

有孔半球型底設魚礁の水理特性に関する実験的研究

Experimental Study on Hydraulic Characteristic of a Submerged Perforated Hemispheric Structure for a Fish Aggregation Device under Regular Waves and in Flows

西田秀紀*・水野 晋*・多田彰秀*・西平福宏*

Hidenori.Nishida,Susumu.Mizuno,Akihide.Tada,Fukuhiko.Nishihira

This paper deals with the development of a new-type perforated-hemisphere for fish aggregation which produces a rising current from its top pore. Laboratory experiments were carried out to realise a rising current by means of flow visualization and to measure hydrodynamics forces acting on a submerged perforated-hemisphere under a regular wave and in a flow. The obtained results are summarized as follows; (1)It is very effective for producing a rising current to insert a bulkhead into a perforated-hemisphere. (2)A small-scale rising current is found in the region of $1.0\sim 1.5\cdot D$ from the center of a perforated-hemisphere, where D is a diameter of it. (3)The vertical wave force acting on a perforated-hemisphere decreases qualitatively with increasing a pore diameter.

Keywords: fish aggregation device, perforated-hemisphere, rising current, wave force

1. はじめに

筆者らは、構造的にも水理学的にも優れ、網がかりも少ない無孔の半球型底設魚礁を既に提案し、これに作用する波力の基本的特性について報告している。その結果、予想以上に鉛直方向波力が卓越することが明らかにされた¹⁾。本研究では、実用化に向けた基礎的な技術資料をさらに収集する目的で、有孔の半球型底設魚礁（以後、有孔半球体と呼ぶ）を新たに提案するとともに、波浪場および流れ場における水理特性を中心に検討している。まず、蛍光染料を用いた可視化実験より、波浪場および流れ場に設置された有孔半球体周辺部の流れ特性を明らかにする。このように魚礁周辺部の流れ特性を把握することは、魚類の鰓集に関係する上昇流の発生やそれに伴う水塊混合およびプランクトンなど魚類の餌を滞留させ得る効果の有無を判断する上で極めて有用な情報となるからである。ついで、規則波を入射させたときの有孔半球体に作用する波力並びに水面変動の測定結果を用いて、最大波力の特性および波進行方向の波力係数とKeulegan-Carpenter数（以下では、K.C.数と略記する）との関係などについて考察する。最後に、流れ場に設置された有孔半球体の流体力係数についても検討している。

2. 有孔半球型底設魚礁

本研究では、①鉛直方向波力の軽減、並びに②魚類の鰓集と密接な関係のある魚礁近傍での上昇流を活発に発生させることを主目的に、図-1に示すような有孔半球体のモデルを提案する。このモデルは、半球体頂部に1個、側面部に4個の孔を有している。さらに、半球体内部は十字の隔壁板によって4つの部屋（空隙部）に分割されており、それぞれは側面および頂部の孔と通じている。すなわち、側面の孔から半球体内部の空隙部に流入した水粒子は、頂部の孔から半球体外部へ流出することも十分可能である。

なお、米国の“IGL00”（an Doren Industries, Inc.製）やわが国のタートルブロック（総合コンクリートブロック開発工業株式会社製）等は、有孔半球体と同種のものであるが、両者ともに半球体の最大直径が2~5m程度的小型ブロックである。一方、本研究で対象としている有孔半球体の直径は5~15m程度であり、両者より比較的大きな海洋構造物であるといっても過言ではない。さらに、有孔半球体では上述したような隔壁板の導入によって半球体内部を4つの空隙部に分割していることが、IGL00およびタートルブロックとは大きく相違する点である。隔壁板の導入効果については、可視化実験結果に関する考察において後述する。

