

半球型底設魚礁の流体力特性に関する実験的研究

The Experimental Study on Hydrodynamic Forces Acting on a Submerged Hemispheric Structure for the Fish Aggregation Device in a Flow and Under Regular Waves

西平福宏*・多田彰秀*・湊 康裕*・水野 晋*・野田英明**・松原雄平**

Fukuhiro.Nishihira,Akihide.Tada,Yasuhiro.Minato,Susumu.Mizuno,Hideaki.Noda,Yuuhei.Matsubara

This paper deals with the development of a new model fish aggregation device which prevents trawlnet entanglement. Laboratory experiments were carried out to measure hydrodynamic forces acting on a submerged hemisphere in a flow and under regular waves. The obtained results are summarized as follows; The drag and lift coefficients in a flow are constant. The measured longitudinal wave force is decomposed into the drag and the inertia forces by means of the Morison equation. As K.C. number increases, the longitudinal maximum wave force decreases almost proportionally. The vertical maximum wave force varies from 2 to 10 times of the longitudinal maximum wave force. The longitudinal drag and inertia coefficients under regular waves are given as a function of K.C. number, h/D and h/gT^2 .

Keywords: fish aggregation device, wave force, hemisphere, the Morison equation

1. はじめに

近年、大規模漁場開発に伴いコンクリート製およびスチール製の人工底設魚礁が研究・開発されるようになってきた。これらは形状、規模など多岐にわたっているものの、その大半が直線部材からなる骨構造を採用している。このため、投入された人工底設魚礁においては、蟄集した魚類を捕獲する時の網がかりによる魚網破損事故が数多く引き起こされ、沿岸・沖合い漁業における大きな問題となっている。

本研究では、以上の様なことを踏まえ、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、一方向流れ場ならびに波動場において作用する流体力の特性を中心に検討を加えている。まず、一方向流れ場に設置した半球型底設魚礁（以下、半球体と呼ぶ）に作用する流体力を測定し、抗力係数および揚力係数の特性について調べる。ついで、規則波を入射させた時の半球体模型に作用する波力ならびに水面変動の測定結果を用い、波力の時間的変化の特性や最大波力特性を明らかにする。最後に、波動場に設置された半球体に作用する波力の算定式を提案するとともに、各種波力係数とKeulegan-Carpenter数（以下では、K.C.数と略記する）およびReynolds数（以下では、Re数と略記する）との関係についても考察する。

2. 水理実験

(1) 次元解析

一方向流れ場に設置された半球体に作用する流体力 F_f は、次式に示すような物理量によって支配される。

$$F_f = \phi(\rho, \bar{U}_m, D, h, g, k, \mu) \quad (1)$$

ここに、 ρ : 水の密度、 $\bar{U}_m$: 断面平均流速、 D : 半球体の球径、 h : 静水深、 g : 重力加速度、 k : 粗度高さ、 μ : 水の分子粘性係数である。

代表量として ρ 、 $\bar{U}_m$ 、および D を用い、 π 定理によって式(1)を無次元化すれば、

$$\frac{F_f}{\rho \bar{U}_m^2 D^2} = \phi\left(\frac{h}{D}, \frac{\bar{U}_m^2}{gR}, \frac{\bar{U}_m D}{\nu}, \frac{k}{D}\right) \quad (2)$$

となる。ここに、 ν : 水の動粘性係数 ($= \mu / \rho$)、 $R = Bh / (B + 2h)$; 径深、 B ; 水路幅である。式(2)の右辺において、第1項の h/D は水深球径比、第2項の $\bar{U}_m^2 / gR$ はFroude数の自乗、第3項の $\bar{U}_m D / \nu$ は流れ場のRe数、第4項の k/D は相対粗度に相当する無次元量である。なお、本実験で用いた半球体模型の表面はすべて滑面であるため、以下の考察では無次元量 k/D を一定とみなして議論している。

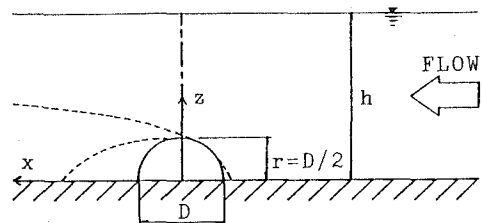


図-1 流れ場の座標軸

* 正会員 西松建設株式会社 技術研究所 (242 神奈川県大和市下鶴間2570番地4)

