方が S_{max} にともなう無次元波力の変化は小さかった。これは、抗力とともに成長する揚力の影響によると考えられる。

一方、 y 方向の値 $dF_{y1/3}/\rho v_{1/3}^2 D dz$ は S_{max} の増加とともに増大する。 S_{max} が大きくなるにともない v は

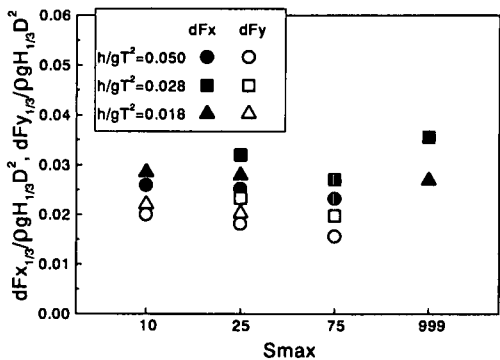


図-2 無次元部分波力と S_{max} の関係（波高で無次元化）

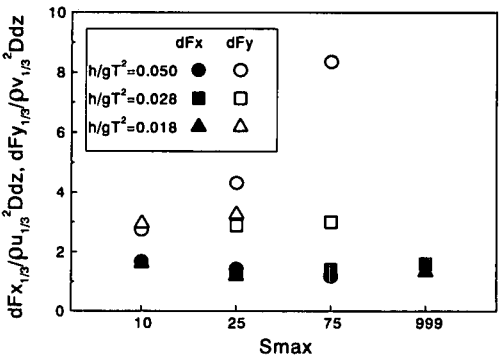


図-3 無次元部分波力と S_{max} の関係（流速で無次元化）

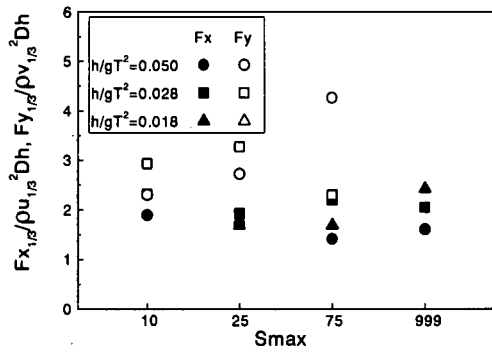


図-4 無次元全波力とSmaxの関係（流速で無次元化）

小さく、逆に u は相対的に大きくなる。すなわち、 y 方向波力に占める揚力の影響が S_{max} が大きくなると大きくなる。これに対して、分母の v は小さくなるため、図示した結果となったものである。

図-4は 図-3と同様の整理を全波力に対して行った結果である。ただし、無次元化の際の流速は最も自由表面に近い $d/h=0.214$ の値を使用した。部分波力の場合と同様、 S_{max} の減少とともに、わずかながら主波向き方向の無次元波力は増大する傾向が認められる。したがって、全波力の場合も、与えられた流速に対しては多方向不規則波の方が一方向不規則波よりも波力は大きくなるといえる。以上より、波力算定には波の多方向性の影響を考慮する必要があることが指摘できる。

4. 波力算定式

(1) Morison式

高さ dz の円柱セグメントに作用する部分波力にMorison式を適用すると、以下のように表示できる。

$$dF_x = \frac{1}{2} C_{Dx} \rho D u \sqrt{u^2 + v^2} dz + \frac{1}{4} C_{Mx} \rho \pi D^2 \ddot{u} dz \quad (1)$$

$$dF_y = \frac{1}{2} C_{Dy} \rho D v \sqrt{u^2 + v^2} dz + \frac{1}{4} C_{My} \rho \pi D^2 \ddot{v} dz \quad (2)$$

ここに、 C_{Dx} と C_{Dy} は抗力係数、 C_{Mx} と C_{My} は慣性力係数である。

計測した流速 u と v 、およびそれらに数値微分に相当する数値フィルターをかけて求めた加速度を式(1)と式(2)に代入して求められる計算波力が、実験値に最もよく合うよう、最小自乗法により抗力係数と慣性力係数を決定した。なお、この際、円筒前面での水位変動にゼロダウクロス法を採用して定義した波別解析波毎の値（手法-I）と時系列全体に対する値（手法-II）の2種類の係数を計算した。

