

半球型群体魚礁に作用する波力の相互干渉について

Experimental Study on Influence of Interaction among Three Submerged Hemispheric Structure for an Artificial Reef

西田 秀紀*
Hidenori Nishida

多田 彰秀**
Akihide Tada

水野 晋***
Susumu Mizuno

西平 福宏****
Fukuhiro Nishihira

要 約

著者らは、面構造で3次元性に優れ、網がかりも少ない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きた。本研究では3個の無孔の半球型底設魚礁を縦列に配置させた群体礁モデルを用いて、最大波力、慣性力係数および抗力係数への魚礁相互の干渉効果について検討する。さらに、流れ場での群体礁モデルに作用する流体力についても同様の検討を行うとともに、群体礁モデル近傍の流況を把握するため簡単な可視化実験も行った。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 実験概要
- §3. 波浪場および流れ場に設置された単体礁モデル
- §4. 波浪場に設置された群体礁モデル
- §5. 流れ場に設置された群体礁モデル
- §6. まとめ

§1. はじめに

著者らは面構造で3次元性に優れ、網がかりの少ない無孔の半球型底設魚礁（以降、無孔半球体と呼ぶ）を提案するとともに、これに作用する波力の基本的特性について報告してきた¹⁾。一方、実海域に設置されている魚礁のほとんどが群体礁であることを考慮すれば、半球型底設魚礁についても群体礁として設置する時の波力特性や周辺部流況などを把握する必要がある。このような観点

から、本研究では単体礁モデル3個を用いて、波力および一様流中の流体力における魚礁相互間の干渉効果について、単体礁モデルとの比較より検討を行っている。まず、1個の無孔半球体に作用する波力を測定し、モリソン式中の慣性力係数および抗力係数の特性を明らかにした。ついで、波および流れの進行方向に対して無孔半球体3個を縦列に配置した群体礁モデルを用いて、波進行方向、水路横断方向および鉛直方向の最大波力への魚礁相互の干渉効果の影響について検討する。さらに、流れ場でも流体力の測定を行い、同様な干渉効果についても論じる。最後に、群体礁モデルを対象とした可視化実験を行い、魚礁の渦集に関連する群体礁近傍の流れについても考察する。

§2. 実験概要

2-1 実験方法

水理実験は、西松建設株式会社技術研究所の長さ65m、幅1.0m、高さ1.6mの循環流発生装置付き2次元造波水槽を用いて実施した。

単体礁モデルとしては、プラスチック製の無孔半球体

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

模型を用いた。一方、群体礁モデルとしては枅見²⁾に倣い、単体礁モデル3個を等間隔に縦列配置したものを採用した。波浪場での x , y および z 軸は、Fig. 1 に示すようにそれぞれ波の進行方向、水槽横断方向および鉛直方向と定義している。なお、流れ場についても同様な座標系を用いた。

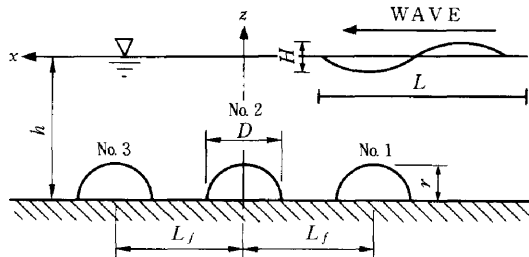


Fig.1 座標系(波浪場)

(1) 波力および流体力の測定

波力および流体力の測定は、水圧補償型3分力検出器の受感部に単体礁モデルを取り付けて、3方向の波力および流体力を同時計測した。群体礁モデルの実験では、沖側半球体(Fig. 1中のNo.1)および中央半球体(Fig. 1中のNo.2)に作用する波力並びに流体力を上述の検出器2台によって同時に計測した。また、波浪場での水位変動は、沖側および中央半球体の真上で電気容量式波高計によって測定された。なお、データはサンプリング周波数100 Hzで30 s間計測し、3 Hz以上の高周波成分を除去するローパスフィルターを施した後、デジタルレコーダに収録された。

(2) 流れ場での流速測定

流れ場における代表流速 U は、沖側半球体の頂点から沖側40 cmの地点において、2成分電磁流速計によって10 s間計測した結果の平均値を採用した。

(3) 流れ場での可視化実験

トレーサーとして比重1.03、球径約1 mmのポリスチレン球粒子を用い、4ワットのアルゴンイオンレーザーを水槽外部より半球体中心軸上および水槽底面上に照射して目視観察を行った。さらに、可視化の状況を水槽側面より一眼レフカメラによって撮影した。

