

半球型底設魚礁に作用する波力に関する実験的研究

——群体魚礁相互の干渉効果について——

西田 秀紀*・多田 彰秀*・水野 晋*・西平 福宏**

1. ま え が き

『とる漁業からつくり育てる漁業』を目指した資源管理型漁業への転換が積極的に推進される中、鋼製やコンクリート製の人工底設魚礁が数多く開発されてきた。これらは、様々な構造形式、形状、規模等にわたっているものの、全般的には直線部材の組み合わせによる矩形骨組み構造が基本となっている。このため、魚礁に廻集した魚類を捕獲する時の網がかりによる漁網切断事故が多発し、沿岸漁業における大きな問題となっている。

一方、著者らが提案する無孔の半球型底設魚礁（以後、無孔半球体と呼ぶ）は、面構造でかつ3次元性の高い構造物であって、網がかりが少ない魚礁の一つといわれている（西平ら，1991）。このような魚礁に作用する波力特性を明らかにし、構造設計および安定計算上必要なモリソン式中の慣性力係数および抗力係数を予め算定しておくことは実用上極めて重要である。さらに、無孔半球体を群体礁として設置するためには、波力に関する魚礁相互間の干渉効果を明らかにするとともに、最終的にはそのような効果が考慮された抗力係数および慣性力係数を明確に把握しておく必要がある。

本研究では、以上のようなことを踏まえ、まず無孔半球体の単体礁モデル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する。ついで、波および流れの進行方向に対して単体礁モデル3個を縦列に配置した群体礁モデルを用いて、波進行方向および鉛直方向の最大波力に関する魚礁相互の干渉効果について検討する。さらに、流れ場でも同様な流体力の測定を行い、流体力に関する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簡単な可視化実験を行い、魚礁の廻集に関連する群体礁近傍の流れについても考察する。

2. 実験方法

水理実験は西松建設株式会社技術研究所の長さ 65 m、

幅 1.0 m、高さ 1.6 m 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、プラスチック製の半球体模型を用いた。さらに、本研究では杢見（1991）に倣い、単体礁モデル3個を等間隔に縦列配置し、群体礁の実験を行った。波浪場での x 、 y および z 軸は、図-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。

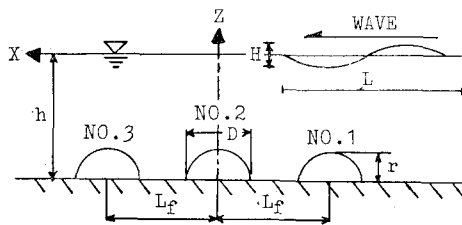


図-1 座標系（波浪場）

（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。群体礁モデルの場合、沖側半球体（図-1中のNo. 1）および中央半球体（図-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。さらに、波浪場での水位変動については、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した。これらは、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数値フィルターを施した後、デジタルレコーダに収録した。

（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

* 正会員 工修 西松建設株式会社 技術研究所

** 正会員 工博 西松建設株式会社 技術研究所

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。

3. 実験条件

本実験では球径 $D=15\text{ cm}$ 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、波力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、単体礁および群体礁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。

a) 単体礁

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 ($T=1.2, 1.6, 2.0, 2.4, 2.8\text{ s}$), 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。

b) 群体礁

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

(2) 流れ場における実験条件

流れ場では、水深一定 (40 cm) とし、断面平均流速を $10\text{ cm/s} \sim 50\text{ cm/s}$ の間から5種類選定し実験を行った。

4. 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める最大振幅で定義した。

(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 の時間的な変化では、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。したがって、本研究では x 方向波力の算定に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 が時間的に変化しないものと仮定し、最小自乗法を用いて C_M および C_D を求めている (水谷, 1989)。

(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を採用する (西平ら, 1989)。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。