ところで、Morison式は、作用波力を抗力と慣性力の和で表した式であるが、多方向不規則波動場の水粒子の水平面内の運動は二次元であり、したがって x 、 y 方向のいずれの波力にも常に揚力が含まれることになる。この揚力が抗力や慣性力よりも大きくなるとMorison式による計算波力の精度は悪くなることが予想される。したがって、Morison式の適用

性を検討しておく必要がある。

本研究では、岩田・水谷⁷⁾が没水球体の作用波力に対して検討した手法と同様、次式の相関係数を計算し、その特性も合わせて検討することとする。

$$Cr = \sqrt{1 - \{[F_{cal.}(t) - dF_{exp.}(t)]^2 / dF_{exp.}(t)^2\}} \quad (3)$$

ここに、 $F_{cal.}$ と $F_{exp.}$ はそれぞれ波力の計算値と実験値である。

一方、全波力は部分波力の式(1)と式(2)を水底面から自由表面まで積分する事により求められるが、簡単のため積分の上限を静水面で近似すると、全波力は次式で表せる。

$$F_x = \frac{1}{2} C_{Dx} \rho D \int_{-h}^0 u \sqrt{u^2 + v^2} dz + \frac{1}{4} C_{Mx} \rho \pi D^2 \int_{-h}^0 \ddot{u} dz \quad (4)$$

$$F_y = \frac{1}{2} C_{Dy} \rho D \int_{-h}^0 v \sqrt{u^2 + v^2} dz + \frac{1}{4} C_{My} \rho \pi D^2 \int_{-h}^0 \ddot{v} dz \quad (5)$$

しかし、水粒子速度の鉛直分布を計測していないため、式(4)と式(5)の積分を実行することはできない。そこで、本研究では、波力により影響の強い自由表面に近い $d/h=0.214$ における流速と加速度が全円柱に作用すると仮定し、部分波力と同様に波力係数を計算した。また、全波力についても、式(3)の相関係数の計算を行った。

(2) Morison式の適用性

没水球体に作用する鉛直方向波力に対するMorison式の適用性が岩田・水谷によって検討されている⁷⁾。これによると、鉛直方向流速の振幅が水平方向流速の振幅の1/3以下になるとMorison式の精度が悪くなり、実用上Morison式を使用できないとしている。本研究でも水平二成分の流速の振幅比は揚力と抗力・慣性力の相対的な大きさを支配する重要な物理量と考えられるため、図-5と図-6に示す流速比にともなう相関係数 Cr_x と Cr_y の変動特性を検討する。

本実験では、主波向きを x 方向に固定しているため、 x 方向の水粒子の運動が一般的に卓越する。このため、全般的に v_m/u_m は1より小さく、 dF_y に対して揚力の影響が大きくなり、Morison式の精度はあまり良くない（図-6）。一方、図-5に示す dF_x に対してもMorison式の精度は u_m/v_m が小さくなると良くない場合が多くなる。特に、 $KCx (=u_m T/D)$ の小さい場合に精度が良くない場合が多い。

全波力に対する相関係数 Cr_x と流速比 u_m/v_m の一例を図-7に示す。流速比が小さく、しかも KC 数の小さい場合に相関係数が小さくなり、Morison式の精度が悪くなるのは部分波力と共通の結果である。しかし、図-5の部分波力の場合に比べて全般的に相関係数はよくなっていることがわかる。これは、多方向不規則波の場合、 u と v はともに鉛直方向に変化するため揚力の作用状況が鉛直方向に変化する。このことは、全波力に対しては互いに打ち消し合う揚力が存在する可能性を示しており、部分波力のような局所的な波力に対しては揚力は大きく影響を及ぼすが、全波力に対してはその影響の度合いは小さくなることを示す。