2-2 実験条件

本実験では球径=15 cmの無孔半球体を用いた。さらに、魚礁設置間隔比 L_f/D を5種類(1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0)に変化させ、魚礁相互間の干渉効果について調べた。

(1) 波浪場における実験条件

波浪場での実験は、単体礁モデルおよび群体礁モデル

ともに位置制御方式によって発生させた規則波を用いて実施された。

①単体礁モデル

単体礁モデルを対象とした波浪場での実験条件は、静水深 h を3種類(80 cm, 60 cm, 40 cm)、入射波の周期を5種類($T=1.2, 1.6, 2.0, 2.4, 2.8$ s)、波高を3種類($H=3.0, 6.0, 9.0$ cmあるいは $H=6.0, 9.0, 12.0$ cm)に変化させた。

②群体礁モデル

群体礁モデルの実験条件は、静水深を一定($h=40$ cm)とし、入射波の周期を4種類($T=1.2, 1.6, 2.0, 2.4$ s)、波高を3種類($H=3.0, 6.0, 9.0$ cm)に変化させた。

(2) 流れ場における実験条件

流れ場では、水深を一定(40 cm)とし、断面平均流速を10 cm/s~50 cm/sの間から5種類選んで実験を行った。

2-3 解析方法

(1) 水粒子速度の算定

まず、沖側半球体の真上に設置されている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分割し、統計解析を行ってそこでの平均波高 H_a および平均周期 T_a を求めた。中央半球体の頂点における水粒子の速度および加速度については、 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(以降、添え字 m で表す)は、それぞれの時間的変化を示す波形より求まる最大振幅値で定義した。

(2) 慣性力係数 C_M および抗力係数 C_D の算定

無孔半球体に作用する波進行方向波力 F_x の時間的な変化は、すべて単峰型波形となることが実験結果より明らかとなった。このため、 x 方向波力の算定に際しては、モリソン式を適用することにした。

x 方向の慣性力係数 C_M および抗力係数 C_D については、時間的に変化しないものと仮定し、水谷³⁾に倣って最小自乗法より算定した。

(3) 波浪場における揚力係数 C_L の算定

鉛直方向(z 方向)の波力 F_z については、次に示すような揚力の算定式⁴⁾を採用した。なお、次式では構造設計並びに安定計算上で重要となる鉛直方向の最大波力 F_{zm} が算定される。

$$F_{zm} = \frac{1}{2} C_L \rho A_z u_m^2 \quad (1)$$

ここに、 C_L ; z 方向の揚力係数、 A_z ; 流れ方向に射影した物体の面積($=\pi D^2/8$)、 u_m ; 無孔半球体頂点での水粒子速度の最大振幅値である。

(4) 波力および流体力の干渉効果に関する評価

本研究では、群体礁に作用する波力への魚礁相互間の干渉効果の影響を明らかにするために、中央半球体に作用する最大波力に注目し、そこで計測される波力の最大値を F_{me} と定義する。一方、単体礁モデルの実験より得られた波力係数を用いて計算された最大波力を F_{mc} とする。ここでは、これらの比 F_{me}/F_{mc} と魚礁設置間隔比 L_r/D との関係から干渉効果の評価を行っている。また、流れ場での流体力に関する干渉効果についても同様な評価方法を採用している。

§ 3. 波浪場および流れ場に設置された単体礁モデル

3-1 慣性力係数 C_M および抗力係数 C_D

Fig. 2 は、1 個の無孔半球体に作用する波力より算定された波進行方向 (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。 C_M は、 $K.C.$ 数および h/gT^2 の増大とともに大きくなる傾向は認められるものの、ほぼ一定となっている。その平均値 ($C_M = 1.42$) は、ポテンシャル理論より求められた球の慣性力係数 1.5 とほぼ一致している。

Fig. 3 は、 x 方向の抗力係数 C_D と $K.C.$ 数との関係を示している。Jenkins ら⁵⁾の実験結果と同様に C_D は、 $K.C.$ 数の増加に伴って減少していることが確認される。

