

# 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——

西田 秀紀\*・多田 彰秀\*・西平 福宏\*\*・野田 英明\*\*\*

## 1. ま え が き

近年、わが国は、水産資源の増大を図るため資源管理型漁業への転換を積極的に推進している。その一環として、昭和57年度より沿岸漁場整備開発事業が実施され、数多くの人工底設魚礁が各地に設置されてきた。

このような中で、著者らは面構造で3次元性の高い半球型底設魚礁を提案し、波動場および流れ場における波力および流体力の特性についてそれぞれ明らかにしてきた(西田ら, 1992)。今後、実海域での実証実験まで展開していくためには、波と流れの共存場における流体力の特性を明らかにし、そこでの流体力の算定方法を確立することが実用上重要である。

波と流れの共存場における流体力に関する研究は、従来より数多く実施されているものの、それらのほとんどが直立円柱を対象としたものである(例えば、堀川ら, 1976; 岩垣ら, 1982)。一方、底設魚礁に関する研究は上北ら(1985)によるものが唯一あり、進行波中を一定速度で曳航される角型魚礁に作用する流体力を測定したものである。

本研究では、以上のようなことを踏まえ、まず循環流発生装置付きの造波水槽を用いて波と流れの共存場をつくり、水槽底面に設置した半球型底設魚礁(以降、無孔半球体と略記する)に作用する流体力を測定する。ついで、波と流れの相乗効果に伴う流体力特性の変化を調べるとともに、流れを考慮したモリソン式中の抗力係数および慣性力係数の特性を明らかにする。最後に、上述のモリソン式を用いて算定される波進行方向の流体力の時系列波形と水理実験より得られた実測波形とを比較し、上述のモリソン式の妥当性について検証する。

## 2. 実験方法および実験条件

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て実施した。無孔半球体の模型は、直径20 cmのプラスチック製パイを2分割し

たものを用い、図-1のように水槽中央部に設置し、波の進行方向に対して流れの方向が一致する場合(順流)および逆方向の場合(逆流)について実験を行った。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と定義している。なお、ここでの共存場は、まず断面平均流速  $U_a$  を目安に流れ場をつくり、流れの定常性および一様性が認められるまで放置した後、波動成分を重ねることによって設定された。

共存場における流体力の測定は、水圧補償型3分力検出器の受感部に無孔半球体の模型を取り付けて、3方向の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( $\eta$ )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3 Hz以上の高周波数成分を除去した後、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30秒間計測した結果の平均値を用いた。なお、 $U$  は流れ場に波動成分が重ねられる前段階で測定されたものである。

実験条件は、水深  $h$  (=40 cm)、球径  $D$  (=20 cm) を一定とし、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)、断面平均流速を10種類( $U_a=\pm 5, \pm 10, \pm 20, \pm 30, \pm 40$  cm/s)変化させ、合計150ケースの実験を行った。

## 3. 解析方法

### (1) 共存場における波長の算定

一様な流れの中に波が侵入する場合、波の位相速度  $c$

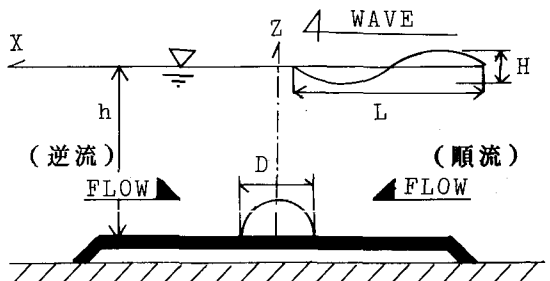


図-1 座標系

\* 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  
 \*\*\* 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科

と流れの速度  $U$  とがベクトルの的に加わることによって、静止座標系からみた波の位相速度は変化し、波長の伸縮が生じることは理論的に示されている (石原, 1972)。そこで、共存場での波長を  $L$  とすれば、静止座標系からみた位相速度  $L/T$  は  $c+U$  に等しく、式 (1) に示すような一様流れ (順流) の存在する場合の分散関係式が成立する。

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

なお、共存場における周期  $T$  は波動場の周期と同一である。

## (2) 水粒子速度の算定

無孔半球体の直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、統計解析を行いそこでの平均波高  $H_a$  および平均周期  $T_a$  を求めた。半球体頂点における水粒子の速度および加速度は、 $H_a$ ,  $T_a$ ,  $h$  および式 (1) から算出される  $L$  を用いて微小振幅波理論より求めた。また、水粒子速度および波力の最大値 (以降、添え字  $m$  で表す) は、それぞれの時系列波形より求まる最大振幅で定義した。なお、ここでは堀川ら (1977) の研究成果に従い、有限振幅波理論の導入は行わなかった。

## (3) 流れを考慮したモリソン式

本研究では、共存場における無孔半球体に作用する流体力  $F_{WF}$  を、波動場での水粒子速度  $u$  と流れ場での流速  $U$  とをベクトル和したモリソン式 (以降、修正モリソン式と略記する) 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様として計算した。

$$F_{WF} = F_D + F_M \\ = \frac{1}{2} \rho C_{DWF} A (u + U) |u + U| \\ + \rho C_{MWF} V \frac{d(u + U)}{dt} \quad (2)$$