** 正会員 鳥取大学工学部土木工学科

また、半球体の球径が入射波長に比べて相対的に小さく回折波力が無視できる場合、半球体に作用する波力 F_w は、つぎに示すような8個の物理量に関係するものと考えられる¹⁾。

$$F_w = \phi(u_m, D, h, T, g, \rho, \mu, t) \quad (3)$$

ここに、 u_m ：水粒子速度の振幅、 T ：入射波の周期、 t ：時間である。

代表量として u_m 、 D および ρ を用い、一方向流れ場と同様に式(3)を無次元表示して整理すれば、半球体に作用する無次元波力 $F_w / \rho u_m^2 D^2$ は、次式によって支配される。

$$\frac{F_w}{\rho u_m^2 D^2} = \phi\left(\frac{u_m T}{D}, \frac{h}{D}, \frac{h}{g T^2}, \frac{u_m D}{\nu}, \frac{t}{T}\right) \quad (4)$$

ここに、 $\frac{u_m T}{D}$ ：K.C.数、 $\frac{u_m D}{\nu}$ ：波動場でのRe数、 $\frac{h}{g T^2}$ ：水深波長比に相当する無次元量、 $\frac{t}{T}$ ：無次元時間

である。なお、波力の最大値 F_m を対象とする場合には、無次元時間 t/T は無関係となり無視できる。

(2) 実験方法および実験条件

実験は、西松建設株式会社技術研究所の二次元鋼鉄製水槽（長さ 65m、幅1.0m、高さ1.6m）を用いて行われた。

水槽の一端には、ピストン型吸収式造波装置（三井造船システム技研株式会社製）が、他端にはシュロおよびウレタンメッシュから構成される消波装置が設置されている。さらに、同水槽には循環流発生装置が設置されており、最大流量0.2 m³/secまでの順流および逆流の一方向流が発生できる。したがって、流れ場の水理実験にも同水槽が利用された。なお、流れ場および波動場における x 、 y および z 軸については、図-1および図-2に示すように、それぞれ流れの方向あるいは波の進行方向、水槽横断方向および鉛直方向と定義している。

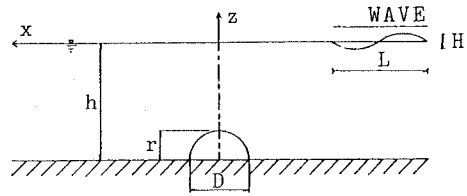


図-2 波動場の座標軸

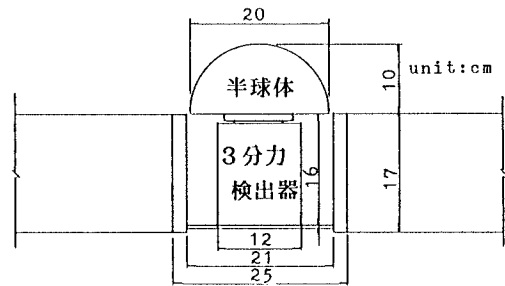


図-3 流体力検出装置の概略

波動場では、全ての実験ケースに対して、水位変動 (η)、波の進行 (x) 方向と鉛直 (z) 方向の水粒子速度 (u , w) および波力 (F_x , F_y , F_z) を同時計測している。特に、水位変動については、半球体頂点上で電気容量式波高計（計測技研株式会社製、CP-306型）によって測定した。また、流れ場での流体力および波動場での波力については、防水型3分力検出器（日章電気株式会社製、LMC-3502-5）の受感部にプラスチック製の半球体を取り付けた流体力検出装置を用いて計測した（図-3参照）。この3分力検出器は、互いに直交する三軸方向の荷重を測定できる多成分ロードセル

であり、その定格負荷は各成分ともに5 kgf で、測定前に十分な直線性が確認された（非直線性； $\pm 0.5\% F_s$ ）。なお、計測はサンプリング周波数100Hzで30 sec間行われ、デジタルレコーダー（ティアック株式会社、DR-F1）に収録された。

一方向流れ場での実験条件は、表-1に示すとおりである。半球体の球径は、20cm、10cmの2種類とした。また、水深については、80cm、60cm、40cmおよび20cmの4通りとして21ケースの実験を行った。

