 U.D.C. 624.131.37:639.2.052+532.593

波動場における半球型底設魚礁の波力特性に関する研究

Study on Characteristics of Wave Force Acting on a Submerged Hemispheric Artificial Reef under Regular Waves

水野　晋* Susumu Mizuno
湊　康裕** Yasuhiro Minato
西田　秀紀** Hidenori Nishida
多田　彰秀*** Akihide Tada
西平　福宏**** Fukuhiro Nishihira

要　約

従来より，人工底設魚礁は直線部材の組み合せによる矩形構造のものが一般的である．このため，数多くの漁網切断事故を引き起こし，沿岸漁業上の大きな問題となっている．また，矩形構造は構造学的かつ水理学的に必ずしも優れたものとは言い難い．本報では，新たに半球型の人工底設魚礁を考案し，その流体力特性を明らかにするため，水理模型実験を通して基礎的な検討を行った．実験では，二次元水槽内に半球型底設魚礁の模型を設置して規則波を発生させ，模型に作用する流体力を測定した．さらに，実験結果より流体力の時間的変化および最大波力の特性並びにその流体力係数を求めた．最後に，得られた流体力係数を用いて模型に作用する波力の再現性についても考察を行っている．

目　次

§1．まえがき

『とる漁業』から『つくり育てる漁業』への転換が推進される中，種々の形状を有したコンクリート底設魚礁が数多く投入されてきた．しかしながら，それらのほとんどが骨構造を採用しているために，漁網切断事故を引き起こし大きな問題となっている．著者らは，上述のようなことを考慮に入れ，網がかりの少ないと予想される半球型底設魚礁を提案するとともに，流れ場における半球型底設魚礁の水理特性，特に魚礁背後の流れ特性を可視化実験によって明らかにした[1]．ここでは，波動場における半球型底設魚礁に作用する波力特性に関して考察を加えている．

*技術研究所海洋技術課
**技術研究所水理研究課
***技術研究所海洋技術課係長
****技術研究所研究部長

§2．水理実験の概要

実験は，西松建設株式会社技術研究所の二次元水槽(長さ65m×幅1m×高さ1.6m)を用いて行われた(Fig. 1参照)．計測および実験結果の解析には，Fig. 2に示すよ

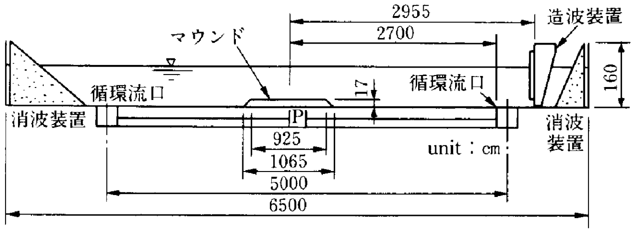

Fig.1　実験水槽の概略図

うな座標系を設定して行った．ここに，hは静水深であり，Dは半球型底設魚礁（以後，半球体と呼ぶ）の直径を示す．実験では水位変動（η），波進行方向の水粒子速度(u)および半球体に作用する波力（F_x，F_y，F_z）を計測した．特に，水位変動については半球体頂点上およびその頂点より3.0m沖側の2地点で，容量式波高計(計測技研株式会社，CP-306型)を用いて測定した．また，半球体頂点より3.5m岸側の水深 $h-D/2$ における水平水粒子速度を電磁流速計（計測技研株式会社，VM-201型およびVMT 2-200-08PL型）で，半球体に作用する波力を防水型3分力検出器(日章電気株式会社，LMC-3502-5）で計測した．なお，ここで用いた波力検出装置は，Fig.3に示すような防水型3分力検出器のセンサー部にプラスティック製の半球体を取り付けたものである．計測に際しては，入射波が半球体設置地点を通過し，消波装置から反射して再び同地点に到達するまでの間に行った．なお，得られた水位変動，水粒子速度および波力の時間波形は，ディジタルレコーダー（ティアック株式会社，DR-F1)に，サンプリング間隔0.01秒，サンプリング個数3000で収録された．実験条件は，Table 1に示すように，半球体の球径 D を2種類，静水深 h を3種類，波の周期 T を5種類，波高 H を3種類変化させた．従って，実験ケースは合計90となった．なお，発生させた波はすべて規則波であり，位置制御方式によって造波された．

