

半球型底設魚礁に作用する流体力に関する実験的研究

——波動場、流れ場および共存場に適用可能な波力係数に関する経験式——

西田秀紀*・多田彰秀*・西平福宏**・野田英明***

1. ま え が き

著者らは面構造で3次元性に優れた半球型底設魚礁(以降、無孔半球体と略記)を提案し、これまでに流れ場、波動場および波と流れの共存場に設置された単体礁の無孔半球体に作用する流体力の特性について明らかにし、それぞれの場を対象に流体力係数の実験式を提案してきた。特に、波動場においては波力係数とKeulegan-Carpenter数の関係を明らかにした(西田ら, 1992)。一方、流れを考慮したモリソン式を用いて共存場における流体力を評価する場合には、 $a\sigma/|U|$ ($a=H/T$, $\sigma=2\pi/T$, H :波高, T :周期, $|U|$:流れの大きさ)によって整理された抗力係数および慣性力係数の実験回帰式が有効であることも確認された(西田ら, 1992)。さらに、波動場において無孔半球体を3個縦列に配置した群体礁の魚礁相互の干渉効果に起因する波力の特性についても考察を加えた。

今後、実海域での実証実験を念頭においた構造設計および安定計算を行う上では、流れ場、波動場および共存場でそれぞれ得られた研究成果を一つの統一したパラメータで再整理し、波力係数に関する“経験式”を提案しておくことは実用的な観点から重要である。さらに、魚礁の設置水深や群体礁における魚礁相互の干渉効果などの観点より、上述の経験式の適用限界を明らかにしておくことも必要である。

本研究では、上述した観点から、まず共通のパラメータを用いて波動場、流れ場および共存場にも適用可能な波力係数に関する経験式を提案するとともに、経験式の有効性についても検討する。ついで、魚礁の設置水深および魚礁相互の干渉効果が本研究で提案する経験式に及ぼす影響についても考察を加える。

2. 実験方法

水理実験は、西松建設株式会社技術研究所の循環流発生装置付き2次元造波水槽を用い、単体礁モデルおよび

群体礁モデルについて行った。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、この半球体模型3個を水槽底面に等間隔に縦列配置したものを群体礁モデルとした。波動場、流れ場および共存場での X 、 Y および Z 軸は、それぞれ波の進行方向、水槽横断方向および鉛直方向である。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半球体模型を取り付けて、3方向(X 、 Y 、 Z 方向)の波力および流体力を同時計測した。さらに、電気容量式波高計を用いて、模型直上での水位変動(η)を計測した。これらは、サンプリング周波数100 Hzで30秒間計測し、数値フィルターによって高周波成分を除去した後、デジタルレコーダーに収録した。また、流れの流速(U)については、半球体の頂点より沖側40 cmの地点において、2成分電磁流速計によって30秒間計測した結果の平均値を用いた。

3. 実験条件

本実験では、単体礁モデルおよび群体礁モデルを対象に実験を行った。

(1) 単体礁

単体礁モデルを対象とした実験は、波動場、流れ場および波と流れの共存場において行った。実験条件は、球径 D (=20 cm)を一定とし、水深を5種類($h=40, 50, 60, 70, 80$ 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)、断面平均流速を10種類($U_a=\pm 5, \pm 10, \pm 20, \pm 30, \pm 40$ cm/s, 正符号:順流, 負符号:逆流)変化させた。ここに、波の進行方向と流れのそれが一致する場合を順流および逆方向の場合を逆流と定義する。

(2) 群体礁

群体礁モデルを対象とした実験は、波動場のみで行った。実験条件は、球径 D (=15 cm)および水深 h (=40 cm)を一定とし、入射波の周期 T を4種類($T=1.2, 1.6, 2.0, 2.4$ s)、波高 H を3種類($H=3.0, 6.0, 9.0$ cm)変化させた。さらに、魚礁設置間隔 L_f を6種類($L_f=15, 22.5, 30, 37.5, 45, 52.5$ cm)変化させ、波力の干渉効果について調べた。

* 正会員 工修 西松建設(株) 技術研究所

** 正会員 工博 西松建設(株) 技術研究所

*** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科

4. 解析方法

(1) 共存場における波長および水粒子速度の算定

共存場における波長 L は、式(1)に示す分散関係式を用いて算定した。

$$c^2 = \left(\frac{L}{T} - U \right)^2 = \frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} \dots\dots\dots(1)$$