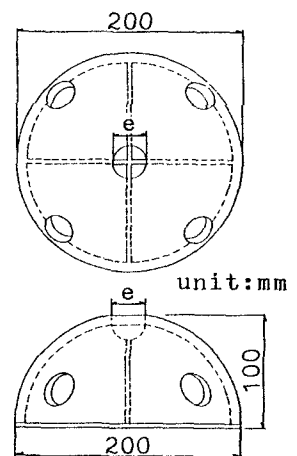


図-1 実験模型の模式図

3. 実験方法

実験は、西松建設(株)技術研究所の二次元造波水槽(長さ65m, 幅1.0m, 高さ1.6m)を用いて行われた。同水槽には循環流発生装置が設置されており、流れ場の水理実験にも利用された。なお、波浪場および流れ場における x , y および z 軸については、図-2に示すように、それぞれ波の進行方向あるいは流れの方向、水槽横断方向および鉛直方向と定義している。

(1) 可視化実験

可視化実験に際しては、有孔半球体内部に内径 1mmのビニールパイプで蛍光染料(フルオレセインナトリウム)の吹き出し口を設け、染料を流して可視化を行った。結果についてはすべて目視観察を行うとともに、ビデオカメラでその状況を撮影し、染料の定性的および定量的な挙動について考察を加えた。

(2) 波力および流体力の計測実験

波浪場での波力および流れ場での流体力については、水圧補償型3分力検出器(日章電気株式会社製, 定格負荷5kgf, LMC-3502-5WP)の受感部にプラスチック製の有孔半球体モデルを取り付けた流体力検出装置を用いて測定した。なお、水圧補償型では水位変動に伴う静水圧分の変動を相殺し、鉛直方向に作用する正味の波力のみが計測できるようになっている。特に、波浪場では水位変動(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3方向の波力(F_x , F_y , F_z)を同時計測している。なお、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。

計測は、サンプリング周波数 100Hzで30sec 間行われ、3Hz 以上の高周波成分を除去する数値フィルターを施した後、デジタルレコーダ(TEAC株式会社, DR-F1)に収録された。

(3) 3分力検出器固定部の改良

無孔半球型底設魚礁(以後、無孔半球体と呼ぶ)に関する水理実験より、鉛直方向波力の最大値(F_{zm})は、波進行方向波力の最大値(F_{xm})の2~10倍と予想以上に卓越する結果が得られた¹⁾。今後、半球型底設魚礁の実用化を目指した構造設計や安定計算等を行っていく上では、その原因を明らかにしておくことが必要であるものと判断した。そのため、有孔半球体に作用する波力および流体力の計測を開始するにあたり、次のような予備実験を行った。まず、3分力検出器を固定しているマウンド下部での造波時の流況を可視化実験より調査した。その結果、水路横断方向に複雑な流れの存在が確認され、それがマウンド下部での圧力低下を引き起こしているものと推測された。そこで、圧力センサーを用いて水槽部とマウンド下部での圧力同時計測を実施した。その結果、マウンド下部において圧力低下を起こしていることが定量的にも確認された。したがって、このような横断方向流れの影響が3分力検出器に及ばないようにマウンド下部の検出器固定部に改良を加えた。なお、改良後計測された無孔半球体に関する F_{zm}/F_{xm} の値はK.C.数に関係なくほぼ0.2~0.4となり、前回より極めて小さい値となった。本研究においても、改良された3分力検出器を用いて波力および流体力の計測を行っている。

4. 実験条件

本実験では球径 $D=20\text{cm}$ の有孔半球体を用いた。さらに、5つの孔の直径 e については全て同一径とし、4種類(3cm, 4cm, 5cmおよび6cm)に変化させ、孔径比の影響についても調べた。

(1) 波浪場

波浪場における実験条件は、表-1に示すとおりである。すなわち、静水深(h)を3種類(80cm, 60cm, 40cm)、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 180ケースとなった。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。

(2) 流れ場

流れ場での実験条件は、表-2に示すとおりである。また、水深は一定(40cm)とし、流速は 0cm/sec~50cm/secの間から10種類設定して実験を行った。なお、実験ケースは合計40ケースとなった。