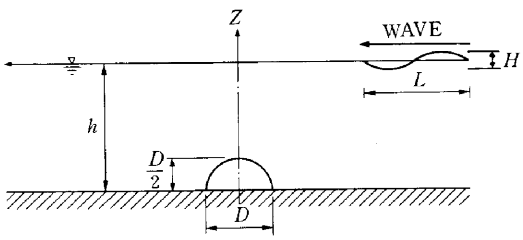

Fig.2　座標系

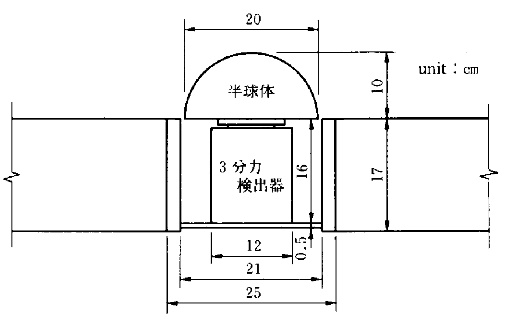

Fig.3　波力検出装置

Table 1　実験条件

球　径	D (cm)	10.0, 20.0
水　深	h (cm)	40.0, 60.0, 80.0
周　期	T (s)	1.2, 1.6, 2.0, 2.4, 2.8
波　高	H (cm)	3.0, 6.0, 9.0, 12.0から3種類
無次元量	h/D	2, 3, 4, 6, 8
	h/gT^2	0.005～0.057
	u_mT/D	0.19～7.35

§3．解析方法

3－1　実験データの一次処理

実験より得られた水位変動 η の時間波形については，ゼロアップクロス法を用いて統計解析を行い，半球体直上の水面での平均波高 H_a，平均周期 T_aを求めた．さらに，半球体頂点での水粒子の速度uおよび加速度 du/dt については，H_a，T_aおよび h をStokesの第3近似解に代入し理論的に求めた．なお，水粒子速度および波力の最大値については，それぞれの時間波形より求まる最大振幅（以後，添字 m で表す）で定義した．

3－2　Morisonの波力算定式

小口径の直立円柱に作用する波力の算定式として提案されたMorison式[2]は，抗力と慣性力との和で表現されている．厳密な意味では理論的根拠を有していないが，その形式が簡単で使いやすいために，従来より2次元柱体の波力の算定に数多く用いられてきた．その適用条件としては，①入射波が基本周波数成分の卓越した非砕波の波であること，②構造物の代表径 D が入射波長 L と比較して小さいこと($D/L<0.2$)，③構造物による波の変形が無視できること，④水粒子の運動による揚力が抗力および慣性力に比べて非常に小さいことなどが挙げられる．このようなMorison式は，2次元柱体ばかりでなく，球体に代表されるような3次元性物体に作用する波力の予測にも用いることが可能であり，その場合の算定式を示せば以下のとおりである．

$$F=\frac{1}{2}\rho C_D A u|u|+\rho C_M V\frac{du}{dt} \qquad (1)$$

ここに，ρ：水の密度，C_DおよびC_M：それぞれ抗力係数および慣性力係数，AおよびV：波の進行方向に垂直な面への物体の投影面積および物体の体積，uおよびdu/dt：それぞれx方向の水粒子速度および加速度である．なお，式(1)より算定される波力の精度に関しては，uおよび du/dt の算定方法並びに C_Dおよび C_Mの評価法に強く依存している．

3－3　半球体の波力算定式

本報では，半球体に作用する水平方向波力 F_xの算定

には，式(2)に示されるようなMorison式を適用することにした．

$$F_x=\frac{1}{16}\rho\pi C_D D^2 u\,|\,u\,|+\frac{1}{12}\rho\pi C_M D^3\frac{du}{dt}\quad(2)$$