また、半球体頂点における水粒子速度および加速度は、無孔半球体直上の波高計より得られた水位変動のデータおよび式(1)より求める L を用いて微小振幅波理論より算定した。

(2) 流れを考慮したモリソン式 (修正モリソン式)

前報(西田ら, 1993)と同様に無孔半球体に作用する流体力 F については、波動場での水粒子速度 u と流れ場での流速 U をベクトル合成した修正モリソン式を用いて算定する。なお、以下の解析では、流れの流速は水深方向に一樣と仮定して計算を行った。

$$F = \frac{1}{2} \rho C_{DWF} A (u+U) |u+U| + \rho C_{MWF} V \frac{d(u+U)}{dt} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 ρ :水の密度、 u , du/dt :波の水粒子速度および加速度、 C_{DWF} :抗力係数、 C_{MWF} :慣性力係数、 U :流れの流速、 A :無孔半球体の流れ方向の射影面積、 V :無孔半球体の排水体積である。 C_{DWF} および C_{MWF} の算定については、Reid (1957)の方法に従った。

(3) 群体礁における干渉効果に関する評価

本研究では、群体礁の中央半球体に注目し、その抗力係数 C_{DC} および慣性力係数 C_{MC} を算定した。さらに、単体礁モデルの水理実験より得られた抗力係数 C_D および慣性力係数 C_M に対する C_{DC} および C_{MC} の比(= C_{DC}/C_D および C_{MC}/C_M)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た。

渉効果の評価を行った。

5. 実験結果

(1) 波動場における抗力係数 C_D 、慣性力係数 C_M

水深 $h=40$ cmに設置された単体礁の無孔半球体($D=20$ cm)を対象とし、波動場における抗力係数 C_D および慣性力係数 C_M とK.C.数(= $u_m T/D$, u_m は無孔半球体頂点における波の最大水粒子速度)との関係を実験結果より求めた。その結果、式(3)および式(4)が得られた。両式より、 C_D はK.C.数の増加にともなって減少し、 C_M はほぼ一定値となっていることが確認される。

$$C_D = 6.97 \times \left(\frac{u_m T}{D} \right)^{-0.89} \dots\dots\dots(3)$$

$$C_M = 1.35 \dots\dots\dots(4)$$

(2) 流れ場における抗力係数 C_{DF}

流れ場の抗力係数 C_{DF} は、実測値より逆算して求め、本実験の範囲内ではRe数に関係なくほぼ一定値(=0.48)となった(西平ら, 1989)。

(3) 共存場における抗力係数 C_{DWF} 、慣性力係数 C_{MWF}

式(2)に示す修正モリソン式中の抗力係数および慣性力係数について水深40 cmの実験結果を対象に検討した。

a) 順流

図-1は、 α をパラメータとして、順流の場合の抗力係数 C_{DWF} と K の関係を示したものである。なお、 K および α はそれぞれ $(u_m + |U|)T/D$ および $|U|/u_m$ である。前者は、共存場における円柱周辺の流況を記述するパラメータとして浅野(1986)によって提案されたものである。また、後者のパラメータが大きくなることは、 $|U|$ が水粒子速度 u に対して相対的に大きくなり、 $\alpha \rightarrow \infty$ では流れ場に漸近するものと解釈される。図中の実線は、それぞ

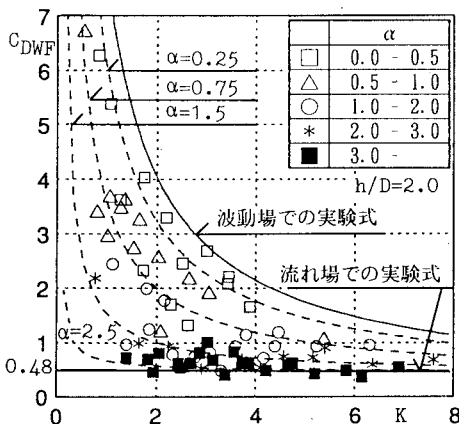


図-1 C_{DWF} と K の関係(順流)