5. 解析方法

(1) 可視化結果の定量的評価方法

本研究では有孔半球体内部に導入されている隔壁板の有無並びに孔径比 e/D の違いが上昇流発生に及ぼす影響

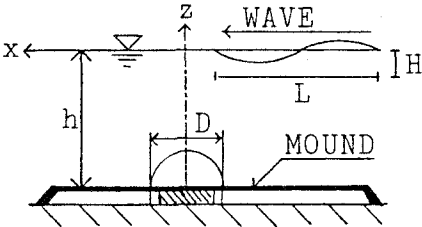


図-2 定義図

表-1 実験条件 ($D=20\text{cm}$)

h/D	4, 3, 2
e/D	0.3, 0.25, 0.2, 0.15
h/gT^2	0.057 ~ 0.005
$u_m T/D$	3.670 ~ 0.680

表-2 実験条件 ($D=20\text{cm}$)

h/D	2
e/D	0.3, 0.25, 0.2, 0.15
UD/v	83000 ~ 8300
$U/\sqrt{gD}$	0.360 ~ 0.035

を定量的に明らかにするため、図-3に示すような h_{max} , L_N および L_F を定義し、これらの量をビデオテープのコマ送り(1/30sec)から目視によって読みとった。なお、 h_{max} は有孔半球体頂部からの染料の最大吹き出し高さであり、 L_N はその水平移動距離である。また、 L_F は沖側の側孔から吹き出る染料の最大水平移動距離である。

(2) 水粒子速度の算出方法

有孔半球体頂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を用いて統計解析し、有孔半球体上方での平均波高 H_a および平均周期 T_a を求めた。さらに、有孔半球体頂端での水粒子の速度および加速度は、 H_a , T_a , h をStokesの第三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(以降、添え字 m で表す)については、それぞれの時間波形より求まる最大振幅で定義した。

6. 実験結果および考察

(1) 有孔半球体近傍の流れ特性

a) 波浪場における可視化実験； 図-4(a)~(d)は、代表波 $T = 2.8$ sec, $H = 9.0$ cm の造波条件下で、1周期間に有孔半球体頂部および側面の孔($e/D = 0.15$)から吹き出る染料の定性的な挙動を、 $T/4$ secごとにビデオテープのコマ送りからスケッチしたものである。図中には、各時間に対応する水面波形も描かれている。なお、ここでの波は図の右側から左側へ進行する規則波であり、以下の説明では有孔半球体に対して左を岸側、右を沖側と呼ぶことにする。

鉛直上向きの水粒子の流速成分が出現すると、図-4(a)のように半球体頂部の孔より染料がほぼ真上に吹き出る。その後、水平方向の流速成分が反転し岸側方向に増大すると、染料の先端は岸側上部に向かって移動する。図-4(b)は半球体頂部を波の峰が通過したときのスケッチであり、水粒子の水平流速は最大となっている。波進行方向で流速ベクトルが鉛直下向きになると、染料は半球体に沿って岸側へ移動し、半球体下端付近まで広がっていく。水平方向の流速成分が沖向きに反転を開始する図-4(c)では新たに半球体頂部および沖側側面の孔から染料が吹き出す。さらに、水面変動に伴って沖向きの水平流速が増大していくと、染料はそれぞれ沖側の斜め上方および水路床に向かって広がっていく。一方、岸側の染料は全体的に薄まりながら落下し、反転流速によって半球体近傍へ押し戻される傾向にある。また、半球体上を波の谷が通過する図-4(d)では、沖向きの水平流速成分が最大、鉛直流速成分がほぼ0となるために側面の孔からでた染料は水路床に沿って舌状に沖側へ広がっていく。以上が、代表波の1周期間に有孔半球体近傍で目視観測された染料の定性的な挙動である。さらに、図-5は、図-4(d)の状態から4~5波程度波が通過した後の染料の広がりをスケッチしたものである。染料は、岸側や沖側よりむしろ有孔半球体上方に広く分布しているのがわかる。

h_{max}/D とK.C.数との関係を示したものが図-6であり、隔壁板の有無ならびに孔径比 e/D がパラメータとして採用されている。この図から、 h_{max}/D の値はK.C.数および e/D の値にかかわらずほぼ一定値になっていることが確認される。さらに、隔壁板を有する有孔半球体の h_{max}/D 値は0.8~0.9となり、隔壁板のない場合より約2~3倍大きくなる。これは、隔壁板が半球体内部の水塊を頂部の孔から外部へ吹き出させる効果を有しているものと判断される。なお、目視