両図に示される C_M および C_D の平均値を単純線形回帰モデルを適用し最小自乗法によって求めると次式のようになる。

$$C_M = 1.42 \quad (2)$$

$$C_D = 7.38 \times \left(\frac{u_m T}{D}\right)^{-1.19} \quad (3)$$

3-2 波浪場における揚力係数 C_L

Fig. 4 は、式(1)で定義された鉛直方向の揚力係数 C_L を $K.C.$ 数で整理したものである。 $K.C.$ 数の増加とともに、 C_L の値は -1 乗で減少していることがわかる。この結果は、中村ら⁶⁾が正弦振動流中に置かれた球に作用する流体力を測定して得た結果と定性的にも、定量的にもよい一致を示しており、本研究における測定の妥当性が確認される。なお、単純線形回帰モデルを適用して C_L の実験式は次式のように求められる。

$$C_L = 3.22 \times \left(\frac{u_m T}{D}\right)^{-0.94} \quad (4)$$

3-3 流れ場における抗力係数 C_{Df}

流れ場に設置された単体礁モデルに作用する流体力は次のように表示できる。

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

ここに、 F_{xf} : 流れ方向の抗力、 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 ($= \pi D^2/8$)、 U : 無孔半球体頂点の平均流速、 D : 半球体の球径である。

実測値より逆算して C_{Df} を求め、 Re 数 (UD/ν) でまとめた結果を Fig. 5 に示している。ここで対象とした Re 数の範囲内では C_{Df} は一定であり、その値は 0.48 (図中の破線) となっている。なお、図中には $D=20\text{cm}$ の場合の結果もプロットされている。

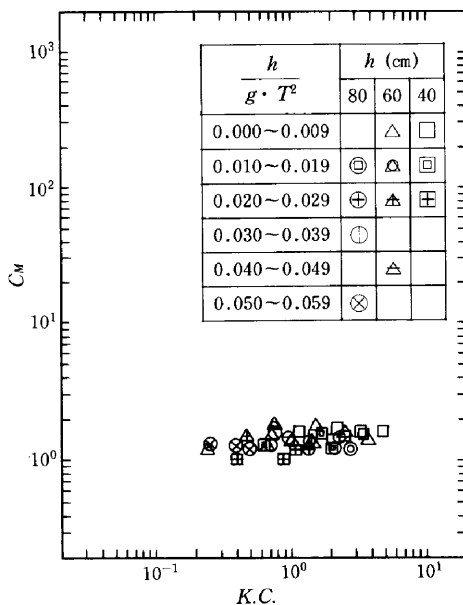


Fig.2 C_M と $K.C.$ 数の関係

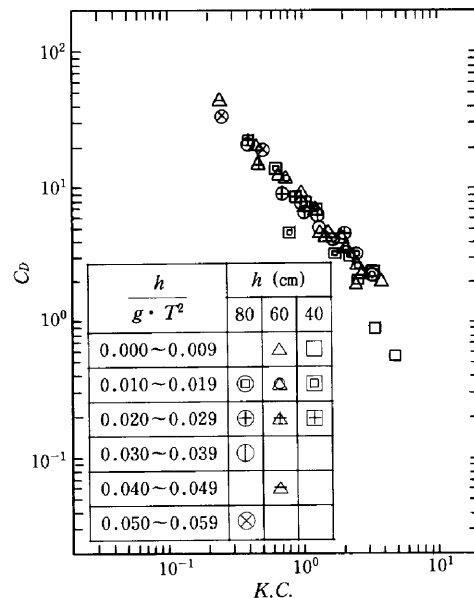
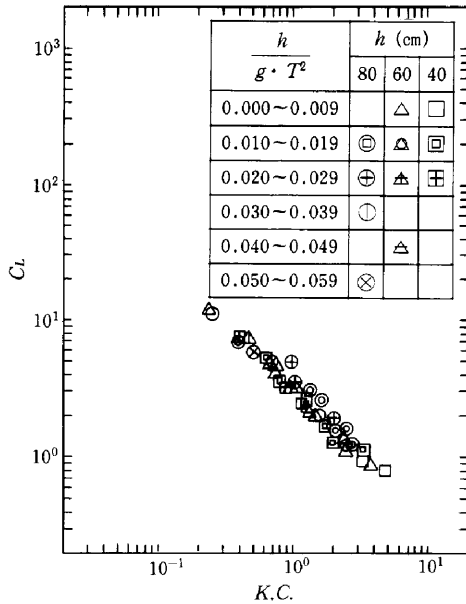
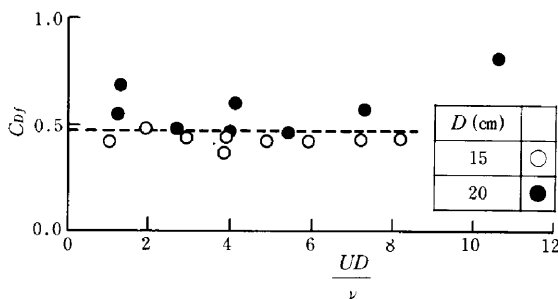