波動場における実験条件は、次元解析の結果に基づき表-2のように決定した。すなわち、半球体の球径を流れ場と同様に2種類 ($D=10, 20\text{cm}$) とし、ついで、静水深 (h) を80cm、60cmおよび40cmの3通りとし、それぞれの静水深において入射波の周期を5種類 ($T=1.2, 1.6, 2.0, 2.4, 2.8\text{ sec}$)、波高を3種類 ($H=3.0, 6.0, 9.0\text{ cm}$ あるいは $H=6.0, 9.0, 12.0\text{ cm}$) 変化させた。したがって、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。

表-1 実験条件（流れ場）

CASE	h(cm)	Q(l/sec)	$\bar{u}_m(\text{cm/sec})$	$Fr(\bar{u}_m/\sqrt{gR})$	$Re(\bar{u}_m/\nu) \times 10^3$		h/D	
					D=10	D=20	D=10	D=20
A	80	80	10.0	0.06	----	1.12	----	4.0
B	80	160	20.0	0.12	----	2.26	----	4.0
C	60	60	10.0	0.06	----	1.11	----	3.0
D	60	120	20.0	0.12	----	2.18	----	3.0
E	60	180	30.0	0.18	----	3.35	----	3.0
F	40	40	10.0	0.07	0.56	1.09	4.0	2.0
G	40	80	20.0	0.14	1.13	2.21	4.0	2.0
H	40	120	30.0	0.20	1.67	3.31	4.0	2.0
I	40	160	40.0	0.27	2.28	4.51	4.0	2.0
J	20	20	10.0	0.08	0.58	1.08	2.0	1.0
K	20	60	30.0	0.25	1.72	3.27	2.0	1.0
L	20	100	50.0	0.42	2.84	5.52	2.0	1.0
M	20	140	70.0	0.59	4.00	7.81	2.0	1.0

$$\bar{u}_m = Q/(Bh), \quad B=100\text{ cm}, \quad Fr = \bar{u}_m/\sqrt{gR}, \\ R = Bh/(B+2h), \quad Re = \bar{u}_m/\nu, \quad r = D/2$$

表-2 実験条件（波動場）

h(cm)	80.0, 60.0, 40.0
h/D	8, 6, 4, 3, 2
h/gT^2	0.057 -- 0.005
$u_m T/D$	7.35 -- 0.19
$u_m D/\nu$	6.31×10^4 -- 3.34×10^3

(3) 解析方法

半球体頂点上の波高計より得られる水位変動のデータをゼロアップクロス法によって N 個の波形に分割する

とともに、最初の2波および最後の波を除去した残りの $N-3$ 個を算術平均して、平均波高および平均周期を求めた。さらに、これらの値と静水深を用いて、Stokesの第3近似解より半球体頂点における水粒子速度 $u(t)$ およびその加速度 $\ddot{u}(t)$ を計算した²⁾。また、水粒子速度および波力の最大値（以下、添え m で示す）については、それぞれの時間的変化より求まる最大振幅値で定義している。

3. 実験結果および考察

(1) 一方向流れ場での流体力

一方向流れ場に設置された半球体の模型に作用する流体力は、主として流れ方向の抗力および流れに垂直な鉛直方向の揚力が卓越しているものと考えられる。本研究では、次式を用いてこれらの流体力を評価する³⁾。

$$F_{xf} = \frac{1}{2} C_{Df} \rho A_x \bar{U}_m^2 \quad (5)$$

$$F_{zf} = \frac{1}{2} C_{Lf} \rho A_z \bar{U}_m^2 \quad (6)$$

ここに、 F_{xf} ：流れ方向の流体力、 C_{Df} ：一方向流れ場の抗力

係数、 A_x ：流れ方向に射影した物体の面積（ $=\pi D^2/8$ ）、 F_{zf}

：鉛直方向の揚力、 C_{Lf} ：一方向流れ場の揚力係数、 A_z ：流れと直角方向に射影した物体の面積（ $=\pi D^2/8$ ）、

D ：半球体模型の球径、 $\bar{U}_m$ ：断面平均流速である。

図-4および図-5は、流体力の測定値より逆算して抗力係数 C_{Df} および揚力係数 C_{Lf} を求め、 Re 数（ $\bar{U}_m r / \nu$ 、 $r=D/2$ ：半径）で整理したものである。図-4より、本実験で対象とした Re 数の範囲内では、 C_{Df} はばらつきも小さく、ほぼ一定値をとることがわかる。図中には、その平均値 $C_{Df}=0.35$ が破線で示されている。定常流中に置かれた球の抗力係数は Re 数が $10^4 \sim 10^5$ の範囲で0.4とほぼ一定⁴⁾であり、底面の影響を含むここでの C_{Df} と単純に比較することはできないが、ほぼ妥当な結果が得られているものと判断される。また、図-5から揚力係数 C_{Lf} はばらつきが大きいものの、ほぼ一定値とみなせる。なお、図中にはその平均値 $C_{Lf}=0.81$ も破線で示されている。