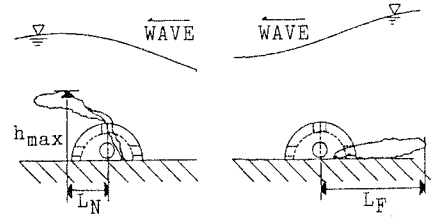
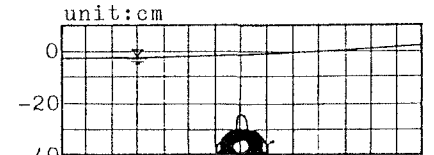
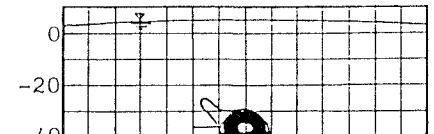


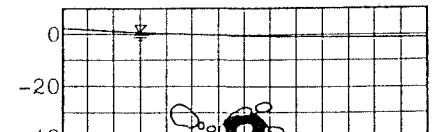
図-3 可視化実験の模式図



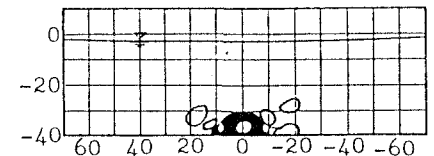
(a) $t/T = 0$



(b) $t/T = 1/4$



(c) $t/T = 2/4$



(d) $t/T = 3/4$

図-4 染料の挙動

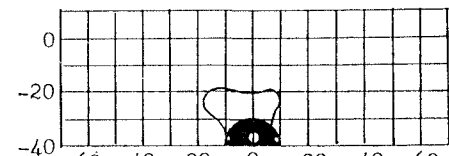


図-5 染料の拡散状況

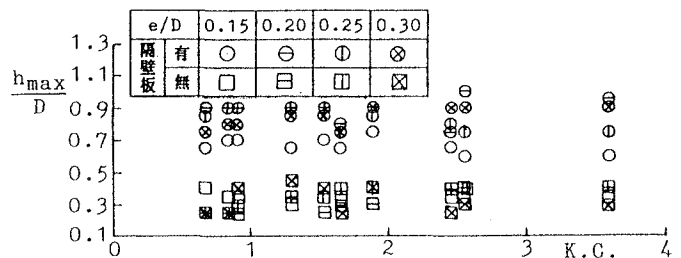


図-6 h_{max}/D とK.C.数の関係

観測からは孔径比 e/D が大きいほど頂部から吹き出る染料（水塊）の量も多くなっていることが認められた。一方、図-7および図-8はそれぞれ L_N および L_F とK.C.数との関係を示したものである。 L_N/D の値はばらつきが大きいものの、孔径比 e/D ごとにほぼ一定値となっていることがわかる。一方、 L_F/D の値については、K.C.数の増加とともに正比例して増大している。また、 e/D が大きいほど沖側の側孔からの吹き出し量も多いことが確認された。

b)流れ場での可視化実験； 流れ場に設置された有孔半球体近傍の流れ特性を明らかにするため、波浪場の場合と同様に蛍光染料を用いた可視化実験を行った。図-9に示されるように、頂部の孔より吹き出た染料が有孔半球体の後流域において最も上昇した地点の高さを h_{Fmax} ，その地点までの半球体中心からの水平距離を l_{Fmax} と定義し、これらの値をビデオテープのコマ送りから読みとった。その結果、 h_{Fmax}/D および l_{Fmax}/D とともに Re 数 (UD/ν) に関係なく、ほぼ0.50~0.55となることが確認された。