一方，半球体に作用する鉛直方向波力 F_zについては，次に示す揚力の算定式を採用する．

$$F_z=\frac{1}{16}\rho\pi C_L D^2 u_m^2\quad(3)$$

ここに，C_L：揚力係数である．本報では半球体頂点での流速値を代表流速として解析を行っている．

3－4　波力係数の計算方法

Morison式中の抗力係数 C_Dおよび慣性力係数 C_Mを計算する方法は，両係数が時間的に変化しないものと仮定し，Morison式から算定される計算波力と実験より得られた実測波力との差を最小にするような最小自乗法を採用した．特に，計算波力と実測波力の極値の精度をより向上させる目的で，実測波力の自乗の重み付けを施して C_Dおよび C_Mの値を計算した[3]．最小自乗法を用いた計算方法について簡単に紹介すれば，以下のとおりである．

$$E=\sum_{i=1}^{n}F_{xi}^2(F_{xi}-F_{xci})^2\quad(4)$$

$$F_{xci}=C_D f_{Di}+C_M f_{Ii}\quad(5)$$

$$f_{Di}=\frac{1}{16}\rho\pi D^2 u_i\,|\,u_i\,|$$

$$f_{Ii}=\frac{1}{12}\rho\pi D^3\frac{du}{dt}$$

ここに，E：計算に用いられた重み付き自乗誤差，F_{xi}：離散化された i 番目の x 方向の実測波力，$Fxci$：式(5)で与えられる i 番目の x 方向の計算波力，n は離散化されたデータの個数である．

実測波力と計算波力との差が最小となる条件は，次のとおりである．

$$\frac{\partial E}{\partial C_D}=0,\quad\frac{\partial E}{\partial C_M}=0\quad(6)$$

式(4)および(6)より導かれる連立方程式を解けば，以下に示すような C_Dおよび C_Mが求められる．

$$C_D=\frac{\sum_{i=1}^{n}(F_{xi}^2 f_{Ii}^2)\sum_{i=1}^{n}(F_{xi}^3 f_{Di})}{\sum_{i=1}^{n}(F_{xi}^2 f_{Ii}^2)\sum_{i=1}^{n}(F_{xi}^2 f_{Di}^2)-\{\sum_{i=1}^{n}(F_{xi}^2 f_{Ii} f_{Di})\}^2}-\frac{\sum_{i=1}^{n}(F_{xi}^3 f_{Ii})\sum_{i=1}^{n}(F_{xi}^2 f_{Ii} f_{Di})}{\sum_{i=1}^{n}(F_{xi}^2 f_{Ii}^2)\sum_{i=1}^{n}(F_{xi}^2 f_{Di}^2)-\{\sum_{i=1}^{n}(F_{xi}^2 f_{Ii} f_{Di})\}^2}\quad(7)$$

$$C_M=\frac{\sum_{i=1}^{n}(F_{xi}^3 f_{Ii})\sum_{i=1}^{n}(F_{xi}^2 f_{Di}^2)}{\sum_{i=1}^{n}(F_{xi}^2 f_{Ii}^2)\sum_{i=1}^{n}(F_{xi}^2 f_{Di}^2)-\{\sum_{i=1}^{n}(F_{xi}^2 f_{Ii} f_{Di})\}^2}-\frac{\sum_{i=1}^{n}(F_{xi}^3 f_{Di})\sum_{i=1}^{n}(F_{xi}^2 f_{Ii} f_{Di})}{\sum_{i=1}^{n}(F_{xi}^2 f_{Ii}^2)\sum_{i=1}^{n}(F_{xi}^2 f_{Di}^2)-\{\sum_{i=1}^{n}(F_{xi}^2 f_{Ii} f_{Di})\}^2}\quad(8)$$

揚力係数 C_Lについては最大揚力（本研究では F_{zm}）の実験値を無次元化して求めた．

$$C_L=\frac{F_{zm}}{\frac{1}{16}\rho\pi D^2 u_m^2}\quad(9)$$

§4．実験結果および考察

4－1　波力の時間的変化

η，F_x，F_yおよび F_zの時間的変化の一例をFig.4に示す．実験条件は，$D=20$cm，$h=60$cm，$H=6.0$cmおよび $h/gT^2=0.015$である．F_xおよび F_zは，いずれも規則的な変化を示している．一方，F_yは規則的な成分に高周波成分が重なって変動している．また，ηおよび F_xの時間的変化の波形を比較すれば，両者の間に$\frac{1}{4}T$秒程度の位相差が生じている．これは，ここで対象とした実験条件が抗力より慣性力の方が卓越する領域に含まれていることを示唆している．なお，全ケースにおいて F_xおよび F_zの波形は，同図に示すような単峰型波形が得られた．