(2) 波力の時間的変化に関する特性

図-6は、測定された x 、 y および z 方向の波力 F_x 、 F_y 、 F_z ならびに半球体頂部での水位変動 η の時間的変化の一例を示したものである。この場合の実験条件は、 $h=60\text{cm}$ 、 $D=20\text{cm}$ 、平均波高 $H=6.0\text{cm}$ および $h/gT^2=0.0157$ である。 F_x および F_z については、いずれも規則的な変化を示していることがわかる。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。特に、 F_x がプラス側で最大となった直後、 F_y の波形にパルス状の変動が1周期ごとに出現している。これについては、波動場における渦の離脱周波数 f_v と波動周波数 f_w との同調現象⁵⁾を導入すれば、説明が可能であるものと予想される。また、 η と F_x との間には、 $T/4$ 程度の位相差が生じている。これは、本研究で対象とした実験条件が、水粒子速度の2乗に比例する抗力よりむしろその加速度に比例する慣性力が卓越する領域に含まれ、加速度成分が顕著に現れたためと考えられる。同様に、 η と F_z の時間的変化の関係に注目すれば、 F_z の上向きの力は水位変動の峰位相で最小となり、谷位相で最大となっている。このことは、 F_z の値が水面変動による静水圧の変動とほぼ同一であることを示唆している。

非砕波の波による一様水深の波動場に設置された半球体に作用する F_y の時間的変化は、図

-7(a)~(c)に示すような3つのタイプに大きく分類できる。すなわち、a)1周期内に1組の極大値と極小値を有する単峰型波形（S型波形）、b)波の谷位相で鉛直下向きの波力が作用するために第2の極小値が出現する波形（T型波形）⁶⁾、c)1周期内に2組の極大値と極小値を持つ双峰型波形（ T_w 型波形）の3種類である。なお、同図中には、半球体頂点上部で計測された η の時間的変化と F_y の時間的変化に5Hz上の高周波成分を除去する