(2) 有孔半球体に作用する波力特性

a)最大波力の特性； 図-10は、最小孔径3cm($e/D=0.15$) および最大孔径6cm($e/D=0.30$) の有孔半球体に作用する 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4 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であったものと物理的に解釈される。同様の特性については、波浪場に置かれた没水球体の最大波力においても報告されている²⁾。さらに、孔径比 e/D の違いの影響は F_{xm}^* の特性に現れていないことが確認される。

図-11および図-12は、それぞれ孔径比 $e/D=0.15$ および $e/D=0.30$ に対応する x 方向の最大波力 F_{xm} に対する鉛直方向の最大波力 F_{ym} の比 F_{ym}/F_{xm} とK.C.数との関係を示したものである。両図より、 h/gT^2 の減少に伴って F_{ym}/F_{xm} の値は小さくなる傾向が読みとれる。すなわち、 h/gT^2 が小さく水粒子の水平方向運動が鉛直方向運動より卓越する場合ほど、鉛直方向波力は小さくなる。さらに、 F_{ym}/F_{xm} の平均値は、孔径比 e/D の増大とともに減少することが認められる。このことは、図-10の結果も考慮に入れば、孔径の増大に伴って有孔半球体に作用する鉛直方向波力が低減するものと解釈される。

図-13は、 x 方向の最大波力 F_{xm} に対する水路横断方向の最大波力 F_{ym} の比とK.C.数との関係を示したものである。 F_{ym}/F_{xm} の値は大きなばらつきを示しているものの、孔径比 e/D およびK.C.数に関係なくほとんど0.1 以下の値となっている。したがって、 F_{xm} および F_{ym} と比較すれば、 F_{ym} の有孔半球体 (単体礁) に及ぼす力学的影響は小さいものと判断される。

b)波力算定式と波力係数； 非碎波の波による有孔半球体に作用する水平方向波力 F_x の時間的な変化では、すべて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) となることが確認された。この特性に基づき、ここでは水平方向波力 F_x の算定に次式のような Morison 式を適応することにした。