Fig.3 C_D と $K.C.$ 数の関係

Fig.4 C_L とK.C.数の関係Fig.5 C_{df} と Re 数の関係

§4. 波浪場に設置された群集礁モデル

4-1 x方向の最大波力に関する干渉効果

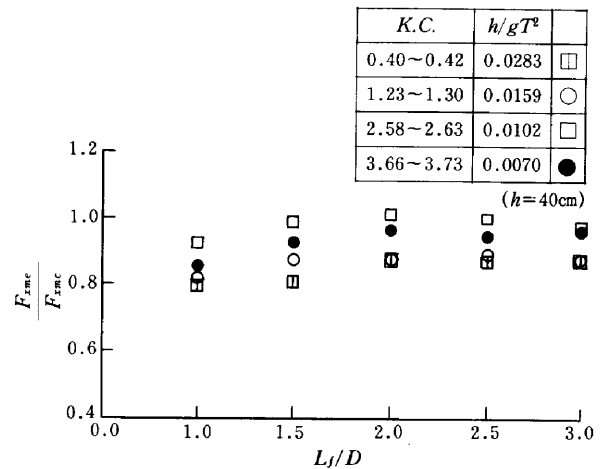
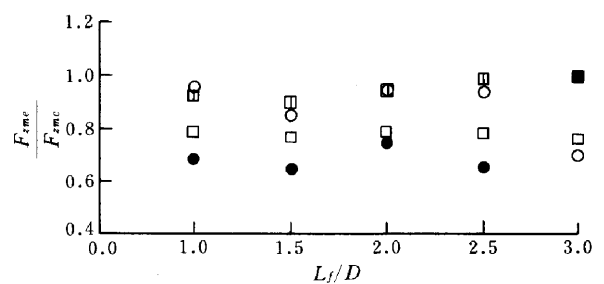
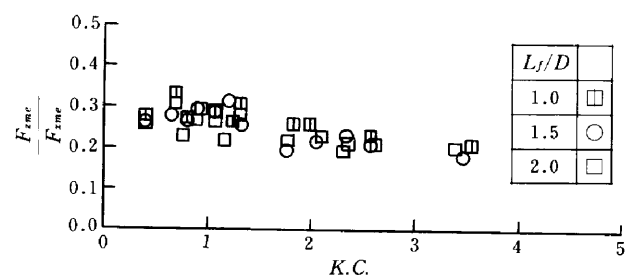
Fig.6は、縦列配置された群集礁モデルの中央半球体に作用するx方向の最大波力 F_{xme} と、式(2)および式(3)を用いて計算された同方向の最大波力 F_{xmc} との比 F_{xme}/F_{xmc} を L_f/D について示したものである。図より、大部分の F_{xme}/F_{xmc} は1より小さい値を示すとともに、 L_f/D の増加に伴って1の値に漸近することが確認される。したがって、これらは魚礁相互の干渉効果の影響を表しているものと考えられる。なお、沖側半球体および中央半球体上での水位変動を比較してみたが、ほぼ同じ値であり群集礁モデル上での波浪変形はほとんど無視できるものと判断される。

4-2 z方向の最大波力に関する干渉効果

Fig.7は、中央半球体に作用するz方向の最大波力 F_{zme} と式(4)を用いて計算される最大波力 F_{zmc} との比 F_{zme}/F_{zmc} を L_f/D について整理したものである。x方向の F_{xme}/F_{xmc} よりばらつきは大きいものの、ほとんど

が1以下の値となっており、z方向の最大波力においても魚礁相互の干渉効果が現れているものと考えられる。また、 h/gT^2 の減少に伴って F_{zme}/F_{zmc} の値が小さくなる傾向も認められる。これは、 h/gT^2 が小さく一様振動流に近くなるほど、鉛直方向の波力が低減していくためと考えられる。なお、図中のシンボルはFig.6中のものと同じ内容である。

Fig.8は、魚礁相互間の干渉が比較的大きいと考えられる $L_f/D=1.0, 1.5, 2.0$ を対象とし、実験より得られた中央半球体でのx方向の最大波力 F_{xme} に対するz方向の最大波力 F_{zme} の比をK.C.数でまとめたものである。 L_f/D およびK.C.数に関係なく、 F_{zme} は F_{xme} の0.35~0.20倍の値となっていることがわかる。したがって

Fig.6 F_{xme}/F_{xmc} と L_f/D の関係Fig.7 F_{zme}/F_{zmc} と L_f/D の関係Fig.8 F_{zme}/F_{xme} とK.C.数の関係

