

大波浪海域における海洋構造物の実海域実験

——円柱部材の作用波力について——

谷野 賢二*・平沢 充成*・角野 隆**

1. ま え が き

従来厳しい波浪条件が制約となって利用密度が低かった外洋域を積極的に活用していくためには、大波浪条件下における海洋構造物建設技術の確立が第一に必要である。このような背景から北海道開発局では、科学技術振興調整費による「海洋構造物による海洋空間等の有効利用に関する研究」の一環として、「大波浪海域における海洋構造物の実海域実験研究」を実施した。本報は、この研究の重点項目のひとつで、既往の大波浪条件下における観測値が少ない海洋構造物の円柱部材に作用する波力データの解析結果について報告し、さらに波浪の方向分散性が波力におよぼす影響についても若干の検討を加えるものである。

2. 実海域実験施設

波力等に関するデータの取得は、留萌市黄金岬沖の水深 7 m 地点に建設された実海域実験構造物¹⁾において実施した。図-1 は超音波式波高計により昭和 59 年度～61 年度に取得したデータのゼロダウンクロス法による有義波高・有義波周期の分布を示したものであるが、取得データの中には有義波高で 4 m を越えるものもいくつか含まれており、今回のデータから、沖合の大波浪海域に対応する高レイノルズ数領域における波力特性に関する検討を行うことが可能となった。なお、今回解析の対象としたのは、昭和 61 年度の冬期に取得された 48 データのうち有義波高の大きい上位 14 データ (2487 波) である。これらのデータの有義波高の範囲は 2.47～4.52 m、有義波周期は 6.49～9.64 sec である。

部材作用波力は全体波力と局所波力の両面から検討した。このうち、全体波力は図-2 に示したように実験構造物の脚の部分にひずみ計を取り付けて計測した。また、局所波力については鉛直円柱部材に今回の実海域実験のために開発された全方向波力計²⁾を取り付けて計測することとした。これにより円柱部材 (直径 0.508 m) の水面

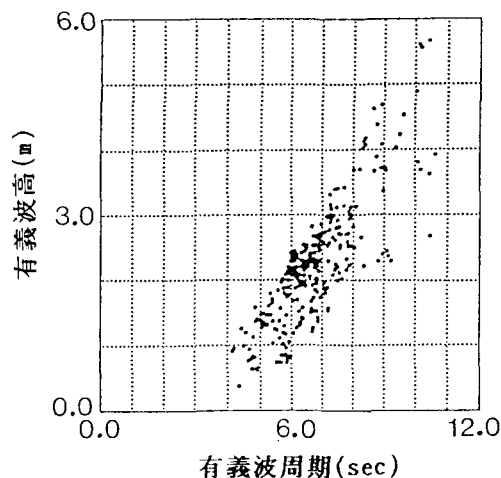


図-1 取得データの有義波高・有義波周期の分布

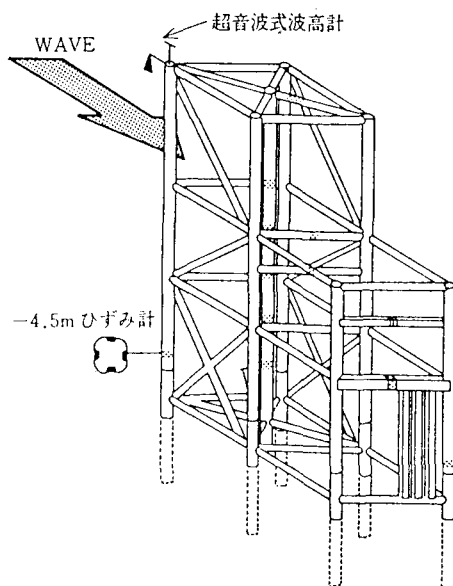


図-2 全体波力の計測位置

* 正会員 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室

** 正会員 運輸省港湾局技術課

下 1~3 m の部分に作用する波力の合力と作用方向を測定することができる。流速は、全方向波力計から来襲波の卓越方向と直角の方向に 2 m 離れた点の水深 -2 m の位置に設置した電磁流速計によって測定した。