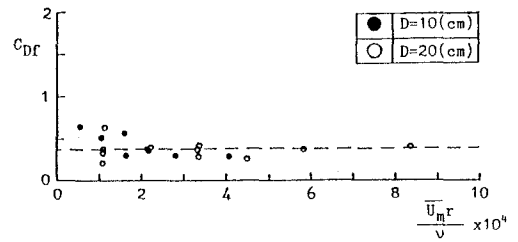


図-4 C_{Df} と Re 数との関係

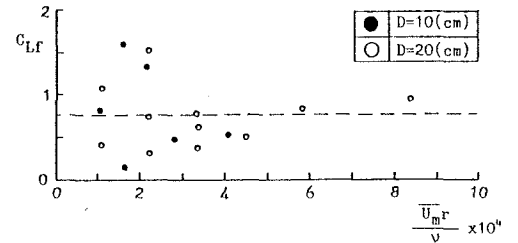


図-5 C_{Lf} と Re 数との関係

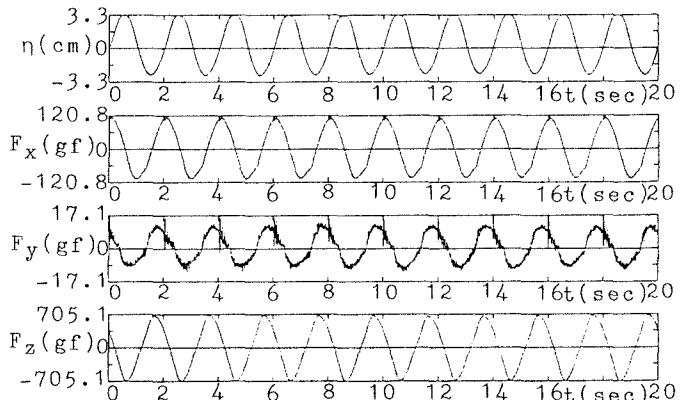


図-6 η と波力の時間的変化の一例（ $h=60\text{cm}$ 、 $D=20\text{cm}$ ）

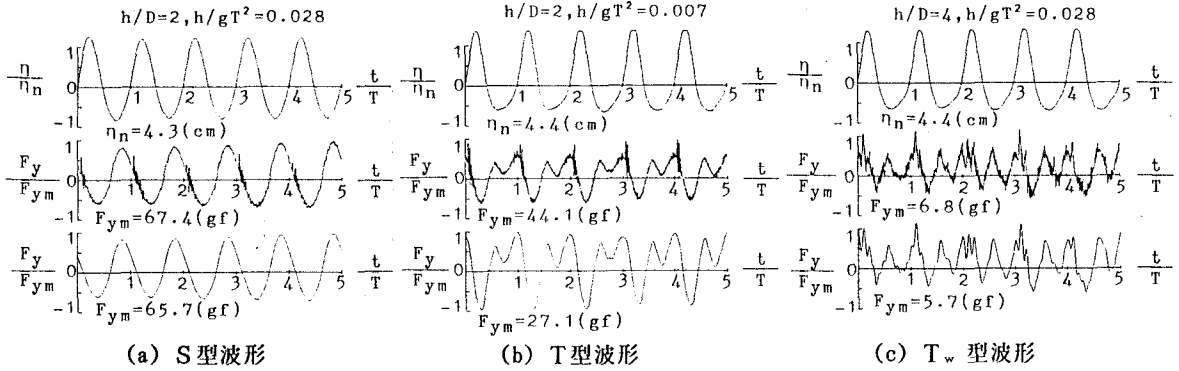


図-7 y 方向の波力 (F_y) の時間的变化

数値フィルターが施された後の結果も示されている。特に、 η についてはいずれの時間波形に対しても入射波の基本周波数 (f_w) 成分が卓越している。これらの図より判断すれば3つのタイプの時間的变化は、 h/gT^2 および h/D を支配無次元量として出現するものと考えられる。すなわち、図-7(a)および(b)の比較から、 h/gT^2 が小さく水粒子の水平方向の運動が鉛直方向の運動より大きい場合ほど、T型波形の出現率が高いことがわかる。さらに、図-7(b)および(c)より、 h/D が大きいほど T_w 型波形のような高次の周波数成分が卓越した波形が観測される。なお、水平方向波力 F_x および鉛直方向波力 F_z については、本実験条件の範囲に限りすべてS型波形であった。

(3) 最大波力の特徴

図-8は、 x 方向の無次元最大波力 F_{xm}^* ($=F_{xm}/\rho u_m^2 D^2$) と K.C. 数 ($u_m T/D$) との関係を示したものである。本実験が対象とした領域 (K.C. 数が7以下の領域) で、 F_{xm}^* は K.C. 数の-1乗に比例して減少する傾向が認められる。これは、慣性力が支配的な成分であったことを示しており、図-6で例示された η および F_x の波形記録の比較からも既に予想されたことである。さらに、同様な特性は波動場に置かれた没水球体の最大波力特性においても報告されている⁷⁾。

z 方向の無次元最大波力 F_{zm}^* ($=F_{zm}/\rho u_m^2 D^2$) と K.C. 数 ($u_m T/D$) との関係を示したものが図-9である。 F_{zm}^* の特性と比較すれば多少のばらつきが認められるものの、 F_{zm}^* は K.C. 数の増加とともに傾き-1/2で減少している。ばらつきの原因としては、水平方向の水粒子速度 u による揚力や水面変動に伴う静水水圧の変化が考えられる。

図-10は、 z 方向の最大波力 F_{zm} を半球体に作用する浮力 $\rho g V$ ($=\rho g \pi D^3/12$) で無次元化した値 F_{zmV}^* と Froude数に相当する無次元量 $u_m/\sqrt{gD}$ との関係を示している。図-9と比較すれば、データのばらつきもほとんどなく、無次元最大波力 F_{zmV}^* は $u_m/\sqrt{gD}$ に比例して増加する傾向を有している。これは次のように解釈できる。すなわち、

$$F_{zmV}^* \sim \frac{F_{zm}}{\rho g D^3} = \frac{F_{zm}}{\rho u_m^2 D^2} \cdot \frac{u_m^2}{g D}$$