て、魚礁相互間の干渉効果を考慮に入れた波力の算定を行う場合には、まず x 方向に作用する波力を求めることが工学的には重要である。

4-3 慣性力係数 C_{MG} および抗力係数 C_{DG}

Fig. 9 および Fig. 10 は、それぞれ $L_f/D=1.0$, 1.5, 2.0 における慣性力係数 C_{MG} および抗力係数 C_{DG} を $K.C.$ 数について示したものである。図中の点線は単体礁モデルの C_M 並びに C_D の実験回帰式である。Fig. 9 より、 C_{MG} は C_M より小さい値を示すとともに、 L_f/D が小さくなるほどその平均値も 1.26, 1.19, 1.11 と減少している。これは上述した魚礁相互の干渉効果によるものと解釈される。

一方、Fig. 10 に示す抗力係数 C_{DG} は、 $K.C.$ 数の増加に伴って急激に減少している。さらに、 L_f/D の値に関係せず、 C_{DG} は単体礁モデルの C_D と同程度の値をとっており、魚礁相互の干渉効果は認められない。

これは、本実験が対象とした $K.C.$ 数が 4 以下の領域内で、慣性力が支配的であったためと考えられる。なお、図中のシンボルは Fig. 9 と同じ内容である。

4-4 水槽横断方向 (y 方向) 波力に関する干渉効果

Fig. 11 (a)~(c) は、群体礁モデルの中央半球体に作用する水槽横断方向 (y 方向) の波力 F_y 並びに中央半球体頂点上の水位変動の時間的変化の一例を示したものである。この時の魚礁設置間隔比は、 $L_f/D=1.5$ である。図から明らかなように、 y 方向波力には 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) は認められず、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) や 1 周期内に 3 組の極大値と極小値を持つ 3 峰型波形 (T_r 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た。一方、同じ波浪条件下の単体礁モデルの場合には S 型波形も出現するが、 T_r 型波形は認められない。

Fig. 12 (a)~(c) は、前図で示した実験ケースに対応する水位変動の振幅スペクトル $A_\eta(f)$ および y 方向波力の振幅スペクトル $A_{F_y}(f)$ をそれぞれ示したものである。Fig. 12 (a) においては入射波と同じ周波数成分 (基本周波数) が卓越しているものの、Fig. 12 (b)~(c) においては、基本周波数成分の 2 倍、3 倍あるいはそれ以上の周波数成分によって構成されていることが確認される。なお、本研究ではこれらが魚礁相互の干渉効果の影響によるものかどうかは明らかにできなかった。

Fig. 13 は、水槽横断方向の最大波力と波進行方向の最大波力との比 F_{yme}/F_{xme} を $K.C.$ 数で整理したものである。この図より y 方向の最大波力は x 方向の最大波力の 1 割以下と小さい値をとっており、工学的には無視す