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

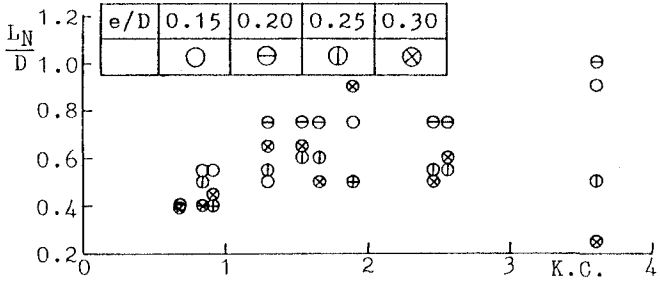


図-7 L_N/D とK.C.数の関係

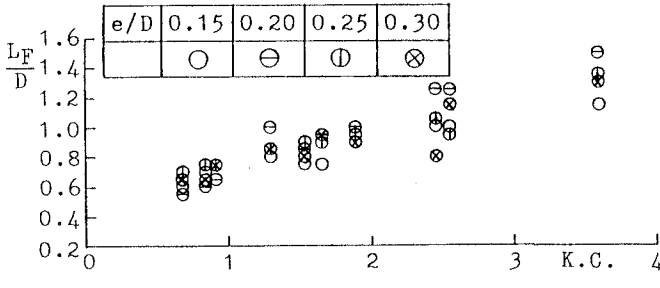


図-8 L_F/D とK.C.数の関係

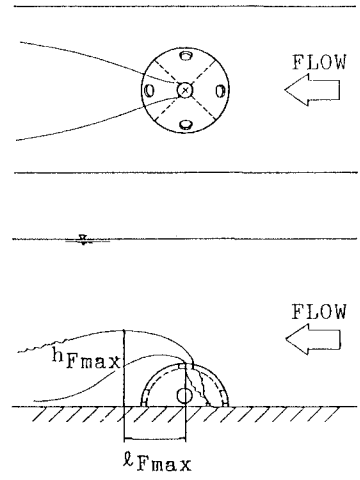


図-9 可視化実験の模式図

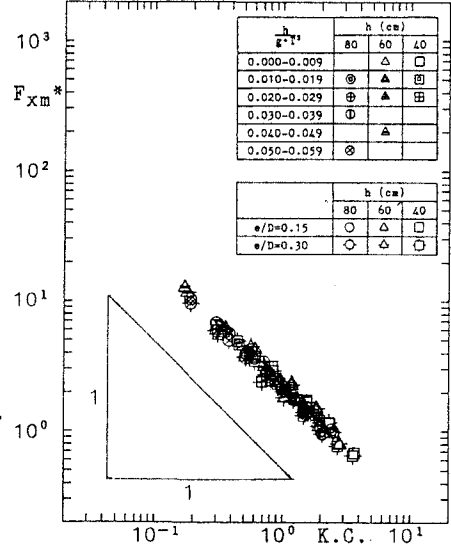


図-10 F_{xm}^* とK.C.数の関係

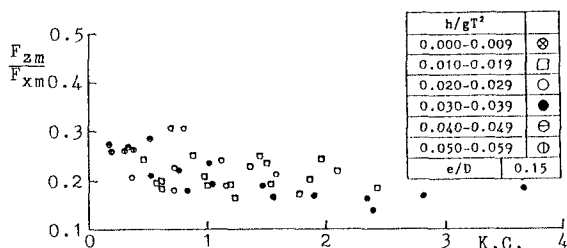


図-11 F_{zm}/F_{xm} と K.C. 数の関係

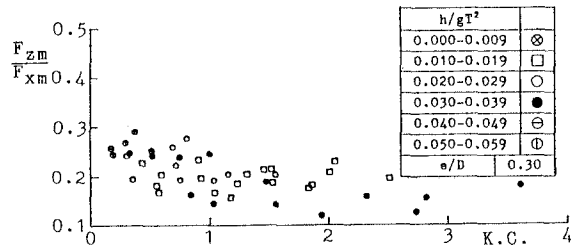


図-12 F_{zm}/F_{xm} と K.C. 数の関係

ここに、 C_{Dx} : x 方向の抗力係数、 C_{Mx} : x 方向の慣性力係数、 u : 水粒子速度である。上式中の C_{Dx} および C_{Mx} を算定する方法としては、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用いて求めている³⁾。

図-14 は、最小孔径 3cm ($e/D=0.15$) および最大孔径 6cm ($e/D=0.30$) の有孔半球体における慣性力係数 C_{Mx} と K.C. 数 ($u_m T/D$) との関係を示したものである。 C_{Mx} は、K.C. 数、 h/gT^2 および e/D に関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 より小さくなっているものの、ほぼ妥当な結果が得られたものと判断される。なお、図中には無孔半球体の慣性力係数 (平均値) も実線で示されており、ここで求められた C_{Mx} の平均値とほぼ同じ値となっている。

図-15 は、孔径比 $e/D=0.15$ および $e/D=0.30$ の有孔半球体における x 方向の抗力係数 C_{Dx} と K.C. 数 ($u_m T/D$) との関係を示したものである。Jenkins & Inman の実験結果⁴⁾と同様に C_{Dx} は、K.C. 数の増加に伴って減少することが認められる。また、図中の実線は無孔半球体の抗力係数に対する実験回帰式である。本研究で得られた有孔半球体の C_{Dx} の特性とよく一致していることが認められる。