3. 鉛直円柱部材の抗力係数・慣性力係数

一般に、水面下の円柱部材に作用する波力は (1) 式のモリソン式によって求めることができる³⁾。

$$\frac{dF}{dz} = C_d \frac{w_0}{2g} Du|u| + C_m \frac{w_0 \pi D^2}{4g} \frac{\partial u}{\partial t} \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 dF : 部材軸方向の微小長さ dz に作用する部材軸に直角方向の力、 u : 部材軸直角方向の水粒子速度成分、 C_d : 抗力係数、 C_m : 慣性力係数、 D : 部材の直径、 w_0 : 海水の単位体積重量、 g : 重力加速度である。(1) 式の右辺第一項は抗力、第二項は慣性力を表しており、式中の抗力係数、慣性力係数はレイノルズ数 (uD/ν)、KC 数 (uT/D) などの値によっても変化するとされている。これらの波力係数に関しては多くの実験例があるが、それらはばらつきが大きく、特に実際の設計で対象となる 10^8 程度の高レイノルズ数領域でのデータは十分ではない。

波力係数は局所波力データを用いて、次のような方法で算定した。

- ①水面形のゼロアップクロス時刻を基準に一波一波を定義する
- ②各波について水平 2 成分の合成波力最大時の波力作用方向により波の作用方向を定める
- ③水粒子速度の波の作用方向成分とその加速度の時系列を各波について求める
- ④最小 2 乗法により各波の C_d , C_m を求める
- ⑤ピーク値を再現するように C_d , C_m を補正する
- ④において、波力係数は、一波毎の実測波力と計算波力の残差平方和が最小になるように次式で求めた。

$$C_d = \frac{2g}{w_0 D} \frac{S_3 S_4 - S_5 S_2}{S_1 S_3 - S_2^2} \quad \dots\dots (2)$$

$$C_m = \frac{4g}{w_0 \pi D^2} \frac{S_5 S_1 - S_2 S_4}{S_1 S_3 - S_2^2} \quad \dots\dots (3)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \sum u_i^4, & S_2 &= \sum (\partial u / \partial t)_i u_i |u_i|, \\ S_3 &= \sum u_i^2, & S_4 &= \sum f_i u_i |u_i|, \\ S_5 &= \sum f_i (\partial u / \partial t)_i \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (4)$$

ただし、 f_i , u_i は波力および水粒子速度の時刻 i における実測値であり、 $\sum$ は一波間での総和を表す。図-3 に実測波力、実測水粒子速度、水粒子加速度、および上述の方法で求めた波力係数により計算した波力の時系列波形の代表的な一例を示す。図によると、モリソン式は実測波力波形をよく再現していることが分かる。しかし、上述の方法は一波一波の計算値を平均的に実測値と一致

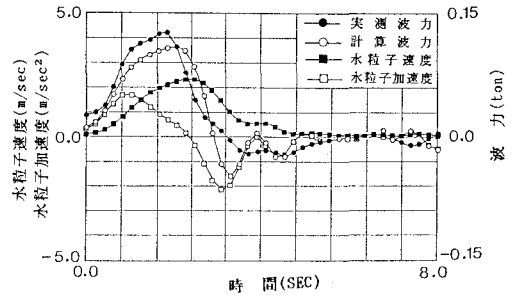


図-3 計算波力と実測波力の比較 ($C_d=0.67$, $C_m=1.61$)