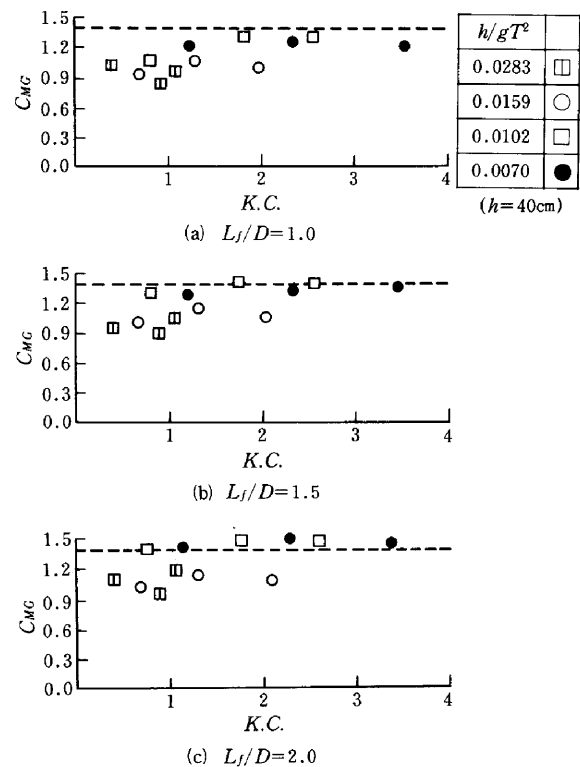


Fig.9 C_{MG} と $K.C.$ 数の関係

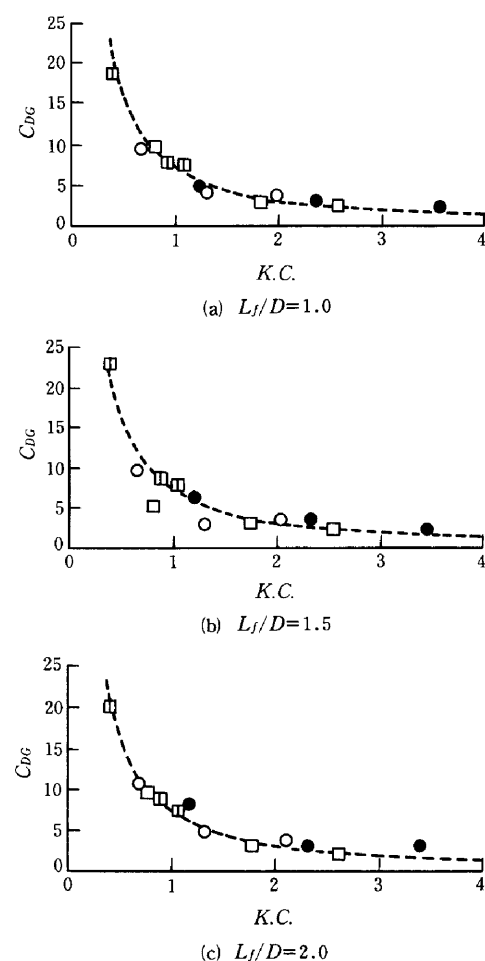


Fig.10 C_{DG} と $K.C.$ 数の関係

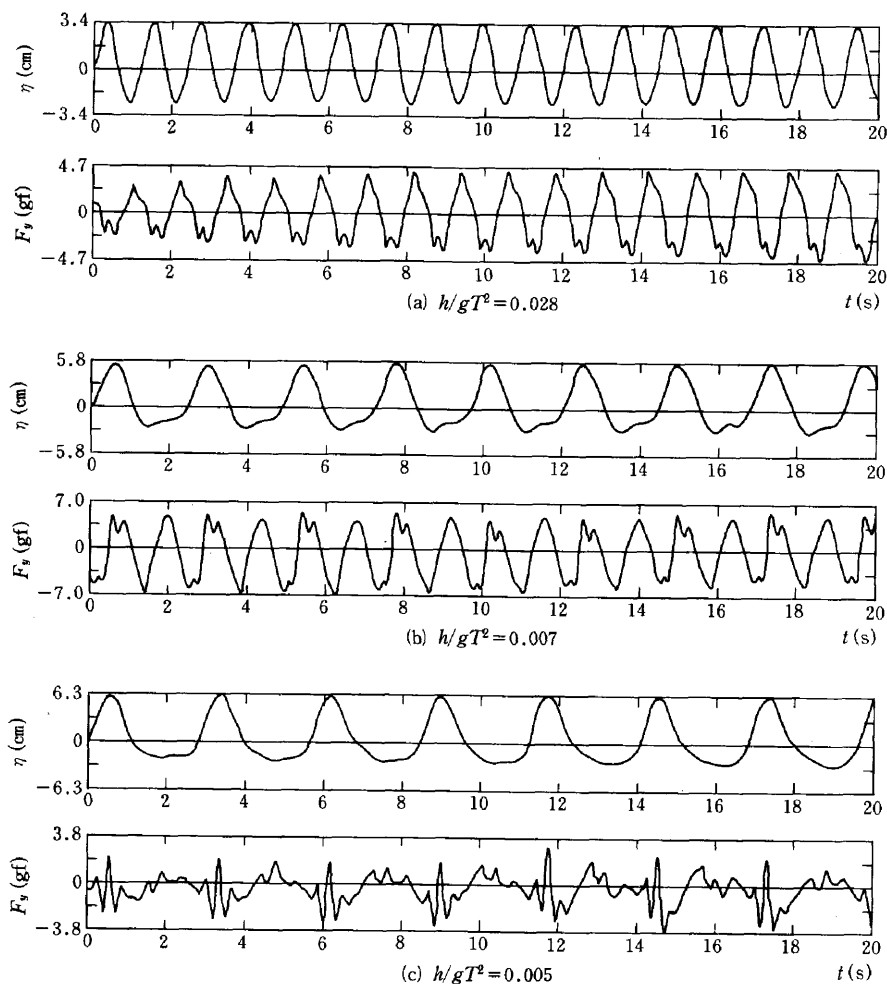


Fig.11 水位とy方向波力の時間的変化 ($h=40\text{cm}$, $D=15\text{cm}$, $L_f/D=1.5$)