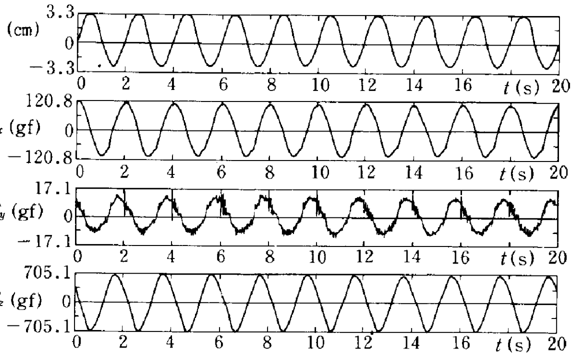

Fig.4　水位と波力の時間的変化の一例
(D=20cm，h=60cm，H=6.0cm，h/gT^2=0.015)

4－2　最大波力

(1) x 方向の無次元最大波力 $F_{xm}^*(=F_{xm}/\rho u_m^2 D^2)$ とKeulegan-Carpenter数（以後，$K.C.$数と略記，$=u_m T/D$）の関係をFig.5に示す．本実験が対象とした領域内では，F_{xm}^*は $K.C.$数の－1乗に比例して減少することが認められる．これは，慣性力が支配的な成分であ

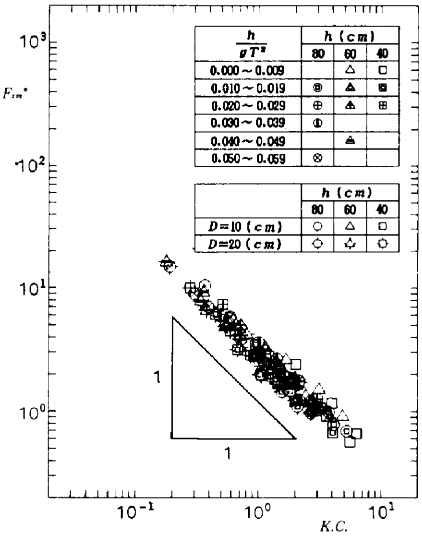

Fig.5　F_{xm}^* と $K.C.$数の関係

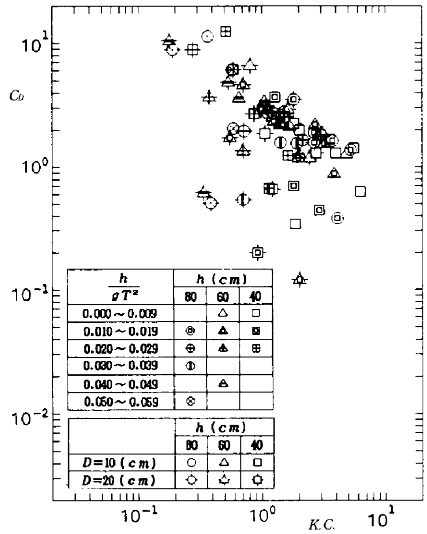

Fig.8　C_D と $K.C.$数の関係

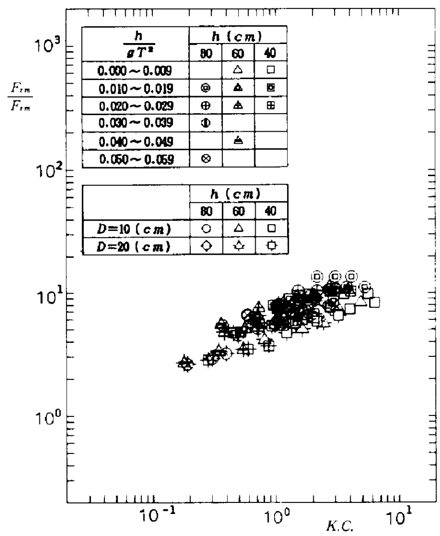

Fig.6　F_{zm}/F_{xm} と $K.C.$数の関係

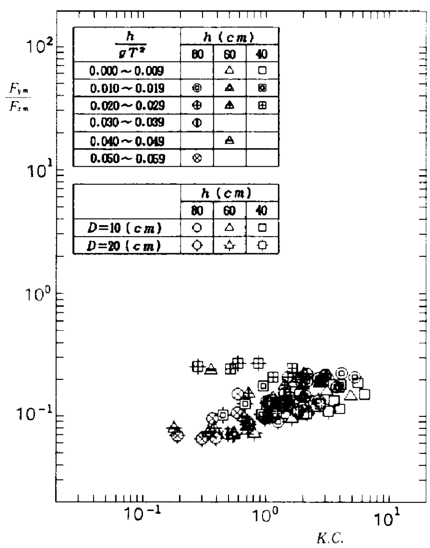

Fig.7　F_{ym}/F_{xm} と $K.C.$数の関係

ったことを示しており，没水球体の最大波力特性と一致する[4]．

(2) F_{xm}に対する F_{zm}および F_{ym}の比と $K.C.$数の関係を，それぞれ Fig.6 および Fig.7 に示す．F_{zm}/F_{xm}の値は，$K.C.$数の増加とともに増大し，対象としたすべての条件下で 1 以上となっている．特に，$K.C.$数が 7 近傍では F_{zm}が F_{xm}の約10倍程度となり，当初予想した以上に z 方向の波力が卓越することが明らかとなった．この要因としては，水粒子の水平運動に伴う揚力の影響および波力に及ぼす底面の近接効果が考えられる．一方，F_{ym}/F_{xm}は，$K.C.$数に関係なく 0.1から 0.3の間に含まれている．よって，F_{ym}の半球体に及ぼす力学的影響は極めて小さいと判断される．

4－3　波力係数

(1) x 方向の抗力係数 C_D と $K.C.$数の関係を Fig.8 に示す．抗力係数 C_Dは，全体的な傾向として $K.C.$数の増加に伴って減少することが認められる．しかしながら，ばらつきが大きく，有意な傾向を示しているとは言えない．没水球体の抗力係数においても同様なばらつきが報告されており，x 方向波力に占める抗力項の割合が小さいことなどがその原因と考えられる[5]．

(2) x 方向の慣性力係数 C_M と $K.C.$数の関係を Fig.9 に示す．C_Mは，$K.C.$数，h/gT^2および h/D に関係なく，ほぼ一定(1.70)となっている．その値は，ポテンシャル理論によって求められる球の慣性力係数1.50より多少大きくなっているものの，妥当な測定結果が得られたものと判断される．

