

海洋構造物に作用する波力の実海域実験

北海道開発局土木試験所 正会員 角野 隆
北海道開発局土木試験所 正会員 関野 高志
北海道開発局土木試験所 正会員 水野 雄三

1. はじめに

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、科学技術庁のすすめる「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」を実施している。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鉛直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. 実海域実験施設の概要¹⁾

円柱部材に作用する波力等を計測するための鋼管製の実海域実験構造物（写真－１）は、北海道留萌市黄金岬沖 160mの水深7m、平均海底勾配1/20の地点に位置している。実験構造物には、図－１に示したように、波高計、波力計、流速計等合計46個の計測器が取り付けられており、表－１の各項目について計測を実施している。冬期間、激浪のため実験構造物にわたることができないので、計測コントロールおよびデータ収録は陸上観測局において行っている。計測データは光ファイバーケーブルにより陸上部まで伝送し、DA変換後21チャンネルデータレコーダーに収録する。計測は各19チャンネルからなる4グループに分けて行い、

計測時間は各グループ30分間としている。計測開始は、起動波高および再起動禁止時間を設定することにより自動モードで可能であるが、現在のところ、各波浪階級におけるデータを効率的に取得するために手動モードを併用している。

実験構造物が位置する付近の海域には、毎年冬期に大波浪が来襲し、水深7mの構造物設置地点で砕波限界波高に至るまでのデータの取得が可能である。図－２は、昭和59年度および60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・有義波周期別の分布を示したものである。ここに示したように、取得データには有義波高で4m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である。



写真－１ 実海域実験構造物

表－１ 計測項目

計測項目	計測器	
表面波形	空中発射型超音波式波高計 水圧式波高計	波面の絶対位置を計測可能。水圧式波高計はバックアップ用。
水粒子速度	水平2成分電磁流速計	波高計と組み合わせて波の方向分散性の検討に使用。
鉛直海中部材の作用波力	全方向波力計	実海域レイノルズ数レベルでの波力データの取得、多方向不規則波中での波力特性の解析。
水平海中部材の作用波力	波圧計	形状（角柱、円柱）による波力の相違、鉛直部材との相違の検討。
スリット部材の作用波力	波圧計	部材が近接している場合の波力の検討。
鉛直部材の衝撃波力	波圧計	切り立った砕波の波面が部材に衝突する際の衝撃波圧の検討。
水平部材の衝撃波力	波圧計	非砕波の波面の衝突による衝撃波圧の計測。設置位置、形状による差異の検討。
全体波力	ひずみ計 加速度計	構造物の動的応答、衝撃波力が部材応力におよぼす影響の検討。
風向・風速	プロベラ式風向風速計	既往の風資料との比較。