ることが可能である。

§5. 流れ場に設置された群体礁モデル

5-1 抗力への魚礁相互の干渉

Fig. 14 は、実験結果から得られた沖側半球体および中央半球体に作用する流下方向の抗力 F_{xfe} と、 $C_{Df}=0.48$ 並びに式(5)を用いて計算される抗力 F_{xfc} との比を Re 数でまとめたものである。図中の●および○は、それぞれ $(F_{xfe}/F_{xfc})_1$ および $(F_{xfe}/F_{xfc})_2$ の値に対応している。なお、添え字1および2はそれぞれ沖側および中央半球体を示している。 $(F_{xfe}/F_{xfc})_1$ は、 L_f/D に関係なく1近傍の値を示している。すなわち、沖側半球体は、魚礁相互の干渉効果の影響は小さく、単体礁モデルの状態に近いものと判断される。

一方、 $(F_{xfe}/F_{xfc})_2$ の値は L_f/D の増加とともに大きくなるものの、すべて1以下となっている。このことは、中央半球体において魚礁相互の干渉効果が現れているも

のと判断される。さらに、 $(F_{xfe}/F_{xfc})_1$ と $(F_{xfe}/F_{xfc})_2$ の差は、設置間隔が大きくなり、群体礁モデルの各々が単体礁モデルに近づくほど小さくなっていく傾向にある。特に、両者の差が最も大きい魚礁設置間隔 $L_f/D=1.5$ では、魚礁相互の干渉効果が顕著に現れているものと予想される。高橋ら⁸⁾は、半球粗度の設置間隔と粗度近傍の流れの構造について実験的に検討し、粗度間隔 λ ($=L_f$) と粗度高さ κ ($=D/2$) の比が3程度で、下流側粗度の一部が遮蔽された流れとなることを指摘している。このことは、 $L_f/D=1.5$ で魚礁相互の干渉効果が卓越することの妥当性を証明するものである。

5-2 可視化による流れの観察

以上の結果より、抗力に関する魚礁相互の干渉効果は、魚礁設置間隔 $L_f/D=1.5$ 近傍で卓越するものと判断される。そこで、 $L_f/D=1.5$ の時の中央半球体近傍の流れを把握する目的で、可視化実験を行った。

Photo 1 は、断面平均流速が約15cm/sの場合の半球体中心軸上での半球体後流域を可視化して撮影（露出8

s) したものである。写真より、半球体背後でトレーサーが渦を形成している様子が認められる。特に、中央半球体と岸側半球体の間では、水槽底面より $0.5D$ 程度が遮蔽された流れとなっていることも確認される。