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

ここに、 C_L : z 方向の揚力係数、 A_z : 流れと直角方向に射影した物体の面積 ($=\pi D^2/8$), 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の干渉効果を把握するために、中央半球体に作用する最大波力に注目し、群体礁で計測される実験値を F_{me} と定義する。一方単体礁モデルの水理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} としている。さらに、これらの比 F_{me}/F_{mc} と魚礁設置間隔比 L_f/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適用している。

5. 実験結果

(1) 単体礁

a) 慣性力係数 C_M および抗力係数 C_D

図-2 は、単体礁の無孔半球体における波進行方向 (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。さらに、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 とほぼ一致しており測定の妥当性を示しているものと考えられる。

図-3 は、単体礁における x 方向の抗力係数 C_D と K. C. 数との関係である。Jenkins ら (1976) 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。

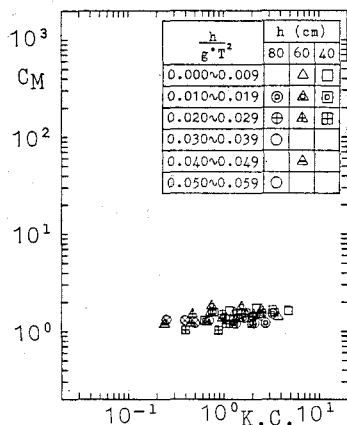
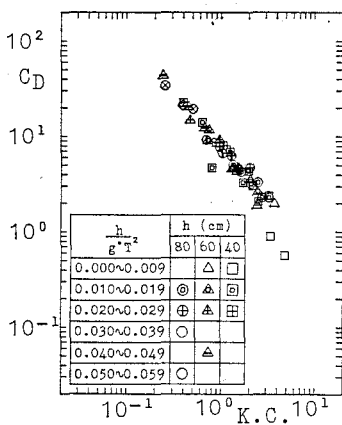
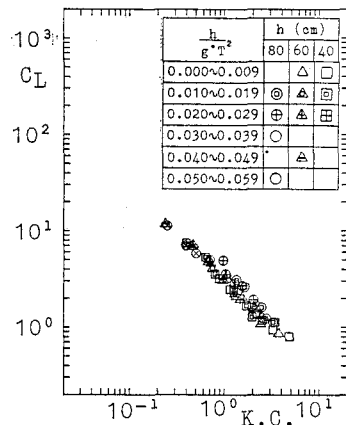
これらの図に示される C_M および C_D の平均値を単純線形回帰モデルを適用して最小自乗法によって求めると次式のようなになる。

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

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

b) 波浪場における揚力係数 C_L

図-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認められる。中村ら (1983) 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再確認される。なお、単純線形回帰モデルを適用

図-2 C_M と K.C. 数の関係図-3 C_D と K.C. 数の関係図-4 C_L と K.C. 数の関係

して C_L の平均値を求めると、次式のようになる。

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

c) 流れ場における抗力係数 C_{Df}

流れ場に設置された無孔半球体に作用する流体力 (抗力) は次のように表示できる。

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

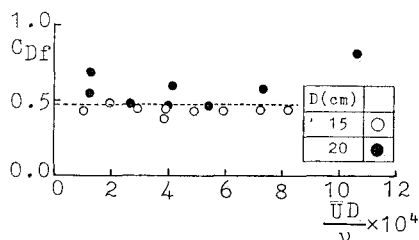
ここに、 F_{xf} : 流れ方向の抗力、 C_{Df} : 流れ場の抗力係数、 A_x : 流れ方向に射影した物体の面積 ($=\pi D^2/8$)、 U : 無孔半球体頂点の平均流速、 D : 半球体の球径である。

実測値より逆算して C_{Df} を求め、 Re 数 (UD/ν) でまとめた結果を図-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 $D=20$ cm の場合の結果もプロットされている。