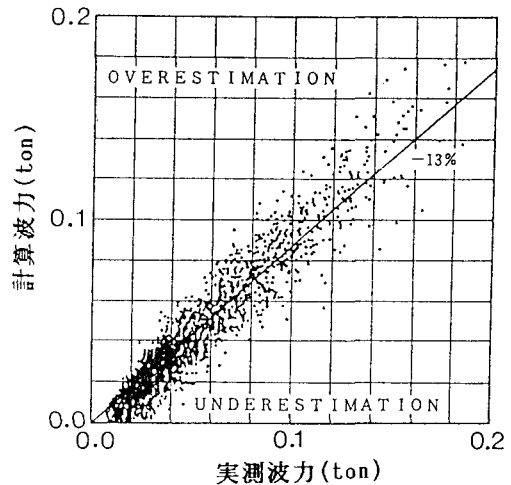


図-4 計算波力と実測波力のピークの比較

させるように波力係数を選ぶものであるため、設計上最も重要な波力のピーク値は必ずしもうまく再現されない場合もある。そのようなことから、解析対象とした全データについて実測のピーク波力と計算によるピーク波力の比較を行ったのが図-4 である。図中には最小 2 乗法により求めた両者の関係を示したが、計算値は作用波力のピーク値を過小評価する傾向があり、平均的には実測波力の 87% となる。そこで、以下の議論では上述の方法で求めた波力係数を 0.87 で除して取り扱う。

以上の手順に従い全方向波力計の有効測定範囲である 0.07 ton 以上の波力データについて求められた抗力係数・慣性力係数とレイノルズ数との関係を KC 数をパラメータにして表示したのが図-5, 6 である。ここで、レイノルズ数および KC 数は一波毎の u_{max} を用いて計算している。なお、今回計測に用いた全方向波力計の表面には生物付着防止塗料を塗布しており、計測開始前にはほとんど生物付着がないことも確認されているので、ここに示したデータは滑円柱に対するものと考えてもよいと思われる。図によれば、全体としてみると抗力係数はレイノルズ数の増大とともに減少し、慣性力係数

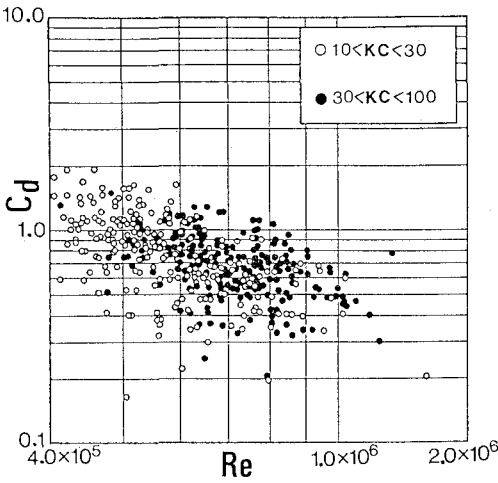


図-5 抗力係数とレイノルズ数の関係

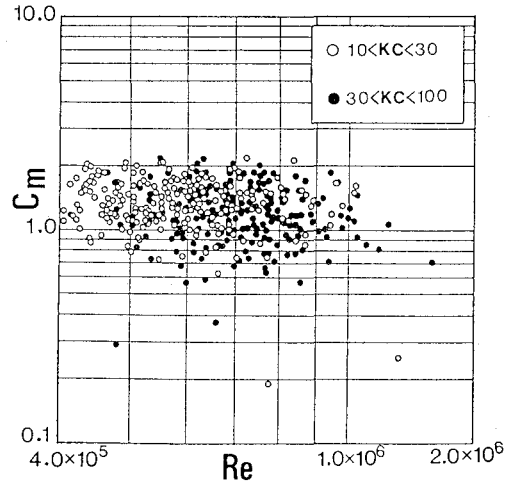


図-6 慣性力係数とレイノルズ数の関係

はレイノルズ数の変化にほとんど影響を受けないようである。また両波力係数の KC 数に対する依存性は明瞭には現れていない。抗力係数がレイノルズ数の変化に対してほぼ一定となる高レイノルズ数領域($Re > 7.0 \times 10^5$)のデータについて波力係数の平均値を求めると、 $C_d = 0.60 \pm 0.17$ 、 $C_m = 1.23 \pm 0.34$ となる。この値は通常設計に用いられる値 ($C_d = 1.0$ 、 $C_m = 2.0$) に比べると相当小さい。波力係数に関しては既往の現地計測結果がいくつかあり、それらについては表-1 に示す。既往の観測値は、今回のものとレイノルズ数範囲が異なるので単純には比較できないが、今回の測定結果は既往のものに比べるとかなり変動が少なく、値としては Kim et al. の得た結果⁴⁾ に比較的近いものであると言えよう。しかしながら、今回のデータが彼らのものよりも高レイノルズ数領域にまで及んでいること、また彼らの結果では抗力係数が $Re > 2.0 \times 10^5$ で一定値になっていることなどが大きく異なっている。