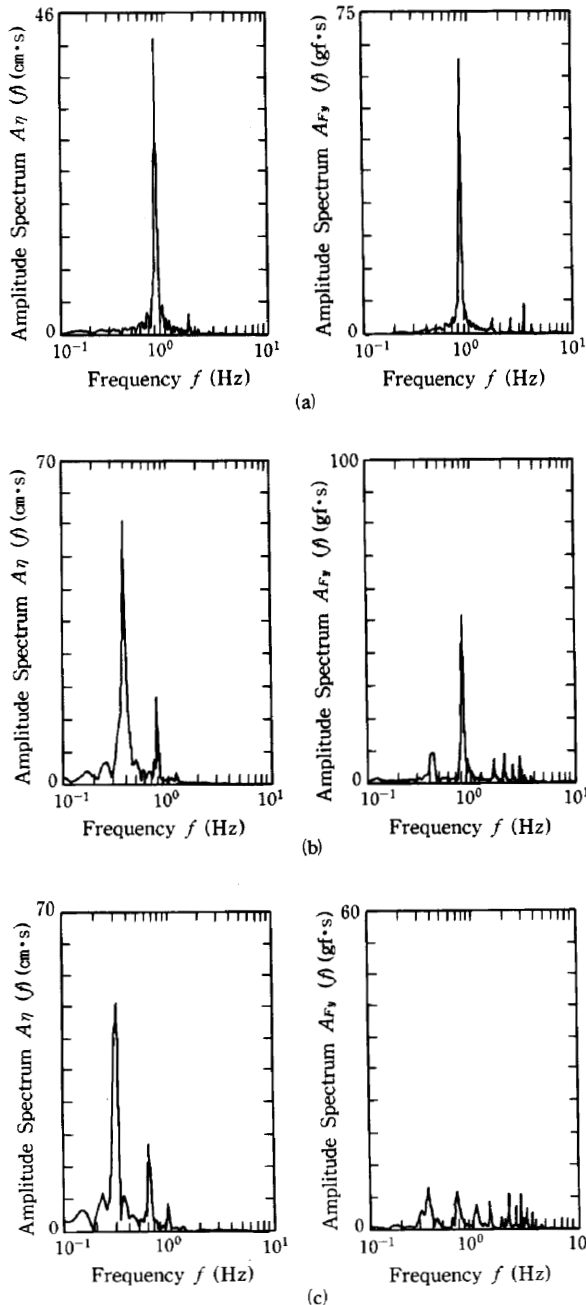


Fig.12 水位とy方向波力の振幅スペクトル

§6. まとめ

本研究では、単体礁モデルの波力係数の特性を明らかにするとともに、単体礁モデル3個を縦列に配置した群体礁モデルを対象として、最大波力および波力係数に及ぼす魚礁相互の干渉効果について検討した。得られた結果を要約すれば以下のとおりである。

(1) 縦列配置された群体礁モデルの中央半球体に作用する波進行方向および鉛直方向の最大波力には、魚礁相互の干渉効果が現れることが明らかとなった。

(2) 群体礁モデルの中央半球体に作用する波進行方向の波力より算出された慣性力係数 C_{MG} には、魚礁相互の干渉効果が顕著に現れた。一方、本実験で対象とした $K.C.$ 数が4以下の領域内では、慣性力が支配的であるため、抗力係数 C_{DG} には干渉効果はほとんど認められなかった。

(3) 魚礁相互の干渉効果が卓越した魚礁設置間隔 $L_f/D=1.5$ の群体礁モデル (特に中央半球体) 近傍では、魚類の娯集に関連するような興味深い流況が確認された。

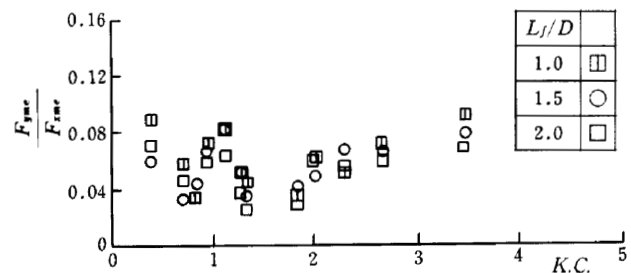


Fig.13 F_{yme}/F_{xme} と $K.C.$ 数との関係

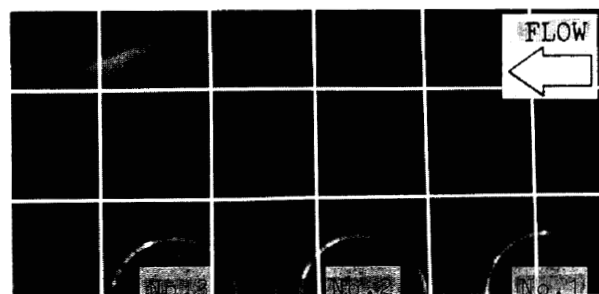


Photo 1 半球体後流域の可視化(側面)

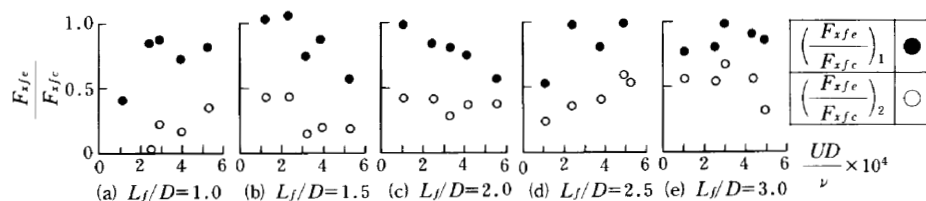


Fig.14 F_{xfe}/F_{xfc} と Re 数の関係

(4) 水槽横断方向の波力の時間的变化に関しては、単体礁モデルでは認められなかった T_r 型波形が観測された。

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，海洋開発論文集，土木学会，第7巻，pp. 37～42，1991.
- 2) 杢見吉晴：着底式魚礁の作用流体力に関する研究，海岸工学論文集，第38巻，pp.801～805，1991.
- 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) 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，土木学会，第5巻，pp.251～255，1989.
- 5) Jenkins, S.A. and D.L. Inman : Forces on a sphere under linear progressive waves, Proc. 15 th ICCE, pp.2413～2428, 1976.
- 6) 中村廣昭・池田俊介・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) 岩田好一朗・水谷法美・原 基久：没水球体に作用する揚力の特性に関する実験的研究，第36回海岸工学講演会，pp.719～723，1989.
- 8) 高橋迪夫・木村喜代治：礫床河川の流れの抵抗に及ぼす巨礫の影響に関する二，三の基礎的検討，水工学論文集，土木学会，pp.241～246，1992.