であり、一方、

$$\frac{u_m}{\sqrt{gD}} = \frac{u_m T}{D} \cdot \sqrt{\frac{h}{gT^2}} \cdot \sqrt{\frac{D}{h}}$$

である。図-10は、

$$\frac{F_{zm}}{\rho g D^3} = f_1 \left(\frac{u_m}{\sqrt{gD}} \right)$$

の関係をj示しているが、上述の関係を適用すると

$$\frac{F_{zm}}{\rho u_m^2 D^2} = \left(\frac{u_m}{\sqrt{gD}} \right)^{-2} \cdot f_1 \left(\frac{u_m}{\sqrt{gD}} \right) = f_2 \left(\frac{u_m}{\sqrt{gD}} \right)$$

となる。さらに上式の右辺は、

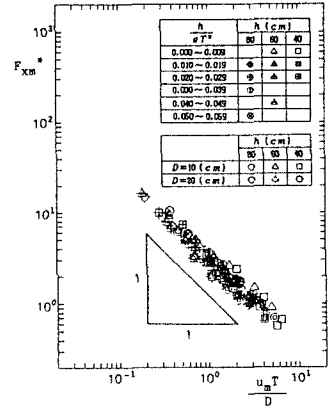


図-8 F_{xm}^* と K.C. 数の関係

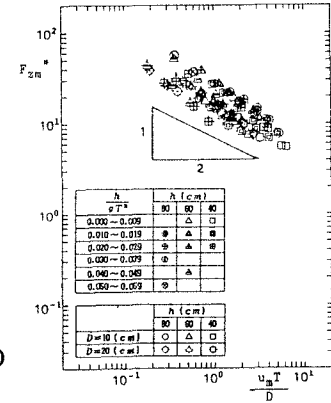


図-9 F_{zm}^* と K.C. 数の関係

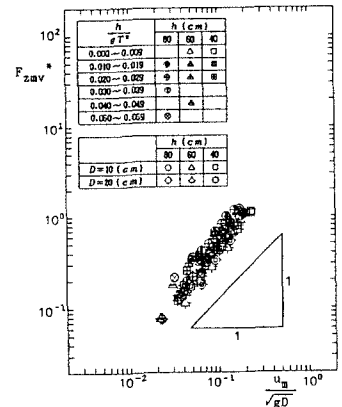


図-10 F_{zmV}^* と $u_m/\sqrt{gD}$

との関係

$$\frac{F_{zm}}{\rho u_m^2 D^2} = f_2 \left(\frac{u_m T}{D} \cdot \sqrt{\frac{h}{g T^2}} \cdot \sqrt{\frac{D}{h}} \right)$$

と表わせる。したがって、変数 $u_m/\sqrt{gD}$ は、式(4)の右辺第1項 $u_m T/D$ 、第2項 h/D および第3項 h/gT^2 の3つの独立変数を組み合わせた新しい変数であり、 $F_{zm}/\rho u_m^2 D^2$ あるいは $F_{zm}/\rho g D^3$ が新しい1つの変数 $u_m/\sqrt{gD}$ で統一的に表現できることを示している。

図-11 および図-12 は、それぞれ x 方向の最大波力 F_{xm} に対する F_{zm} および F_{ym} の比と K.C. 数 ($u_m T/D$) との関係を示したものである。 F_{zm}/F_{xm} の値は、K.C. 数の増加とともに増大する傾向を示し、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鉛直方向波力の卓越が明らかになった。この主要因としては、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⁹⁾が考えられる。一方、 F_{xm} に対する F_{ym} の比は、K.C. 数に關係なく、ほぼ0.1から0.3の間に含まれている。したがって、 F_{xm} および F_{zm} と比較すれば、 F_{ym} が単体の半球体に及ぼす影響は工学的に極めて小さいものと判断される。

(4) 波力算定式と波力係数

上述されたように波力の時間的変化特性および最大波力特性に基づき、本研究では、水平方向の波力 F_x の算定には、次式に示すような Morison 式を適用することにした。

$$F_x = \frac{1}{16} \rho \pi C_D D^2 u |u| + \frac{1}{12} \rho \pi C_M D^3 \frac{du}{dt} \quad (7)$$