4. 全体波力データの解析結果

ここでは、実験構造物の脚の部分に取り付けたひずみ計による全体波力の実測値と3次元静的構造解析プログ

ラムにより計算した値との比較を行い、作用波力の特性について検討を加える。

実験構造物の構造解析は TOSBAC 600 の複合構造物構造解析プログラム ISAP-II によった。波力は図-2 に矢印で示した波向きについてモリソン式により計算し、水粒子速度は微小振幅波理論によった。構造物は波長に比べて十分小さいので、波力算定の際に波の位相差は考慮しなかった。波力のほかに、静水面より上の部分には浮力を作用させることとした。浮力は管内の水位が波にほとんど追従しないものとして全断面について作用させた。波力および浮力の作用範囲は最高波頂高の算定図⁸⁾ から求めた。

図-7 には、波向が比較的計算条件に近い6例(1043データ)について軸力の実測値と波高の関係を示す。ここで、実測軸力は水面波形のゼロアップクロス時刻を基準にして定義された一波毎について求めたピーク軸力である。図中に示した計算軸力のうち実線で示したものは一般に設計で用いられる波力係数 ($C_d = 1.0$ 、 $C_m = 2.0$) で計算した場合の値である。また、破線で示したものは前節で得られた実測値に比較的近い $C_d = 0.6$ 、 $C_m = 1.2$ の場合の計算値である。なお、両者とも波の周期は10秒として計算した。実験構造物には鉛直部材のほかに多くの水平部材があるので、実際には計算波力は波高の増加(作用範囲の増大)とともに一様な曲線にはならないが、ここでは代表的な波高数点について計算を行い、それらを滑らかな曲線で結んである。この曲線は波高の概ね3乗に比例する。

この図に示したように実測値はかなりばらつきが激しいものの、全体の傾向としては3次元静的構造解析の計算結果とよく一致する。しかしながら、特に波高の大きい領域で、 $C_d = 0.6$ 、 $C_m = 1.2$ の場合でも計算値は実測

表-1 波力係数に関する既往の現地観測結果

研究者	レイノルズ数	KC数	抗力係数	慣性力係数
Kim ⁴⁾	$1.5 \times 10^5 \sim 7.5 \times 10^5$	15~30	0.61 ± 0.15	1.20 ± 0.26
Bishop ⁵⁾	$1.0 \times 10^5 \sim$		0.73	1.24
吉田 ⁶⁾	$2.5 \times 10^5 \sim 7.0 \times 10^5$	3~28	0.6 ± 1.8	1.7
Dean ⁷⁾	$1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^7$	10~50	$0.5 \sim 1.2$	1.33
Evan ⁷⁾	$1.0 \times 10^5 \sim 5.0 \times 10^6$	10~80	0.58 ± 0.33	1.76 ± 1.06
Reid ⁷⁾	$1.0 \times 10^5 \sim 2.0 \times 10^5$	10~20	0.53 ± 0.20	1.47 ± 0.36