(3) z 方向の揚力係数 C_L と $K.C.$数の関係を Fig. 10 に示す．$K.C.$数の増加に対して，C_Lの値がほぼ－1/2乗

で減少することが認められる．これは，中村・池田ら[6]が，正弦振動流中において球に作用する流体力を測定して得た結果と定性的に一致するものである．一般に $K.C.$数は，物体背後の後流渦の発生パターン[7]を規定するものであるため，揚力の出現と結びつけて論じられている．底設の半球体に対しても同様に，$K.C.$数の変化あるいは背後の渦の発生機構と z 方向の波力（揚力）とが関係しているものと推測される．一方，定量的には中村・池田らの結果と約2オーダーの相違がある．これは，本実験で測定された z 方向の波力が極めて大きかったことによるものと判断される．

（4）魚礁の設計計算および安定計算に際しては，波力の算定が重要となる．従って，これらの波力係数があらかじめ定式化されていることは，工学上極めて望ましい．さらに，球体や半球体といった3次元性物体に対する波力係数の特性は，円柱に代表される2次元柱体と比較すれば，十分に解明されていないのが現状である．これらのことを考慮すれば，まず半球体の C_D, C_M および C_L の値を定式化することが重要である．すなわち，Fig. 8, Fig. 9 および Fig. 10 に示される抗力係数 C_D，慣性力係数 C_M および揚力係数 C_L の値を，単純線形回帰モデル[8]を適用して最小自乗法によって求めた．その結果を示せば次式のとおりである．

$$C_D = 2.15 \times \left(\frac{u_m T}{D}\right)^{-0.538} \tag{10}$$

$$C_M = 1.70 \tag{11}$$

$$C_L = 93.9 \times \left(\frac{u_m T}{D}\right)^{-0.539} \tag{12}$$

4－4　波力波形の再現

（1）式(2)に式(10)および式(11)を代入して算定される計算波力と実測波力の比較を行った一例を Fig. 11 に示す．ここに，細い実線は計算波力であり，太い実線は実測波力を示している．また，計算波力を構成する抗力 F_D および慣性力 F_I の時間的変化についても併記している．このケースに関しては，定性的に見て計算波力は実測波力をほぼ再現していることがわかる．ここで，再現性の程度を数字で表すことが実験結果の整理上必要であるので，以下の式を定義した．

$$C_{rx} = \left[1 - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(F_{xci} - F_{xi})^2}{F_{xstd}{}^2}\right]^{1/2}$$