一方、鉛直方向の波力 F_z については、つぎに示す揚力の算定式を採用する⁹⁾。なお、この式では設計および安定計算の上で重要となる F_{zm} の値のみが算定される。

$$F_{zm} = \frac{1}{16} \rho \pi C_L D^2 u_m^2 \quad (8)$$

ここに、 C_L : 揚力係数、 u_m : 1周期における水粒子速度の最大値で、本研究では半球体頂点での値を代表流速と定義している。なお、式(7)中の抗力係数 C_D および慣性力係数 C_M を計算する方法としては、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。

図-13 は、 x 方向の慣性力係数 C_M と K.C. 数 ($u_m T/D$) との関係を示したものである。慣性力係数 C_M は、K.C. 数、 h/gT^2 および h/D に關係なく、ほぼ一定となることがわかる。さらに、その値は、ポテンシャル理論によって求められた球の慣性力係数 1.5 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。

図-14 に x 方向の抗力係数 C_D と K.C. 数の関係を示す。Jenkins & Inman の実験結果¹⁰⁾と同様に、抗力係数 C_D は全体的な傾向として K.C. 数 ($u_m T/D$) 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、非常にばらつきも大きく、有意な傾向を示しているとは言い難い。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、その原因として流速と位相がずれる粘性抵抗力の卓越によるものと説明されている¹¹⁾。

さらに、抗力係数 C_D と Re 数との関係を調べたものが図-15 である。 Re 数の増加とともに、 C_D の値は減少傾向になっている。また、明瞭ではないが、 h/D の値を固定した場合、 h/gT^2 が小さく一様振動流に近くなるほど抗力係数 C_D は、 Re 数の増加にともない減少の傾向を示している。しかしながら、 C_D と K.C. 数の関係と同様に有意な特性は見い出されなかった。

図-16 は、式(8)の右辺にある揚力係数 C_L を K.C. 数に対してプロットしたものである。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¹²⁾が、正弦振動流中において球に

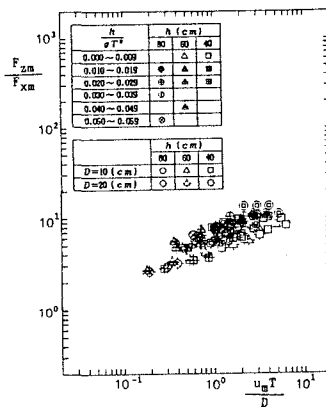


図-11 F_{zm}/F_{xm} と K.C. 数の関係

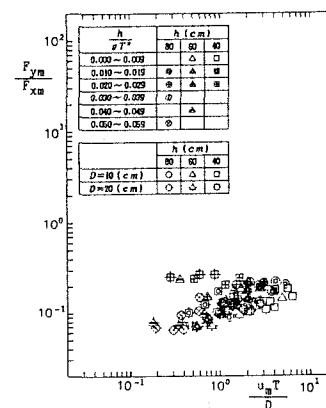


図-12 F_{ym}/F_{xm} と K.C. 数の関係

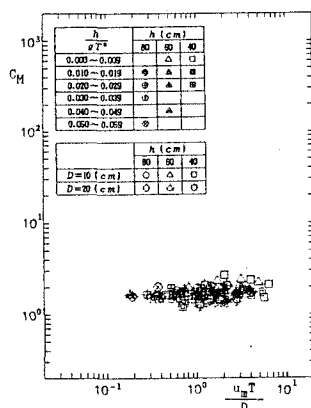


図-13 C_M と K.C. 数の関係

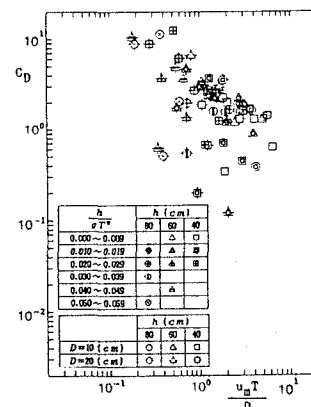


図-14 C_D と K.C. 数の関係

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り、本実験で測定された z 方向の波力（揚力）が極めて大きかったことによるものと判断される。

4. おわりに

本研究では、構造的にも水理学的にも優れ、網がかりも少ない新型の人工底設魚礁を開発するため、「無孔半球型底設魚礁」を提案するとともに、それに作用する波力および流体力の特性について、水理実験に基づいて検討した。得られた結果を要約すると以下のようなものである。