(2) 波浪場に設置された群体礁

a) x 方向の最大波力に関する干渉効果

図-6 は、縦列配置された群体礁の実験結果から得られた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

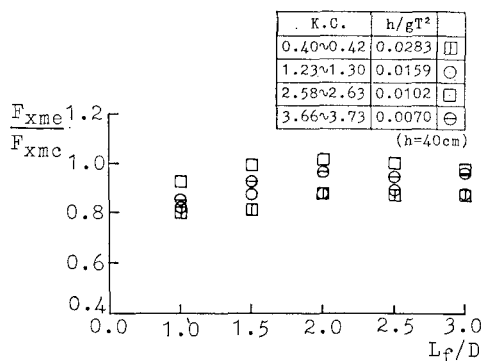
図-5 C_{Df} と Re 数の関係

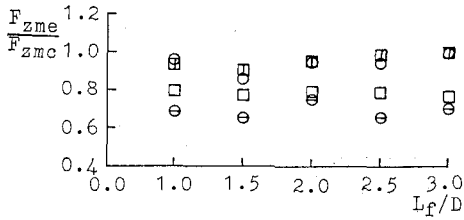
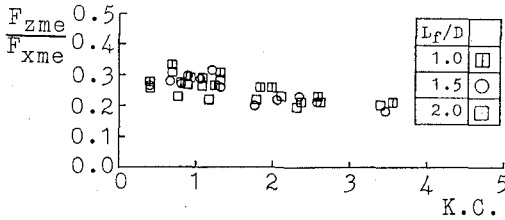
さい値を示すとともに、 L_f/D の増加に伴って 1 の値に漸近することが確認される。これらは、魚礁相互の干渉効果の影響を表している。

b) z 方向の最大波力に関する干渉効果

図-7 は、群体礁の実験結果から得られた中央半球体に作用する z 方向の最大波力 F_{zme} と、式 (4) より求められる C_L 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 についてまとめたものである。なお、図中のシンボルは図-6と同じ内容である。 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。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するためと考えられる。

図-8 は、魚礁相互間の干渉が比較的大きいと考えられる $L_f/D=1.0, 1.5, 2.0$ に注目し、実験より得られた 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

図-6 F_{xme}/F_{xmc} と L_f/D の関係


 図-7 F_{zme}/F_{zmc} と L_f/D の関係

 図-8 F_{zme}/F_{zme} と K.C. 数の関係

倍の値となっていることがわかる。したがって、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重要である。

c) 慣性力係数 CMG および抗力係数 CDG

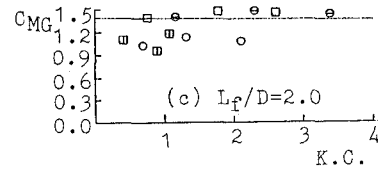
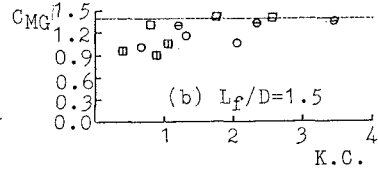
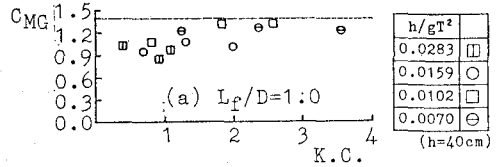
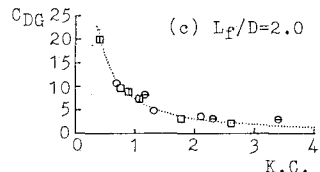
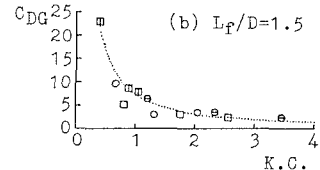
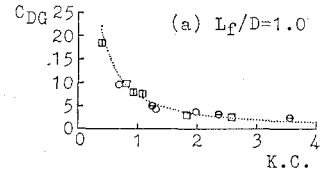
図-9 および 図-10 は、それぞれ $L_f/D=1.0, 1.5, 2.0$ における慣性力係数 CMG および抗力係数 CDG の K.C. 数について示したものである。図中の点線は単体礁モデルの CM 並びに CD の実験回帰式である。図-9 より、 CMG は CM より小さい値を示すとともに、 L_f/D が小さくなるほどその平均値も 1.26, 1.19, 1.11 と減少している。これは上述した魚礁相互の干渉効果によるものと解釈される。