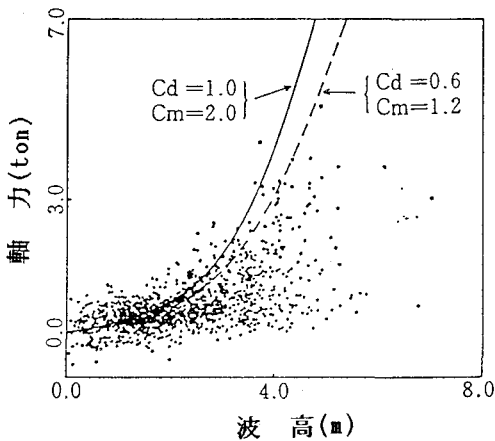


図-7 軸力と波高の関係

値よりも大きくなるようである。この図を見る限り現行の標準値 ($C_d=1.0$, $C_m=2.0$) はかなり安全側の値であると言える。また静水面上の部材にはモリソン波力を大きく上回る衝撃波力が作用することは今回の実海域実験でも確認されているが⁹⁾、全体波力の実測値にはこの影響は見られない。これは、衝撃波力が極めて局所的であるので部材間で位相差が生じ、また、このような波力は非常に作用時間が短いので、構造物全体としては応答しないためであると考えられる。今回計測を行った実海域実験構造物は実際の海洋構造物に比べ設置水深が浅く、衝撃波力の作用する部分が相対的に大きいにもかかわらず、ほとんど衝撃波力の影響が見られないことから、実際の海洋構造物の全体の安定を検討する際には、特殊な場合を除いて衝撃波力が問題となることは少ないものと考えられる。

5. 波浪の方向分散性の影響に関する考察

海洋構造物を設計する場合、波浪の方向分散性の影響は、波浪データから部材作用波力を推定するプロセス中において次の2段階で現れる。

- ① 波浪から水粒子速度を算定する段階
- ② 水粒子速度から波力を算定する段階

②については今回種々の解析を試みたが現段階では有意な結果を得るまでには至っていないため今後の検討課題とすることとし、ここでは①の段階における影響について検討する。この段階において、水面変動が各方向成分の線型和として表せるのに対し、水粒子速度がベクトル和となるところに方向分散性の影響が現れるものと考えられる。ここでは波浪の方向分散性は長波峰性パラメータ (γ) により評価することとした。長波峰性パラメータは水平2成分の水粒子速度から算定されるもので、一般に $0 < \gamma < 1$ の値をとり、方向分散性が大きいほど1

に近い値となる¹⁰⁾。

水粒子速度におよぼす方向分散性の影響は、有義波諸元から微小振幅波理論により求めた水粒子速度 (U_a) と水粒子速度波形から直接求めた有義水粒子速度 (U_m) の相違という形で現れるものと考えられる。そこで、図-8には U_m/U_a と γ との関係を、実測値および多方向不規則波の線型数値シミュレーションによる値について示した。ただし、 U_m は水粒子速度波形をゼロクロス解析したものではなく、水面波形のゼロダウncross時刻を基準にして定義された一波毎の水粒子速度ベクトルの最大値をもとに計算した有義最大水粒子速度である。図-8に示したように、数値シミュレーションによる値には、上述の理由から予測されるとおり方向分散性の増大とともに U_m が相対的に小さくなる傾向が見られる。これに対し、実測データは全体としてみると変動も大きく必ずしも明瞭な傾向はみられない。この原因としては、磯部ら¹¹⁾も指摘しているように碎波帯付近では水粒子速度の伝達関数そのものが、微小振幅波理論による値よりもかなり小さくなることが考えられる。そこで、図-8では実測データを有義波高と進行波の碎波限界波高の比率によりグループ分けして表示した。ただし、ここで碎波限界波高は有義波周期について求めたものである。これによると有義波高が碎波限界波高の60%以下の比較的碎波の影響の少ないデータ (図中の●印) は1例を除いてシミュレーション結果と傾向がよく一致し、方向分散性の増大とともに U_m が相対的に小さくなっていることが分かる。

水粒子速度は波力に対してはほぼ2乗で効き、わずかな値の変化が波力の算定値に大きく影響するものであるので、海洋構造物を設計する際には、波浪の方向分散性の

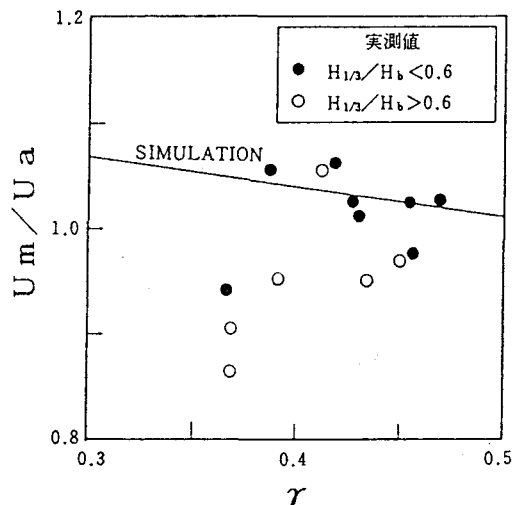


図-8 波浪の方向分散性が水粒子速度に及ぼす影響

効果を的確に評価する必要があるものと考えられる。ただし、砕波帯付近においては、樫木ら¹²⁾も指摘しているように砕波衝撃力を一概に水粒子速度のみで評価できないことから、この場合の波力については更に検討していく必要があると考える。