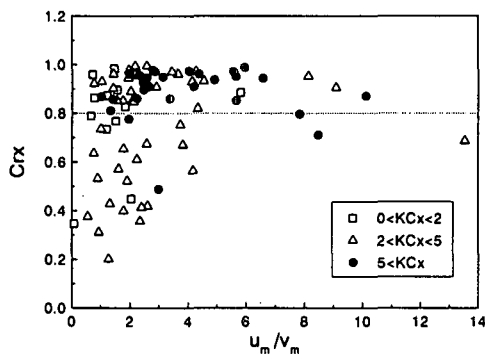


図-5 部分波力のCrxと u_m/v_m の関係

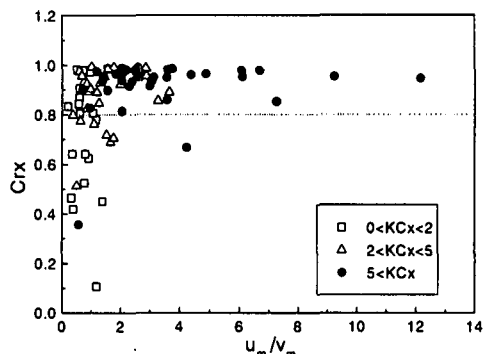


図-7 全波力のCrxと u_m/v_m の関係

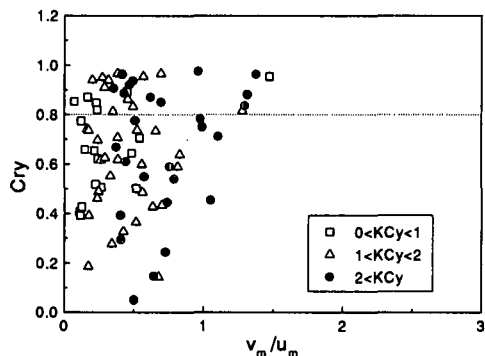


図-6 部分波力のCryと v_m/u_m の関係

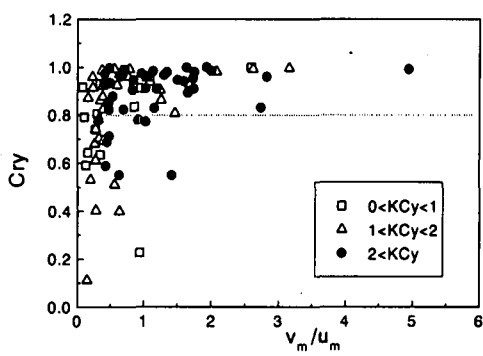


図-8 全波力のCryと v_m/u_m の関係

Fyに対する相関係数Cryを図-8に示す。Fxの場合と同様、Morison式の精度は全波力の方がよくなっていることが確認できる。

以上より、部分波力に対しては、揚力の影響が大きくなりやすく、したがって直交する流速成分が卓越する場合はMorison式の波力予測精度は悪くなりやすい。しかし、全波力に対しては、揚力の影響は相対的に小さくなるため、部分波力に比べてMorison式の予測精度は良いが、流速比が小さいとMorison式の精度は悪い場合が存在することには変わりない。ただし、Morison式の精度が悪くなりやすいのは、KC数の小さい場合が多く、したがって、波力の絶対値も大きくない場合が多い。したがって、Morison式の精度が全体の波力の予測に及ぼす影響は小さいと予測される。この点については時間波形の予測のところで後述することとする。

5. 波力係数の特性

Morison式を使用する際、波力係数の適切な評価が重要である。そこで、手法-Iによる抗力係数と慣性力係数の特性を検討しておく。

図-9～12に部分波力に対する波別解析波の波力計数とKC数の関係を例示する。なお、ここでは、最も多方向性の強い $S_{max}=10$ の場合を例示している。ただし、いずれの係数にも相関係数の良くない場合のものがいくつか含まれており、それらは工学上意味がないと判断できるので、相関係数が0.8以上の

値のみを図示してある。

図より、x方向ではKCxが6以下程度の低KC数領域ではばらつきがあるものの、KCxが大きくなるとともに一定値に近づき、その値は慣性力係数が約2.0、抗力係数も約2.0程度と見なせる。これらの値は、一方向波に対して一般に推奨されている $C_M=2.0$ 、 $C_D=1.0$ に対して抗力係数が特に大きい値になっている。このことは、多方向不規則波の波力が一方向不規則波の波力よりも大きくなる原因として流速ベクトルの大きさが大きくなるために抗力が大きくなることと定性的に一致した結果であるといえる。