ここに、 $\rho$ : 水の密度,  $u$ ,  $du/dt$ : 波の水粒子水平速度および加速度,  $C_{DWF}$ : 共存場中の抗力係数,  $C_{MWF}$ : 共存場中の慣性力係数,  $U$ : 流れの流速,  $F_{WF}$ : 全流体力,  $F_D$ : 抗力,  $F_M$ : 慣性力,  $D$ : 球径,  $A$ : 無孔半球体の流れ方向の射影面積 ( $=\pi D^2/8$ ),  $V$ : 無孔半球体の排水体積 ( $=\pi D^3/12$ ) である。

$C_{DWF}$  および  $C_{MWF}$  については、Reid (1975) の方法に従い、式 (2) を用いて求められる計算流体力と実測流体力とが最も一致するように最小 2 乗法を用いて算定した。

## 4. 実験結果

### (1) 波動場の抗力係数 $C_{DW}$ , 慣性力係数 $C_{MW}$

式 (3) および式 (4) は、 $D=20$  cm の無孔半球体に対

象とし、波動場における抗力係数  $C_{DW}$  および慣性力係数  $C_{MW}$  を求めたものである。

$$C_{DW} = 6.89 \times \left( \frac{u_m T}{D} \right)^{-1.07} \quad (3)$$

$$C_{MW} = 1.38 \quad (4)$$

$D=15$  cm の場合 (西田ら, 1992) と同様、 $C_{DW}$  は K.C. 数 ( $=u_m T/D$ ) の増加にともなって減少し、 $C_{MW}$  はほぼ一定値を示している。

### (2) 流れ場の抗力係数 $C_{DF}$

一様流中に設置された無孔半球体に作用する流体力  $F_F$  は、次のように表示できる (西平ら, 1989)。

$$F_F = \frac{1}{2} C_{DF} \rho A U^2 \quad (5)$$

ここに、 $F_F$ : 流れ方向の抗力,  $C_{DF}$ : 流れ場の抗力係数,  $U$ : 半球体頂点での平均流速である。

流れ場の抗力係数  $C_{DF}$  は、実測値と式 (5) から逆算され、本実験における条件の範囲内では  $R_e$  数 ( $=UD/\nu$ ) に依存することなくほぼ一定値 (0.48) となった。

### (3) 共存場における流体力特性

共存場の直立円柱に作用する流体力を抗力と慣性力の和と考えると、抗力項に波と流れの水粒子速度の相乗効果が現れるため、単純に波の力と流れの力を加えたものよりも大きな流体力が生じると堀川ら (1976) によって報告されている。

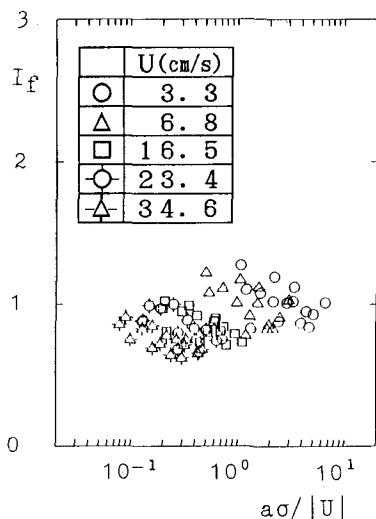
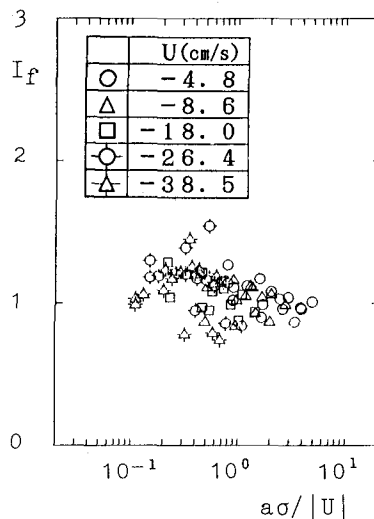
本研究では無孔半球体に作用する流体力にも同様な相乗効果が出現するかどうか確認するために、式 (6) に示すような無次元量  $I_f$  を定義して考察を加えた。

$$I_f = \frac{F_{mWFe}}{F_{mWC} + F_{mFc}} \quad (6)$$

ここに、 $F_{mWFe}$ : 共存場の水理実験より得られた波進行方向の最大流体力,  $F_{mWC}$ : 波動場の波力係数 (式 (3) および式 (4)) を用いて計算される最大波力,  $F_{mFc}$ : 流れ場で得られた抗力係数と式 (5) から算定される最大流体力である。