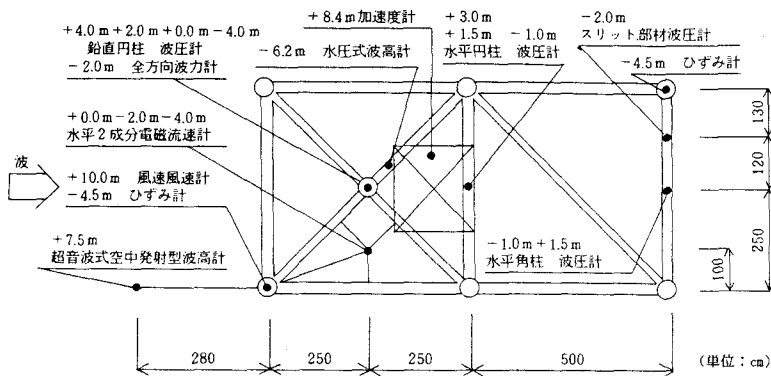


図-1 計測器の配置

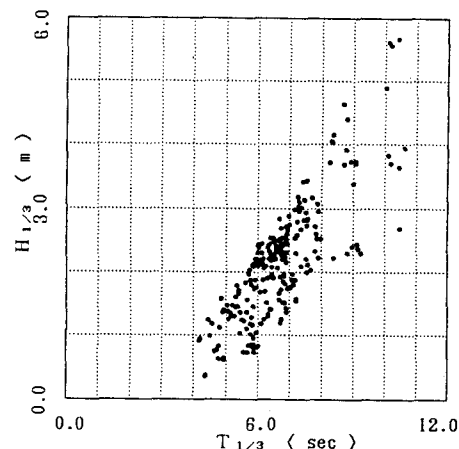


図-2 データの波高・周期別の分布

3. 波力データの計測・処理方法

鉛直円柱部材に作用する波力は、図-3に示す全方向波力計²⁾により計測した。この波力計は、今回の実海域実験のために開発されたもので、これにより円柱部材(直径0.508m)の水面下1m~3m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。作用波力は、波力計の上下端に各4個直交して取り付けられた特殊合金製起歪柱の軸方向ひずみから測定されるせん断力の、上下2点間の差として求めることができる。

全方向波力計の較正值を求めるための試験は、工場製作完了後および現地海域据付後の2回に分けて実施した。工場試験の結果、定格荷重(5ton)に至るまで良好な直線性を有しており、方向分解能も1度以内であることが確認された。また、この試験の結果から10%以内の誤差で計測できる最小荷重は0.14ton(波高にして約2.5m)であることが分かった。言い換えると、全方向波力計により計測できる波力は、最大波高を8mと考えるとレイノルズ数で $5.0 \times 10^5 \sim 2.5 \times 10^6$ 、KC数で15~130となる。また、現地試験の結果からは、施工中の異常荷重等による機能低下は生じていないこと、および、海中での全方向波力計の応答性は、波浪周波数の十数倍程度までについては全く問題ないことが明らかになった。

図-4にはデータ処理システムのフローを示す。50HzでA/D変換したデータは、ビット操作により大型計算機で処理可能なフォーマットに変換した後、較正值の処理、ノイズの除去を行う。ノイズ除去は、時間領域でスパイクノイズの除去を行った後、周波数領域に変換し、カットオフ周波数1.25Hzの数値ローパスフィルターを通すことにより行った。また、電磁流速計データについてはこの際に、時定数による時間遅れの補正も併せて行った。こ