6. ま と め

本報では、実海域実験により得られたデータをもとに円柱部材に作用する波力の特性について検討した。今回得られた主要な結論は次のとおりである。

(1) 大波浪、高レイノルズ数領域において円柱部材に作用する波力の現地計測データを取得した。部材作用波力は全体波力と局所波力の両面から検討した。

(2) 円柱部材に作用する波力(局所波力)と水粒子速度の同時計測データをとともに、高レイノルズ数領域($Re > 7.0 \times 10^5$)における抗力係数・慣性力係数を算定し $C_d = 0.60 \pm 0.17$, $C_m = 1.23 \pm 0.34$ を得た。抗力係数はレイノルズ数の増大とともに減少し、慣性力係数はレイノルズ数の値によりほとんど変化しない。また、両係数とも KC 数に対しては明瞭な傾向が見られなかった。

(3) 全体波力の実測値は3次元静的構造解析による計算値と傾向としては一致した。しかしながら、波力係数を $C_d = 0.6$, $C_m = 1.2$ とした場合でも波高の大きな領域において計算値は実測値よりも大きな値をとる。

(4) 同じ波高に対しても方向分散性の増大とともに水粒子速度が小さくなる様子を、実測値および数値シミュレーションにより定量的に評価することができた。

本研究の実施に際し、現地海洋構造物調査検討委員会(委員長: 尾崎晃, 委員: 近藤俊郎, 堀武男, 石井進一, 合田良実, 高石敬史, 桑原啓三, 板倉忠興)の御審議を

いただいた。また、実験構造物の構造解析は当所構造研究室今野久志研究員に実施していただいた。ここに厚く御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) 永井 豊・谷津英明・角野 隆: 海洋構造物の実海域実験研究(第2報), 第28回北海道開発局技術研究発表会 pp. 1514-1522, 1985.
- 2) 角野 隆・百瀬 治・永井 豊: 全方向波力計の開発について, 北海道開発局土木試験所月報 No. 391, pp. 1-17, 1985.
- 3) 土木学会: 水理公式集昭和60年版, 625 p., 1985.
- 4) Kim Y.Y. and H.C. Hibbard: Analysis of Simultaneous Wave Force and Water Particle Velocity Measurements, Proc. OTC, Vol. 1, No. 2192, pp. 461-469, 1975.
- 5) Bishop, J.R.: RMS Force Coefficients Derived from Christchurch Bay, Mechanics of Wave Induced Forces on Cylinders, Pirman Publishing Ltd, pp.334-345, 1979.
- 6) 吉田常松・伊藤壯一・堤大三郎: ジャケット構造物の海上実験による波力係数・波力の研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 368-372, 1980.
- 7) Hogben, N. et al.: Estimation of Fluid Loading on Offshore Structures, Proc. Inst. Civ. Eng., Vol. 2, No. 63, pp. 515-562, 1977.
- 8) Goda, Y.: Wave Forces on a Vertical Circular Cylinder, Experiments and a Proposed Method of Wave Force Computation, Rept. PHRI, No. 8, pp. 1-74, 1964.
- 9) Nagai, Y., T. Kadono and H. Yatsu: Field Experiment of a Jacket-type Structure in a Surf Zone, 5th OMAE, Vol. III, pp. 200-206, 1986.
- 10) 合田良実: 共分散法を用いた波向推定方式の数値的検討, 港研報告 Vol. 20, No. 3, pp. 53-92, 1981.
- 11) 磯部雅彦・大中 晋: 砕波帯付近における不規則波の水粒子速度の計算法, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 39-43, 1984.
- 12) 樫木 亨・後野正雄・岩橋哲哉: 浅海域における円柱構造物の砕波局部衝撃波力特性と全体波力について, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 376-380, 1983.