一方、y方向は全般的に波力係数の値が大きいが、全体的な傾向やKCy ($=v_m T/D$) が大きくなったときの収束値にx方向と明瞭な差はない。また、紙面の都合上図示していないが、 S_{max} による値の差は特に無いようであった。

ところで、工学上、波力係数は一つの時系列に対して一定であることが望まれる。そこで、手法-IIで求めた抗力係数と慣性力係数のうち、x方向に対する値を図-13と14に例示する。KCxが小さい範囲で多少のばらつきがあるものの、慣性力係数は1.5～2.0付近に集中している。一方、抗力係数はKCxの小さい範囲でばらつきが大きい、KCxの増加とともに約2.0に収束する傾向がある。これらの値は、波別解析波の値とほぼ同様の傾向である。ただし、一つの時系列に対する代表値は、その時系列に含まれる波別解析波の比較的大きなKC数の範囲の値に近いことを確認している。図示していないが、同様の結果がy方向の波力係数に対しても認められている。

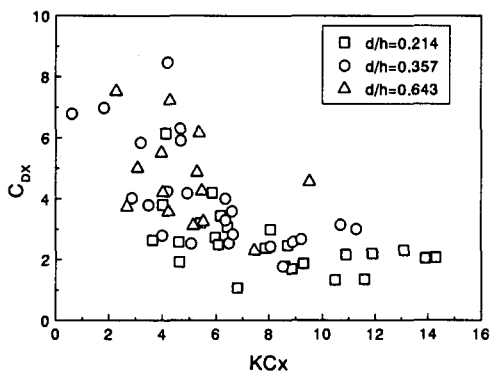


図-9 部分波力の C_{DX} と KCx の関係の例 (手法-I)

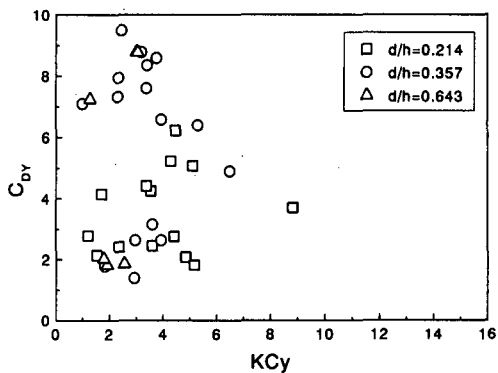


図-10 部分波力の C_{DY} と KCy の関係の例 (手法-I)

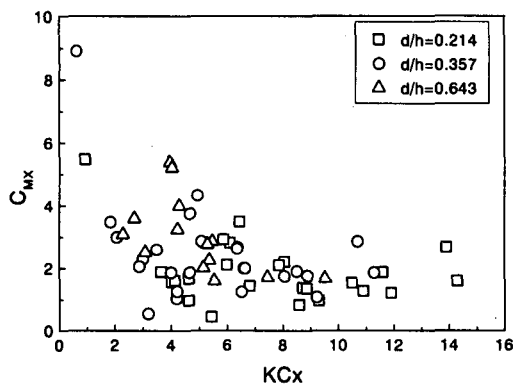


図-11 部分波力の C_{MX} と KCx の関係の例 (手法-I)

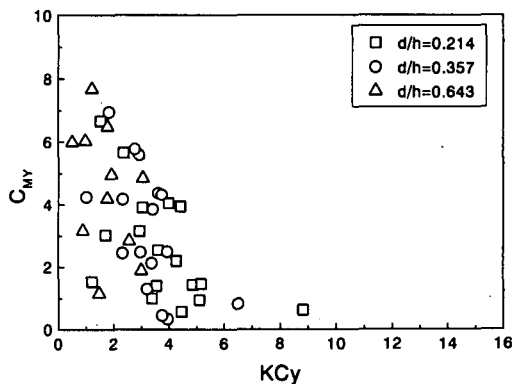


図-12 部分波力の C_{MY} と KCy の関係の例 (手法-I)