(3) 有孔半球体に作用する流体力特性

流れ場に設置された有孔半球体の流体力特性を明らかにするため、有孔半球体に作用する水平方向の流体力を測定した。本研究では、次式を用いてこの流体力を評価する。

$$F_{xf} = \frac{1}{2} C_{Df} \rho A_x U_m^2 \quad (3)$$

ここに、 F_{xf} : 流れ方向の流体力、 C_{Df} : 流れ場の抗力係数、 A_x : 流れ方向に射影した物体の面積 ($=\pi D^2/8$)、 D : 有孔半球体の球径、 U_m : 有孔半球体頂点の流速である。

図-16 は、孔径比 e/D をパラメータとし、流体力の測定値と式(3)より逆算した抗力係数 C_{Df} を Re 数でまとめたものである。ここで対象とした Re 数の範囲内では、孔径の違いによる差は認められず、ほぼ一定値をとることがわかる。一般に、定常流中に設置された球の抗力係数は Re 数が $10^4 \sim 10^5$ の領域で 0.4~0.5 と一定であると報告されている⁵⁾。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、図中の破線は無孔半球体の場合の C_{Df} の平均値を示したものである。有孔および無孔に関係なく抗力係数はほぼ一定値となることも確認される。

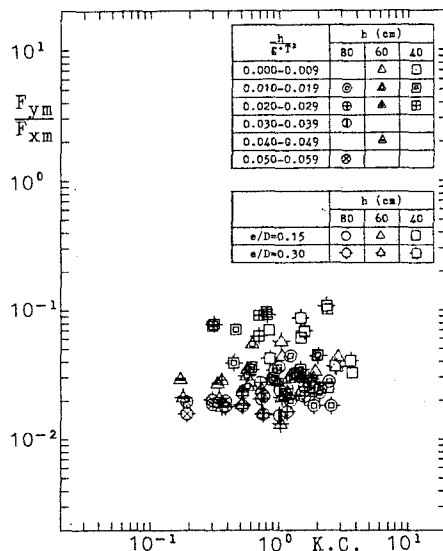


図-13 F_{zm}/F_{xm} と K.C. 数の関係

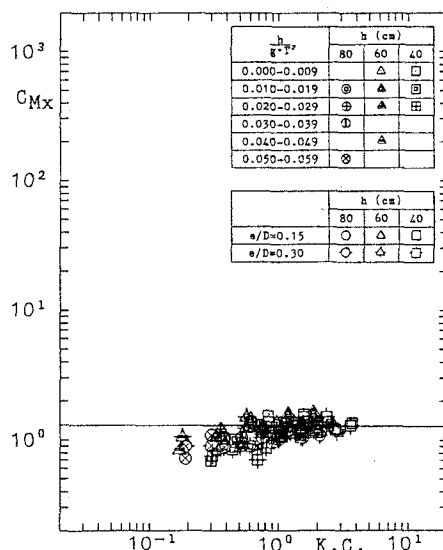


図-14 C_{Mx} と K.C. 数の関係

7. おわりに

本研究では、半球型底設魚礁の実用化を目指し、内部に隔壁板を有する「有孔半球型底設魚礁」を新たに提案するとともに、波浪場および流れ場における水理特性を中心に水理実験を通して検討を加えた。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) 有孔半球体周辺部の流れ特性

a) 代表波の1周期内に孔から吹き出る染料の定性的な挙動より、波の位相によって染料の吹き出し形態が大きく異なることが明らかとなった。

b) h_{max} , L_N および L_F に関する定量的な評価より、隔壁板の存在が上昇流発生に大きく貢献していることがわかった。さらに、半球体中心からその直径 D の1.0~1.5倍程度の領域内においては、活発な吹き出しに伴う上昇流や水路床に沿った沖向きの流れが確認された。

以上より、頂部周辺部の上昇流や水路床に沿った流れに伴って、魚類の鰓集に関連する小規模な水塊混合が発生しているものと予想される。これらを有効に利用し、魚類の鰓集効果をさらに高めることができるものと考えられる。そのため、複数個の有孔半球体から成る群体礁について、その配置も含めて今後とも検討していく必要がある。