一方、図-10 に示す抗力係数 CDG 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、 CDG は単体礁モデルの CD 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領域 (K.C. 数が4以下の領域) 内の波力においては、慣性力が支配的であったためと考えられる。なお、図中のシンボルは図-9 と同じ内容である。

(3) 流れ場に設置された群体礁

a) 縦列配置

図-11 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、 $CD_f=0.48$ 並びに式 (5) を用いて計算される抗力 F_{xfe} 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 $(F_{xfe}/F_{xfe})_1$ および $(F_{xfe}/F_{xfe})_2$ 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。 $(F_{xfe}/F_{xfe})_1$ は、 L_f/D


 図-9 CMG と K.C. 数の関係

 図-10 CDG と K.C. 数の関係

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が顕著に現れないものと判断される。

一方、 $(F_{xfe}/F_{xfe})_2$ 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、 $(F_{xfe}/F_{xfe})_1$ と $(F_{xfe}/F_{xfe})_2$ の差は、設置間隔が大きくなり、群体礁の各々が

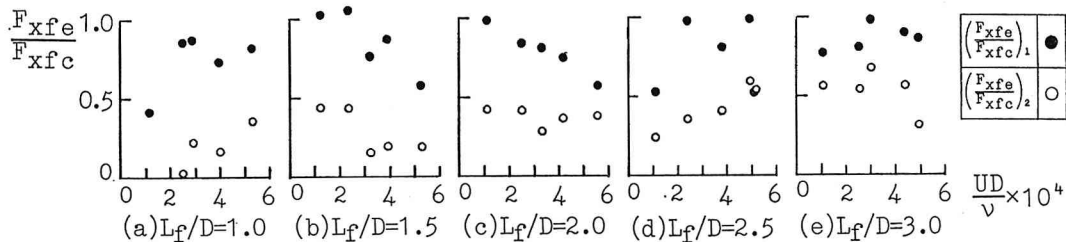
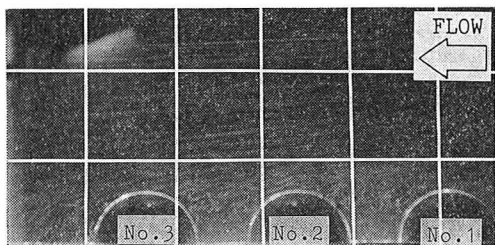
図-11 F_{xfe}/F_{xfc} と Re 数の関係

写真-1 半球体後流域の可視化 (側面)

単体礁に近づいていくほど小さくなっている。特に、両者の差が最も大きい $L_f/D=1.5$ 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 (1992) 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 $\lambda(=L_f)$ と粗度高さ $\kappa(=D/2)$ 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十分に証明するものである。

b) 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、 $L_f/D=1.5$ 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。

写真-1 は、断面平均流速が約 15 cm/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 $0.50D$ 程度が遮蔽された流れとなっていることも確認される。

6. あとがき

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個の縦列に配置した群体礁を対象として、最大波力および抗力に関する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ると以下のとおりである。

(1) 縦列配置された群体礁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ったため、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 $L_f/D=1.5$ の群体礁近傍では、魚類の網集に関連するような興味深い流況も確認された。

参考文献

- 高橋迪夫・木村喜代治 (1992): 礫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.
- 中村廣昭・池田俊介・大八木 崇 (1983): 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.
- 西平福宏・松原雄平・野田英明 (1989): 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.
- 西平福宏・多田彰秀・湊 康裕・水野 晋・野田英明・松原雄平 (1991): 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.
- 水谷法美 (1989): 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.
- 柏見吉晴 (1991): 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.
- Jenkins, S. A. and D. L. Inman (1976): Forces on a sphere under linear progressive w-waves, Proc. 15th ICCE, pp. 2413-2428.