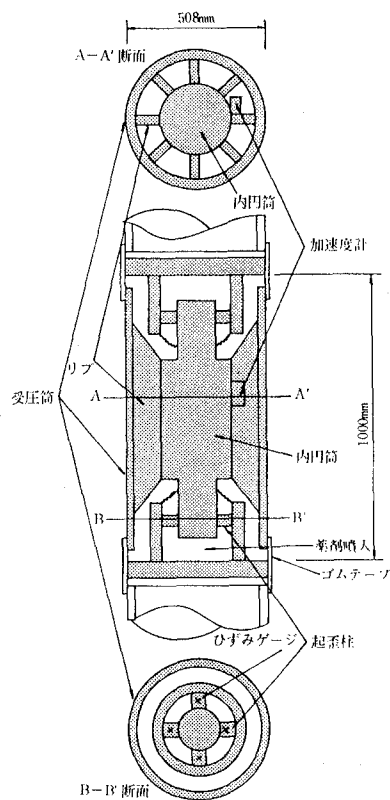


図-3 全方向波力計構造図

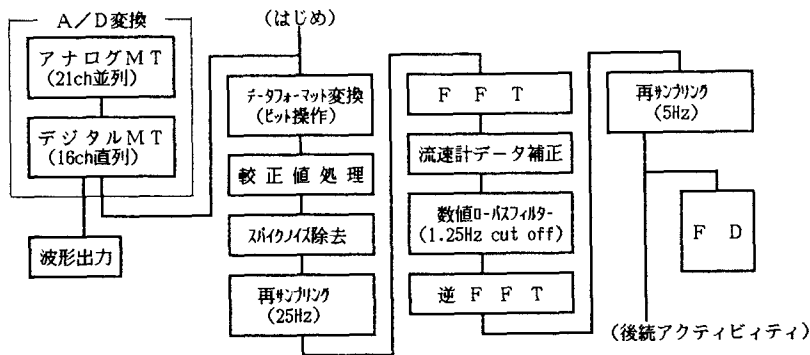


図-4 データの処理フロー

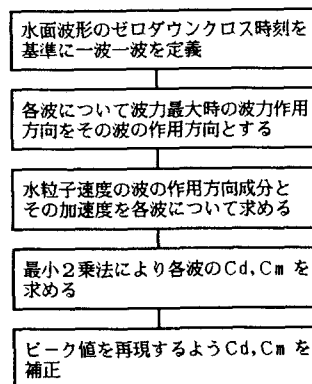


図-5 波力係数の解析フロー

の後、時間領域に逆変換し、5 Hzで再サンプリングを行い、一次元不規則波の統計解析、波力解析、方向スペクトル解析といった後続アクティビティに引き渡した。また、この際同時に、生の波形データをパーソナルコンピュータにより取り扱い可能なフォーマットでフロッピーディスクにセーブした。

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2.47～4.52m、有義波周期は6.49～9.64secである。

4. 抗力係数・慣性力係数の算定方法および解析結果

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。

$$dF = Cd \frac{w_0}{2g} D |u| du + Cm \frac{w_0 \pi D^2}{4g} \frac{\partial u}{\partial t} ds \quad (1)$$

ここに、 dF ：部材軸方向の微小長さ ds 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、 Cd ：抗力係数、 Cm ：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、第二項が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ものであるとされている。これらの波力係数に関しては多くの実験例があるが、それらはばらつきも大きく、特に実際の設計で対象となる 10^6 程度の高レイノルズ数領域でのデータは十分ではない。

波力係数の算定方法は研究者によって異なり標準化されたものはないが、ここでは図-5に示したフローに従い、実測水粒子速度を用いて一波毎に最小2乗法を適用して算定した。まず、超音波式波高計で計測した表面波形のゼロダウクロス解析を行う。次に、水平2成分の波力を合成し、一波毎の波力の最大値を求める訳であるが、このときの一波の定義は波力波形のゼロクロス時刻ではなく、水面波形のゼロダウクロス時刻を基準にして定義した。波高計と全方向波力計は卓越波向方向に約5m離れているが、一波毎の対応を考える上では、この距離は問題とはならない。このようにして定義した一波毎について最大波力を求め、その作用方向を一波毎の波向とし、実測水粒子速度およびそれから求めた水粒子加速度の波向方向成分の時系列を計算する。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選ぶと次のようになる。

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

ここに、

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

図-6には、代表的な一例について実測波力、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を用いて計算した波力の時系列波形を示す。ここに示したように、上述の方法は一波毎の計算値を平均的に実測値と一致させるように波力係数を選ぶものであるので、設計上最も重要な波力のピーク値が必ずしもうまく再現されない危険性も考えられる。そこで、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-7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、計算値は常に作用波力のピーク値を過小評価しており、平均的には実測波力の88%となる。このため、以下の議論では上述の方法で求めた波力係数を0.88で除して表示してある。

以上の手順に従い、全方向波力計の有効測定範囲である0.14ton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