(1) 一方向流れ場における抗力係数は、本実験の範囲内 (Re 数 $= 10^4 \sim 10^5$) では、 Re 数に関係なく一定値をとり、その値は0.35であった。一方、揚力係数は、かなりばらつきが認められるものの、 Re 数に関係なく平均値で0.81とほぼ一定値となった。

(2) 規則波によってこの魚礁に作用する波力は、波の進行方向に作用する水平波力 (x 方向)、それに垂直な水槽横断方向の揚力 (y 方向) および鉛直方向の揚力 (z 方向) であり、水平波力および z 方向の揚力に関する時間的变化は波の1周期内に一組の極大値と極小値が出現するS型波形であった。一方、 y 方向のそれはS型波形、波の谷の位相で第2の極小値が出現するT型波形および1周期内に二組の極大および極小値が出現する T_w 型波形に分けられることが確認された。

(3) 水平方向波力は、本実験の範囲内では、Morison 式によって算定されることが明らかとなった。その抗力係数は、K.C. 数および Re 数の増加に伴い減少すること、慣性力係数はK.C. 数、 h/gT^2 および h/D に関係なく、ほぼ一定値であることがわかった。

(4) 鉛直方向の無次元最大波力は $u_m/\sqrt{gd}$ に比例することがわかった。また、式(8)を適用して鉛直方向の波力を算定する場合、K.C. 数の増加に伴いほぼ $-1/2$ 乗で減少することも確かめられた。さらに、鉛直方向の最大波力は、水平方向のその 2~10倍といった予想外の大きな値をとることが判明した。

(5) 水槽横断方向の波力は、 h/gT^2 の値が小さいほどT型波形が、また h/D の値が大きいほど T_w 型波形の出現率が高くなる。ただし、この波力は水平方向波力に比べて小さく半球型魚礁の安全性を検討するときにはほとんど無視できることが明らかとなった。

《参考文献》

- 1) 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。
- 2) 柏見吉晴：魚礁の水理機能に関する基礎的研究，大阪大学博士論文，1988。
- 3) 土木学会水理委員会 編：水理公式集，土木学会，pp.70~71，1985。
- 4) Schlichting, H.: Boundary Layer Theory, 7th Edition, McGraw-Hill, p.17, 1979。
- 5) 浅野敏之：波と流れの共存場における水理特性に関する研究，京都大学博士論文，1986。
- 6) 岩田好一郎・水谷法美・川角伸彦：没水球体に作用する鉛直方向波力に及ぼすBoundary Proximityの効果，土木学会論文集，第417号/II-13，pp.219~228，1980。
- 7) 岩田好一郎・水谷法美・川角伸彦：波動場におかれた没水球体近傍の流れの特性と波力に関する研究，第35回海岸工学講演会論文集，pp.612~616，1988。
- 8) 岩田好一郎・水谷法美・川角伸彦：没水球体に作用する波力の特性に関する実験的研究—Morison 式の適用限界について—，第34回海岸工学講演会論文集，pp.601~605，1987。
- 9) 西平福宏・松原雄平・野田英明：半球型底設魚礁の水理機能に関する研究，海洋開発論文集，vol.5，pp.251~255，1989。
- 10) Jenkins, S.A. and D.L. Inman: Forces on a sphere under linear progressive waves. Proc. 15th Int. Conf. on Coastal Eng., pp.2413~2428, 1976。
- 11) 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。
- 12) 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。

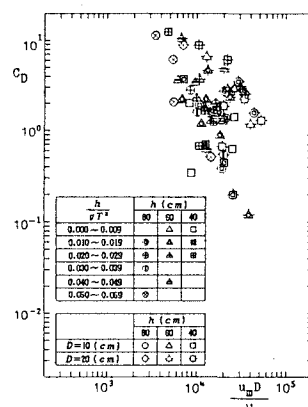


図-15 C_D と Re 数の関係

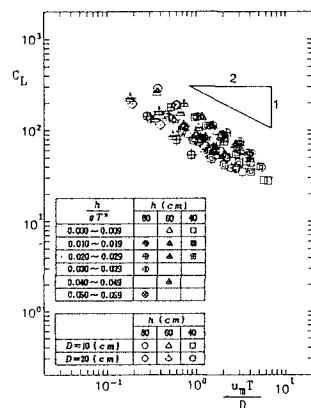


図-16 C_L と K.C. 数の関係