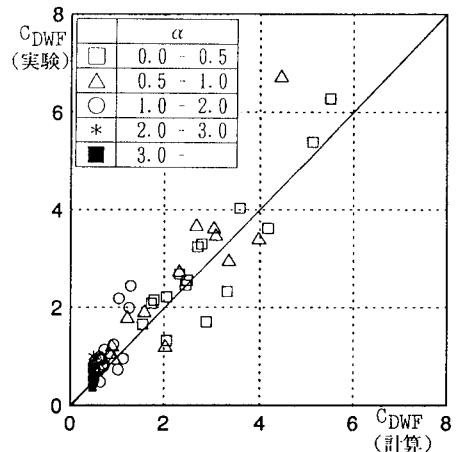


図-2 C_{DWF} (実験)と C_{DWF} (計算)の関係(順流)

れ波動場および流れ場で求められた実験式である。図より、 K および α の増大とともに C_{DWF} は減少し、流れ場の抗力係数に漸近する傾向が読み取れる。さらに、今回の実験値はすべて流れ場と波動場の実験式によって囲まれる領域内にプロットされていることも確認される。

これらの特性を考慮に入れ、 α 並びに K をパラメータとし、波動場、流れ場および共存場において適用可能な C_{DWF} に関する経験式を式(5)のように提案するとともに、最小自乗法を用いて、この経験式の各係数を決定した。ここで、式(5)は、 $\alpha=0$ の場合、式(3)にほぼ帰着し、さらに、 $\alpha \rightarrow \infty$ の場合、流れ場における抗力係数と一致する。なお、図-1の破線は、式(5)より求まる $\alpha=0.25 \sim 2.5$ に対応する経験式である。

$$C_{DWF} = 6.97 \cdot e^{-\beta} \cdot K^{-0.89} + 0.48(1 - e^{-\beta}) \quad \dots\dots (5)$$

ここに、 $\beta = 0.019\alpha^2 + 0.99\alpha - 0.07$

図-2は、 α をパラメータとして、式(5)を用いて算定される抗力係数 C_{DWF} (計算)と実験より算出した C_{DWF} (実験)との関係を示したものである。図より、ばらつきは認められるもののほぼ45度の線上に存在し、両者はほぼ一致することがわかる。

一方、図-3は、 α をパラメータとして、慣性力係数 C_{MWF} と K との関係を示したものである。図中には、式(4)も実線で併記されている。実験結果から得られた C_{MWF} は、 α を一定とみなした場合、 $C_M=1.35$ を境にして定量的な特性が異なっている。すなわち、 $C_{MWF} > 1.35$ の範囲では、 K の増大とともに C_{MWF} も増加し、 $C_{MWF} < 1.35$ では K の増加とともに減少傾向にある。また、 K を一定とした場合には、 α の値が増大するにつれて C_{MWF} は減少する傾向にあることも確認される。このような特性を考慮に入れて、 C_{MWF} に関する経験式を式(6)のように提案した。式(6)は、 $\alpha=1.18$ の場合、式(4)と一致す

る。なお、図-3には $\alpha=0.25 \sim 3.5$ に対応する式(6)が破線で示されており、実験値をよく再現している。

$$C_{MWF} = 1.35 \cdot \exp[0.084(1.18 - \alpha)K] \quad \dots\dots (6)$$

図-4は、式(6)を用いて算定される慣性力係数 C_{MWF} (計算)と C_{MWF} (実験)との相関関係を示したものである。この図より、 α が大きい場合には、 C_{MWF} (計算)と C_{MWF} (実験)との相関が悪くなる傾向が確認される。これは、 α が大きくなる(流れが支配的になる)につれて流体力を構成している慣性力成分が抗力成分よりも非常に小さくなるため、流体力係数を算定する際の解析法に起因した誤差と考えられる。

b) 逆流

図-5および図-6は、それぞれ逆流における抗力係数 C_{DWF} および慣性力係数 C_{MWF} と K との関係を示したものである。逆流の抗力係数は、順流の場合と同様な特性を有しているものと判断される。一方、慣性力係数は、

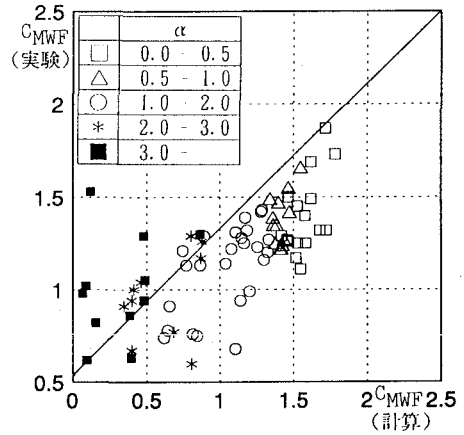


図-4 C_{MWF} (実験)と C_{MWF} (計算)の関係(順流)