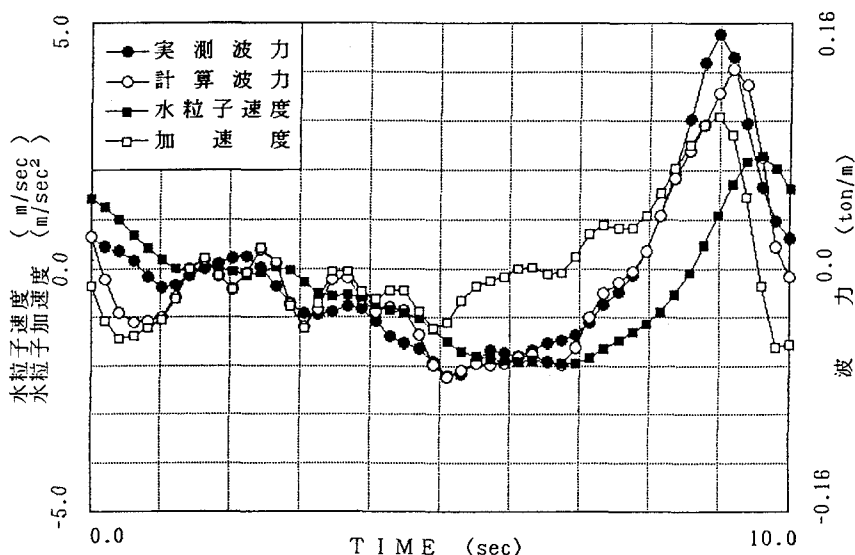


図-6 実測波力波形と計算波力波形（ $Cd=0.60$ 、 $Cm=1.44$ ）の比較

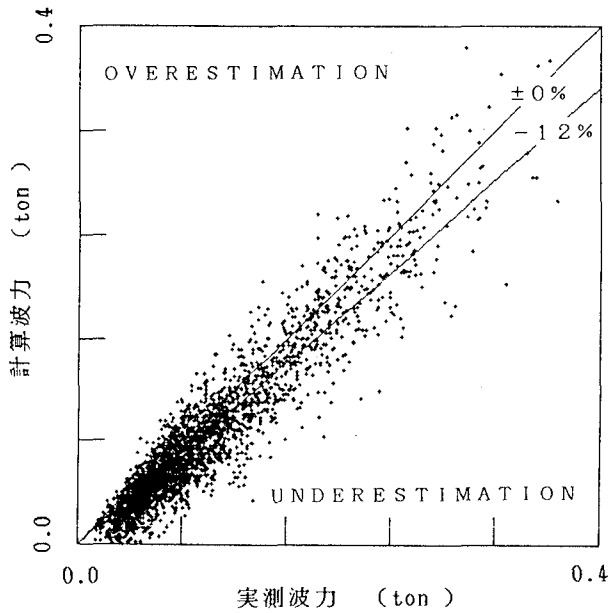


図-7 ピーク波力の計算値と実測値の比較

ノルズ数との関係をKC数をパラメータとして表示したのが図-8 (1),(2)である。ここで、レイノルズ数およびKC数は一波毎の u_{max} を用いて計算したものである。なお、今回計測に用いた全方向波力計には表面に生物付着防止塗料を塗布してあり、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。これらの図を見てもわかるように、データの波高・周期にはある程度相関があるので、レイノルズ数とKC数は独立にならず、波力係数とこれらの関係を厳密に議論することは難しいが、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、 $C_d = 0.60 \pm 0.17$ 、 $C_m = 1.36 \pm 0.38$ となる。波力係数に関しては既往の現地計測結果がいくつかあるが、それらについては小田³⁾が表-2のようにまとめている。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、今回の測定値はKim et al.の得た結果に比較的近いものと言えよう。

5. 波浪の方向分散性の影響に関する考察

従来、柱状構造物に作用する波力に関する水理模型実験に用いられてきた波は一次元波浪であるのに対し、海洋構造物の建設される実海域の波浪は、方向分散性を有する多方向不規則波である。しかしながら、波浪の方向分散性が波力におよぼす影響については従来その重要性は指摘されてきたものの⁷⁾、十分なデータがなく不明な点が