ここに，C_{rx}：計算精度，F_{xci}：Morison 式によって計算された波力，F_{xi}：実測波力，F_{xstd}：実測波力の標準偏差，n：分割データの総数である．

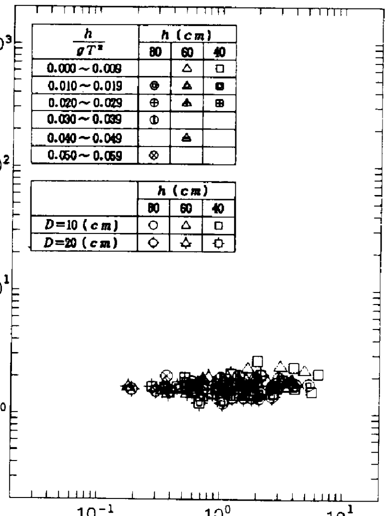

Fig.9　C_M と $K.C.$数の関係

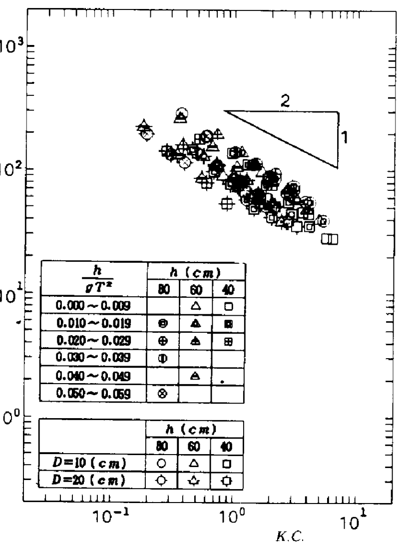

Fig.10　C_L と $K.C.$数の関係

上記の C_{rx} と $K.C.$数の関係を Fig. 12 に示す．C_{rx} は波力の分散に注目した値であり，1に近いほど再現性が高いことを表すパラメーターである．今回のケースに関しては，大半のケースが0.9以上であり，Morison 式を用いた計算波力は実測波力をよく再現していることが確認された．

（2）式(3)に式(12)を代入して算定される z 方向の最大揚力 F_{xmc} と実測された最大揚力 F_{zm} の関係を Fig. 13 に示す．波力の値が小さい範囲では，計算値と実測値はほぼ等しい結果が得られている．一方，波力の値が大きい領域，500gf (4.9N) 以上になると計算値と実測値の関係はばらつきが大きくなり，実測波力よりも計算波力の方が大きくなる傾向が確認された．