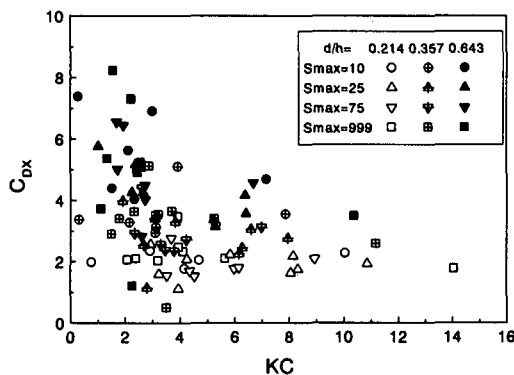


図-13 部分波力の C_{DX} と KCx の関係 (手法-II)

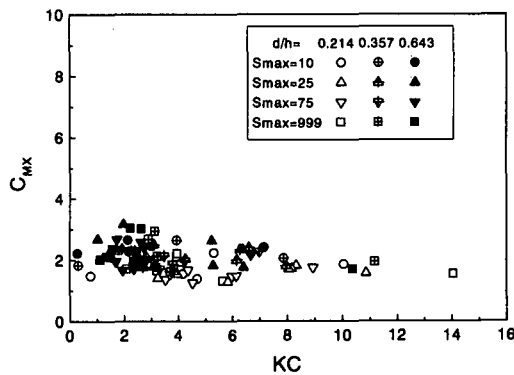


図-14 部分波力の C_{DY} と KCy の関係 (手法-II)

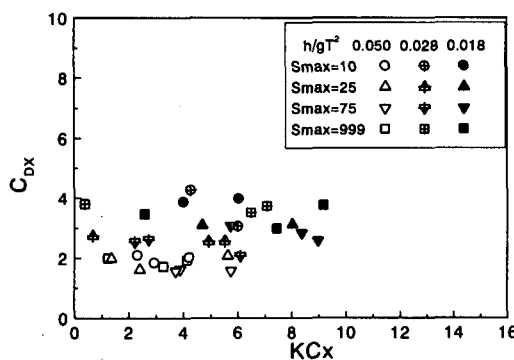


図-15 全波力の C_{DX} と KCx の関係 (手法-II)

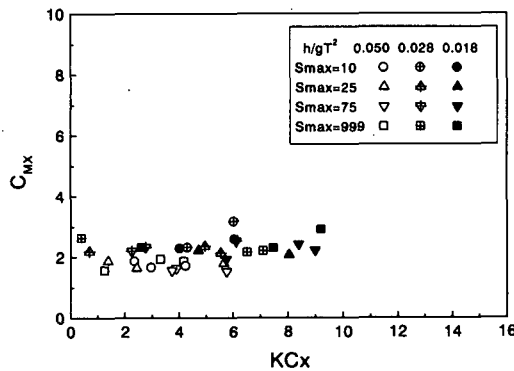


図-16 全波力の C_{DY} と KCy の関係 (手法-II)

ただし、 y 方向の値は S_{max} が大きくなるにしたがい、換言すれば、方向集中度が高くなると値のばらつきが大きくなる傾向がある。

図-15と図-16に手法-IIで求めた全波力に対する抗力係数と慣性力係数を示す。同一の KC 数で比較すると、部分波力に対する値に比べてばらつきが小さくなっていることが確認できる。この一原因としては、揚力の影響が部分波力よりも全波力には小さくなることが挙げられる。しかし、全波力に対する値は抗力係数、慣性力係数ともに平均的な値よりも若干小さめの値であるとみなせる。

図-17と図-18にそれぞれ手法Iと手法IIによる波力係数と $d/h=0.214$ における流速と加速度を使用して計算した全波力の計算値を実験値と比較した結果を示す。