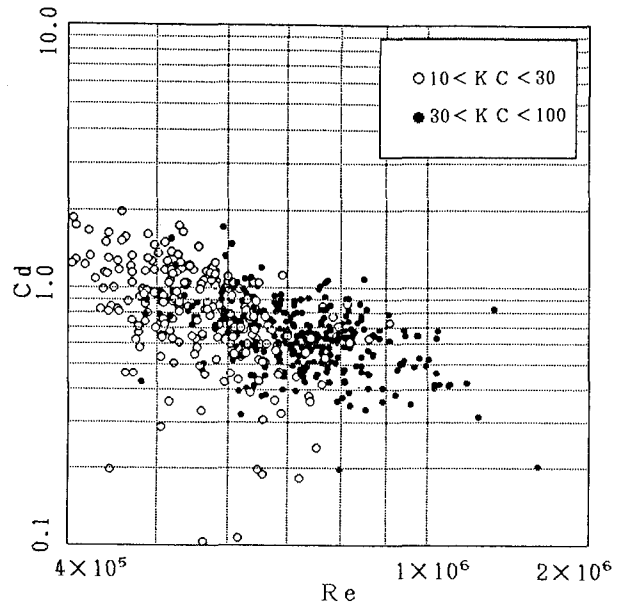


図-8 (1) 抗力係数とレイノルズ数の関係

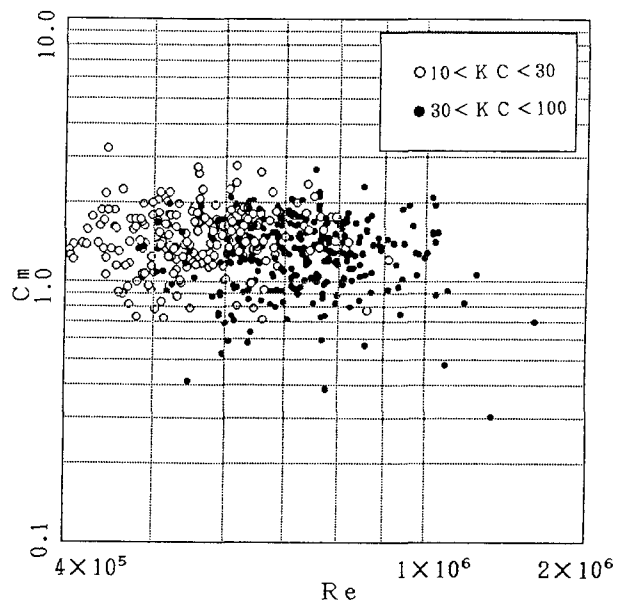


図-8 (2) 慣性力係数とレイノルズ数の関係

表-2 抗力係数・慣性力係数に関する既往の現地観測結果

研究者	Re	KC	Cd	Cm
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

多い。今回、方向分散性を有する実海域の波力データを取得することができたので、以下で波浪の方向分散性の影響について若干の考察を加える。

波浪データから部材作用波力を推定する海洋構造物の設計プロセスでは、波浪の方向分散性の影響は、①波浪から水粒子速度を算定する段階、および②水粒子速度から波力を算定する段階の二段階で現れる。①の水粒子速度を求める段階での影響は、水面変動が各方向成分の線型和として表せるのに対し、水粒子速度はベクトル和であることによるものであると考えられる。一方、②の波力を算定する段階での影響は、分散性を有する波浪の場合、水粒子の軌道は水平面内でも楕円形をしており、直線状の往復運動でないため、抗力と慣性力の作用方向が異なること、および、この水平面内での水粒子軌道の形状の差異により、部材周囲の渦の生成状況が異なることに起因するものであると考えられる。

今回、これら2つの段階における方向分散性の影響

について解析を試みたが、②の水粒子速度～波力の段階については、波力係数のばらつきがやや大きかったこともあり、水粒子軌道の形状パラメータなどによっても十分記述することができなかった。これについては今後の検討課題とすることとして、ここでは①の波浪～水粒子速度の段階における影響について検討を加える。波浪の方向分散性は次に示す長波峰性パラメータにより評価した。

$$\gamma = \left\{ \frac{[u^2] + [v^2] - \sqrt{([u^2] - [v^2])^2 + 4[u v]^2}}{[u^2] + [v^2] + \sqrt{([u^2] - [v^2])^2 + 4[u v]^2}} \right\}^{1/2} \quad (4)$$