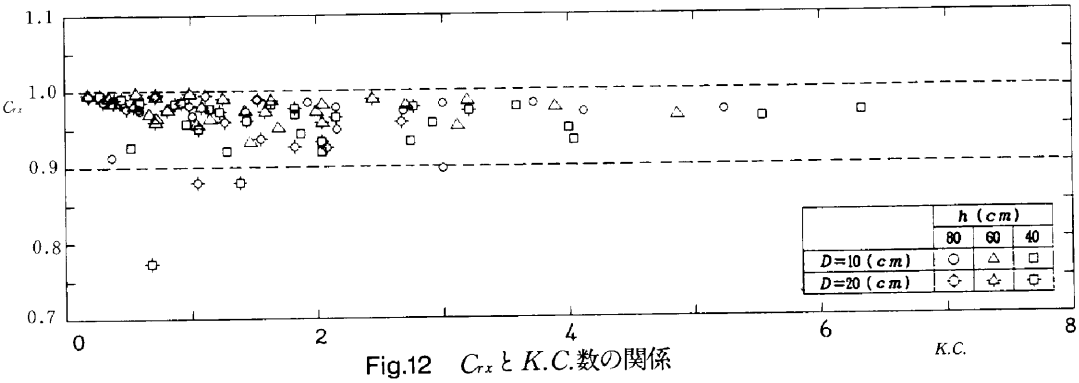

Fig.12　C_{rx} と $K.C.$ 数の関係

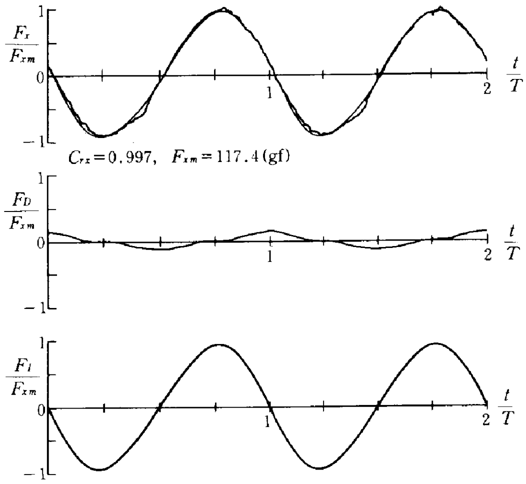

Fig.11　計算波力と実測波力の比較

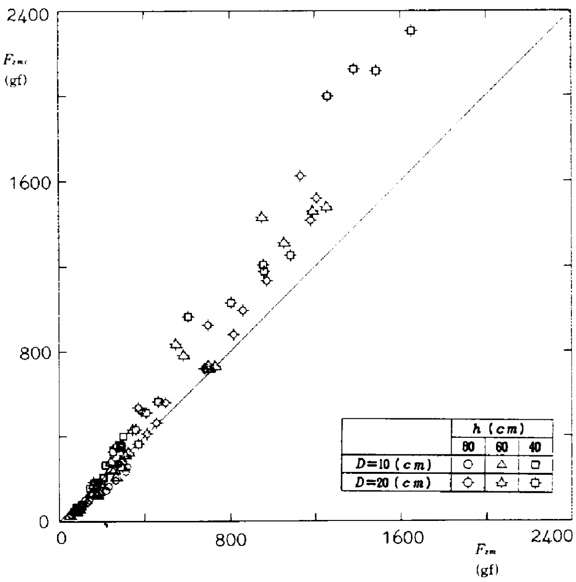

Fig.13　z 方向の計算波力と実測波力の比較

§5．あとがき

水理実験結果に基づき半球体に作用する波力特性について検討を加えてきた．ここに，本実験で得られた結果を要約すれば以下のとおりである．

(1)半球型底設魚礁に作用する水平方向波力は，Morison式によって算定できることが確認された．

(2)抗力係数はばらつきが大きいものの，$K.C.$ 数の増加に伴い減少する．また，慣性力係数は $K.C.$ 数によらずほぼ一定値であることが認められた．

(3)今回，実験で対象とした範囲内の水平方向波力については，実験回帰式から算定される抗力係数および慣性力係数並びにMorison式から，精度よく再現できることが明らかとなった．

以上のように，半球体に作用する水平方向波力については，一通りの特性が把握できた．一方，鉛直方向波力については未だに不明の点が多く，半球体の設置方法および計測機器を取り替えて再度実験を行う予定である．

参考文献

1）湊　康裕・水野　晋・金子範彦・多田彰秀・西平福宏：流れ場における半球型底設魚礁の水理特性に関する研究，西松建設技報 Vol.14，pp.34～43，1991.

2）岩垣雄一・椹木　亨：海岸工学，共立出版，pp.253～257，1979.

3）水谷法美：没水球体に作用する波力の特性に関する基礎的研究，名古屋大学博士論文，1989.

4）岩田好一郎・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号/II-11，pp.215～224，1989.

5）前出　3）.

6）中村廣昭・池田駿介・大八木崇：正弦振動流中に置かれた球に作用する流体力(続報)，第30回海岸工学講演会論文集，pp.381～384，1983.

7）沢本正樹・菊池健治：振動流中におかれた円柱に作用する揚力，第26回海岸工学講演会論文集，pp.429～433，1979.

8）亀田弘行・池淵周一・春名　攻：新体系土木工学2　確率・統計解析，技法堂，pp.220～223，1981.