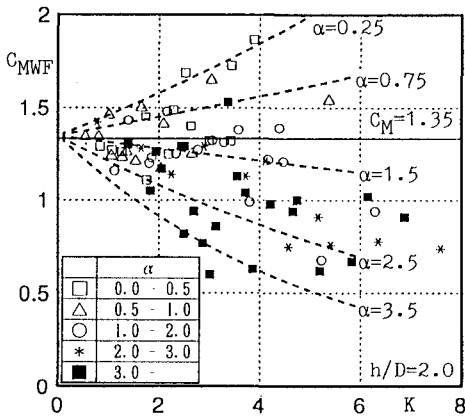


図-3 C_{MWF} と K の関係(順流)

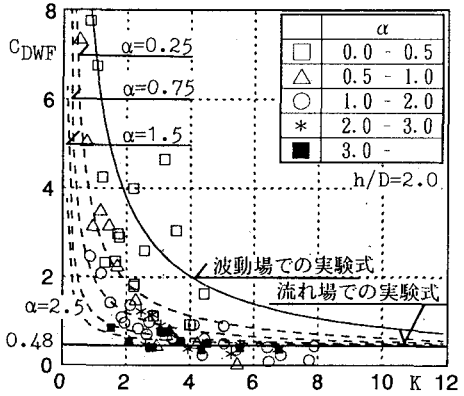


図-5 C_{DWF} と K の関係(逆流)

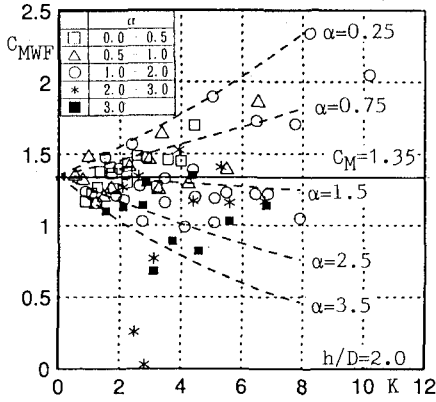


図-6 C_{MWF} と K の関係 (逆流)

$0.5 < C_{MWF} < 1.7$ の範囲内で定性的に順流の場合と同様な特性を有していることが読み取れる。しかし、 $C_{MWF} > 1.7$ においては、実験回帰式と実験値との間(特に、○と $\alpha=1.5$ の破線)に大きな相違が認められる。これは、測定された水面変動の波形に非線形性が現れており、 u を求める際の微小振幅波理論の適用に問題があるものと思われる。さらに、 $C_{MWF} < 0.5$ の実験値(図-5中の*)については、その原因は不明である。

式(7)、(8)に逆流の場合の C_{DWF} 、 C_{MWF} に関する経験式を示す。

$$C_{DWF} = 6.97 \cdot e^{-\beta} \cdot K^{-0.89} + 0.48(1 - e^{-\beta}) \quad \dots\dots (7)$$

ここに、 $\beta = -0.08\alpha^2 + 1.05\alpha + 0.1$

$$C_{MWF} = 1.35 \cdot \exp[0.063(1.34 - \alpha)K] \quad \dots\dots (8)$$

(4) 経験式の適用限界

a) 設置水深が経験式に及ぼす影響

上述の波力係数に関する経験式は、設置水深が 40 cm の場合を対象に誘導されたものである。実用上の観点から判断すれば、これらの経験式が h/D の値に関係なく適