ここに、 u 、 v は水平2成分の水粒子速度、また、 $[]$ は時間に関する積分を表している。長波峰性パラメータは一般に $0 < \gamma < 1$ の値をとり、方向分散性が大きいほど1に近い値となる。

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-9には U_m/U_a と長波峰性パラメータとの関係を、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、ここで 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一波の水平2成分合成ピーク水粒子速度をもとに計算した1/3最大水粒子速度である。図-9に示したとおり、数値シミュレーションによる値には、前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、実測データの方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⁸⁾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-9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ることが分かる。

水粒子速度は波力に対してほぼ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。海洋構造物の設計の際には、ここで明らかにしたような波浪の方向分散性の効果を的確に評価する必要があるものと考えられる。また、特に碎波帯付近では水粒子速度は微小振幅波理論による値よりも小さくなり、この影響は方向分散性による影響よりも数段大きいので注意が必要であると考えられる。

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を行った。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を目的とした全方向波力計を開発し、種々の波高階級における波力データを取得することができた。

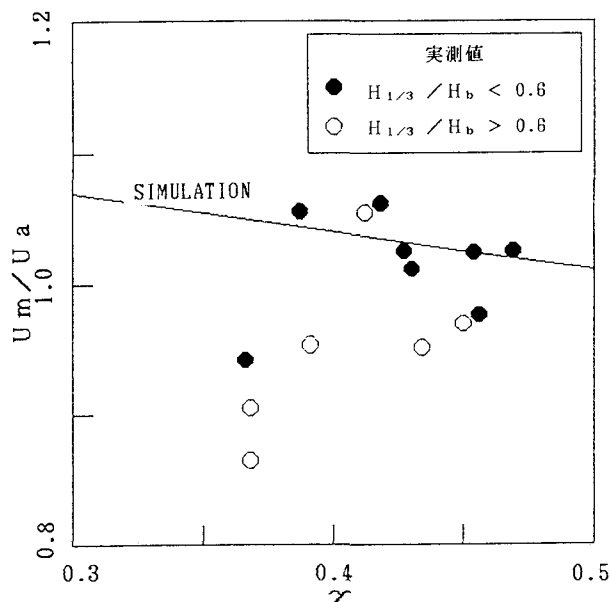


図-9 U_m/U_a と方向分散性の関係

- ② 円柱部材に作用する波力、水粒子速度の同時計測データをもとに、抗力係数・慣性力係数を算定し、高レイノルズ数領域 ($Re > 7.0 \times 10^5$) において、 $C_d = 0.60 \pm 0.17$ 、 $C_m = 1.36 \pm 0.38$ 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 K_C 数に対しては明瞭な傾向が見られなかった。
- ③ 波浪の方向分散性が波力におよぼす影響は①波浪から水粒子速度を算定する段階、および②水粒子速度から波力を算定する段階の二段階に分けて考えることができる。このうち②については有意な結果を得ることができなかったが、①については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。また、碎波帯付近にあっては方向分散性の影響よりも、碎波により伝達関数が増大することの影響のほうが大きいことが明らかになった。

本研究の実施にあたっては、現地海洋構造物調査検討委員会（委員長：尾崎晃、委員：近藤徹郎、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。ここに厚く御礼申し上げる次第である。なお、本研究は科学技術振興調整費によるものであることを付記する。

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論文集、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、1985
- 3) 小田一紀；構造物に作用する波力（円柱構造物を中心として）、第18回水工学に関する夏期講習会講演集、1982
- 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、伊藤壮一、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回海講、1980
- 7) Robert L. Wiegel; Water Wave Force Including Directional Spectra Input, Proc. ECOR, pp.209-239, 1984
- 8) 磯部雅彦、大中晋；碎波帯付近における不規則波の水粒子速度の計算法、第31回海講、1984