(2) 有孔半球体に作用する波力特性

a) K.C. 数が4以下の領域内に限れば、 x 方向の無次元最大波力 F_{xm}^* は、 e/D に関係なくK.C. 数の-1乗に比例して減少した。

b) z 方向波力の最大値 F_{zm} は、 x 方向波力の最大値 F_{xm} の0.4倍以下となり、孔径の増大とともに減少することがわかった。

c) x 方向の最大波力に対する水路横断方向の最大波力の比 F_{ym}/F_{xm} は、孔径比 e/D およびK.C. 数に関係なくほぼ0.1以下の値となり、 F_{ym} が有孔半球体（単体礁）に及ぼす力学的影响は小さいことが確認された。

d) x 方向の慣性力係数 C_{Mx} は、K.C. 数、 h/gT^2 および e/D に関係なくほぼ一定となり、さらに、その値は無孔半球体の慣性力係数（平均値）より若干小さくなった。

e) x 方向の抗力係数 C_{Dx} はK.C. 数の増加に伴って減少するとともに、無孔半球体の抗力係数（実験回帰式）と良い一致を示した。

(3) 有孔半球体に作用する流体力特性

抗力係数 C_{Df} については、孔径の違いによる差は認められない。さらに、本研究で対象とした Re 数の範囲に限定すれば、有孔および無孔にかかわらず C_{Df} は一定値となった。

(2) および (3) より、魚礁の構造設計並びに安定計算上で必要となる有孔半球体に作用する x 方向の波力並びに流体力については、無孔半球体の波力係数並びに流体力係数を用いて算定しても工学上ほとんど問題がないものと判断される。

《参考文献》

- 1) 西平福宏・多田彰秀・湊 康裕・水野 晋・野田英明・松原雄平：半球型底設魚礁の流体力特性に関する実験的研究，土木学会，海洋開発論文集，Vol. 7，pp.37~42，1991.
- 2) 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.
- 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，pp. 52~54，1989.
- 4) Jenkins.S.A. and D.L.Inman：Forces on a sphere under linear progressive w-aves. Proc. 15th Int. Conf. on Coastal Eng.，pp.2413~2428，1976.
- 5) Schlichting, H.：Boundary Layer Theory, 7th Edition, McGraw-Hill, p.17, 1979.

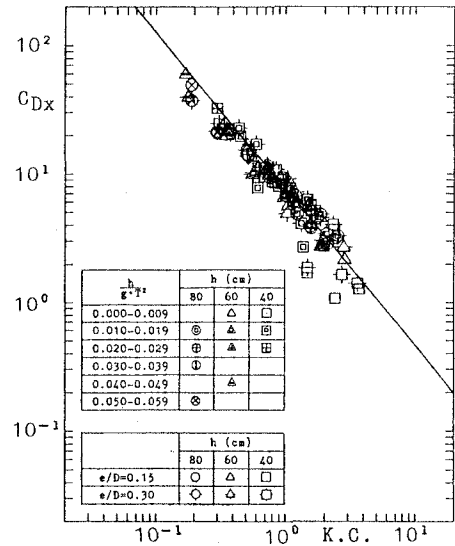


図-15 C_{Dx} と K.C. 数の関係

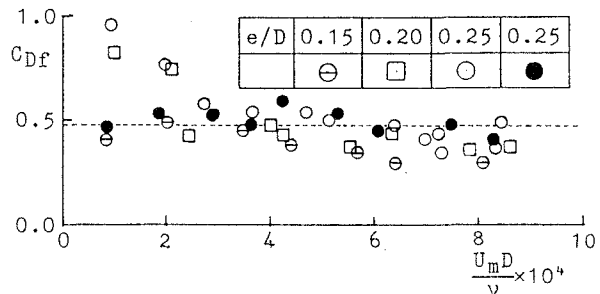


図-16 C_D と Re 数の関係