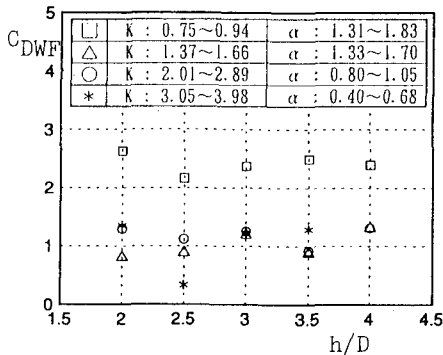


図-7 C_{DWF} と h/D の関係

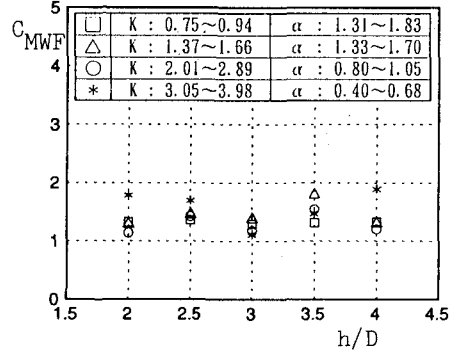


図-8 C_{MWF} と h/D の関係

用可能かどうか把握しておく必要がある。そこで、実験結果の中から K および α がほぼ同一のケースを選び出し、 h/D と C_{DWF} の関係をプロットしたものが図-7である。図より、多少のばらつきは認められるものの、 h/D の値に関係なく C_{DWF} はほぼ一定値を示している。すなわち、 h/D が C_{DWF} に及ぼす顕著な影響は認められない。さらに、図-8は、 h/D と C_{MWF} の関係を示したものである。 C_{DWF} と同様に、 C_{MWF} は h/D に関係なくほぼ一定値を示していることがわかる。以上より、本研究で提案された式(5)~式(8)は、 h/D の値に関係なく適用できるものと考えられる。

b) 魚礁の設置間隔が経験式に及ぼす影響

波動場、流れ場および共存場に存在する単体礁の無孔半球体については、統一のパラメータを用いて経験式を提案することができた。しかし、実海域に魚礁を投入する場合、単体で設置することはほとんどなく、多くの場合群体礁として設置されている。ここでは、前々報(西田ら、1992)と同様の方法で単体礁とみなせる魚礁の設置間隔について検討し、経験式の適用性について明らかにする。

図-9は、 L_f/D と C_{MG}/C_M の関係を示したものである。

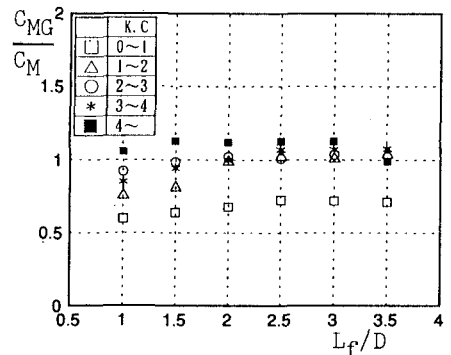


図-9 C_{MG}/C_M と L_f/D の関係

$L_f/D < 2$ では、 L_f/D の増加とともに C_{MC}/C_M の値は 1 に漸近している。一方、 $L_f/D \geq 2$ の領域では、 L_f/D に関係なく C_{MC}/C_M は一定値となっていることが確認される。すなわち、 $L_f/D < 2$ 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。従って、本研究で提案した経験式は $L_f/D \geq 2$ の場合にのみ有効であると考えられる。なお、本実験が対象とした実験条件内 (K.C. 数が 4 以下) においては、慣性力が支配的であるため、 C_{DC} には干渉効果の影響は認められなかった。

6. あとがき

本研究では、波動場、流れ場、波と流れの共存場において適用可能な波力係数に関する経験式を提案するとともに、その経験式の適用限界について検討した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) α を統一パラメータとした流れ場、波動場および共存場にも適用可能な抗力係数、慣性力係数に関する経験式を誘導することが可能となった。

(2) 上述の経験式は、 h/D の値に関係なく適用可能である。

(3) 本研究で提案した経験式は、設置間隔が $L_f/D \geq 2$ の群体礁にも適用可能である。

最後に、本研究を進めるにあたり、Delaware 大学 小林信久教授に終始適切なご指導を賜った。ここに記して、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 浅野敏之 (1986): 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, 77 p.
- 西平福宏・多田彰秀・湊 康裕・水野 晋・野田英明・松原雄平 (1989): 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.
- 西田秀紀・多田彰秀・水野 晋・西平福宏 (1992): 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—, 海岸工学論文集, 第 39 巻, 土木学会, pp. 746-750.
- 西田秀紀・多田彰秀・西平福宏・野田英明 (1993): 半球型底設魚礁に作用する流体力に関する実験的研究—波と流れの共存場について—, 海岸工学論文集, 第 40 巻, 土木学会, pp. 831-835.
- Reid, R. O. (1957): Correlation of water level variations with wave forces on a vertical pile for non-periodic waves, Proc. 6th Conf. Coastal Eng., pp. 749-786.