両図とも計算値と実験値の間に若干の差異は認められるが、大略両者は一致しているとみなせよう。相関係数は波高の小さい波で小さくなることを記述したが、その影響は計算波力には大きく現れていない。また、全般的には手法IIに比べて波毎に波力係数を決める手法IIの方が実験値との対応は良いが、手法IIによる計算も部分的に波力を過大評価する傾向があるが、ほぼ妥当に実験値を再現しているといえる。したがって、手法IIによる波力係数と自由表面に近い位置での流速と加速度の時間波形から波力は予測可能であるといえる。ただし、本研究では、流速の鉛直方向の変化を考慮していないが、正確に鉛直方向の分布が考慮できた場合は波力係数にも若干の差は生じる。したがって、全波力に対する抗力係数と慣性力係数のより詳細な値に関してはさらに検討が必要であるといえる。

6. 結論

以上、本研究では、従来よりも KC 数の大きい範囲を対象に多方向不規則波による小口径円柱の波力について検討を加えた。本研究の主要な成果を以下に要約する。

- 1) 同じ流速の振幅に対しては、多方向性が強いほど主波向きの波力は大きくなり、その直交成分は小さくなる。
- 2) 互いに直交する方向の水粒子の運動が卓越する場合、直方向力である抗力と慣性力よりもそれに直交する水粒子の運動による揚力が卓越するため、Morison式の精度が悪くなる。この揚力の影響は部分波力に対して強く現れる。

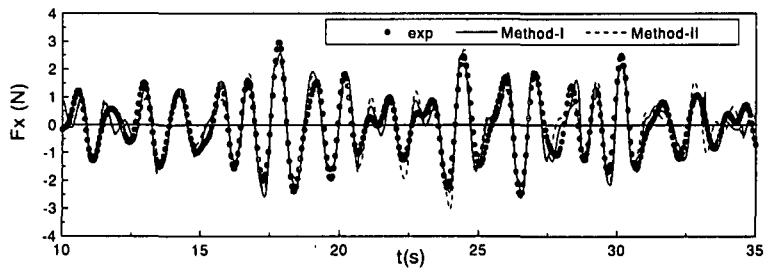


図-17 F_x の比較例

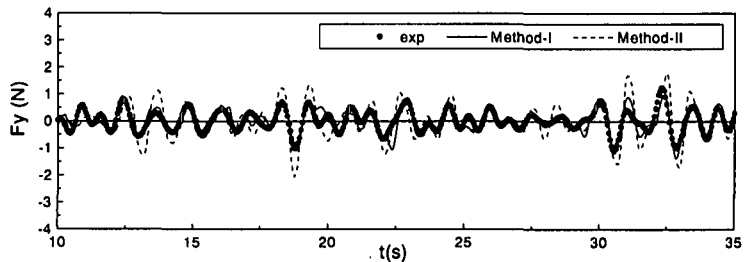


図-18 F_y の比較例

- 3) Morison式の適用が可能な場合、慣性力係数はほぼ2.0前後の値に、抗力係数は約1.5~2.0前後の値に収束する。多方向不規則波では特に抗力係数が大きくなる。

参考文献

- 1) Chaplin, J.R., Subbiah, K. and Irani, M. : Loading on a vertical cylinder in multidirectional waves, Jour. of Offshore Mech. and Arctic Eng., Vol.117, No.3, pp.151-158, 1995.
- 2) Hogedal, M., Skourup, J. and Burcharth, H.F. : Wave forces on a vertical smooth cylinder in directional waves, Proc. 4th ISOPE, Vol.3, pp.218-224, 1994.
- 3) 富田孝史・姜閔求・倉田克彦・岩田好一朗：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，第41回海岸工学論文集，pp.846-850，1994.
- 4) 平石哲也・富田康大・鈴木康正：円柱波力における波の多方向性の影響，第41回海岸工学論文集，pp.836-840，1994.
- 5) 水谷法美・藤岡丈夫・渡辺増美・岩田好一朗：小口径円柱に作用する多方向不規則波の波力と波力係数に関する実験的研究，第43回海岸工学論文集，pp.866-870，1996.
- 6) Morison, J.R., O'Brien, M.P., Johnson, J.W. and Schaaf, S.A. : The forces exerted by surface wave on piles, Petroleum Trans. AIME, Vol.189, pp.149-157, 1960.
- 7) 岩田好一朗・水谷法美：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/II-11号，pp.215-224，1989.

(1999. 4. 19受付)