図-2 および図-3 は、それぞれ順流および逆流における  $I_f$  と  $a\sigma/|U|$  との関係を示したものである。なお、 $a\sigma/|U|$  は共存場での波の水粒子速度と流れの強さを表すパラメータであり、 $a=H/2$ ,  $\sigma=2\pi/T$  である。順流では  $a\sigma/|U|$  が大きくなる (流れの流速  $U$  が小さくなる) につれて  $I_f$  が 1 以上となるケースが増加し、波と流れの相乗効果に起因する流体力の増大が確認される。一方、逆流の場合には  $a\sigma/|U| \leq 1$  の領域で  $I_f > 1$  となるケースが多く認められる。

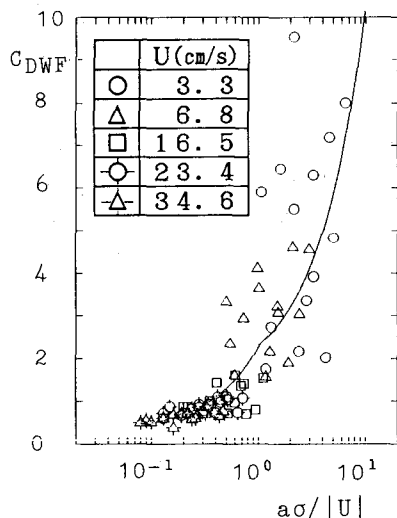
これらの結果に基づけば、共存場に設置された無孔半球体の流体力を見積る場合、単純に波と流れの力の線形和を共存場での流体力として代用することは、構造設計および安定計算上大きな問題となるものと考えられる。

図-2  $I_f$  と  $a\sigma/|U|$  の関係 (順流)図-3  $I_f$  と  $a\sigma/|U|$  の関係 (逆流)(4) 共存場の抗力係数  $C_{DWF}$ , 慣性力係数  $C_{MWF}$ 

上述の相乗効果が考慮された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検討した。

## a) 順流

順流の場合の抗力係数  $C_{DWF}$  と  $a\sigma/|U|$  との関係を示したものが図-4である。図より、 $C_{DWF}$  は  $a\sigma/|U|$  が小さく流れが支配的な領域で、流れ場での抗力係数 ( $C_{DF}=0.48$ ) に漸近している。また、 $a\sigma/|U| \geq 1$  の領域では増加傾向にあるものの、ばらつきが大きい。同様な結果は、堀川ら (1976) の鉛直円柱を用いた共存場の実験からも読み取ることができる。さらに、図中には  $a\sigma/|U|=1$  を境に式(7)に示すような2本の実験回帰式を実線で示している。

図-4  $C_{DWF}$  と  $a\sigma/|U|$  の関係 (順流)

$$C_{DWF} = 1.97 \times \left( \frac{a\sigma}{|U|} \right) + 0.29 \quad \left( \frac{a\sigma}{|U|} < 1 \right) \quad \dots (7)$$

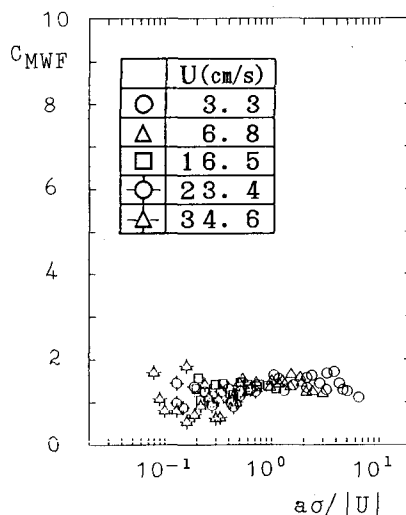
$$C_{DWF} = 0.88 \times \left( \frac{a\sigma}{|U|} \right) + 1.43 \quad \left( \frac{a\sigma}{|U|} \geq 1 \right)$$

一方、図-5は慣性力係数  $C_{MWF}$  と  $a\sigma/|U|$  との関係を示したものである。 $C_{MWF}$  の値は流れが支配的となる  $a\sigma/|U| < 1$  でばらつきが大きいものの、ほぼ一定値となっている。 $C_{MWF}$  の平均値は次式のようになった。

$$C_{MWF} = 1.18 \quad \left( \frac{a\sigma}{|U|} < 1 \right)$$

$$C_{MWF} = 1.43 \quad \left( \frac{a\sigma}{|U|} \geq 1 \right) \quad \dots (8)$$

## b) 逆流

図-5  $C_{MWF}$  と  $a\sigma/|U|$  の関係 (順流)

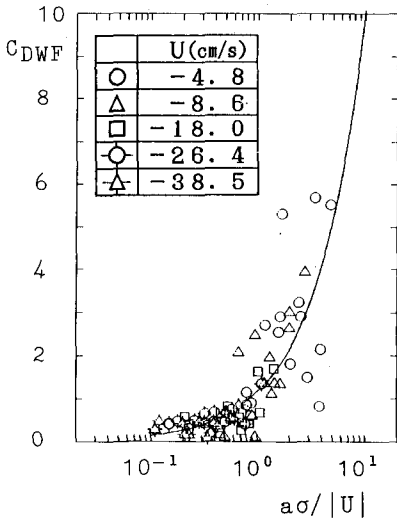


図-6  $C_{DWF}$  と  $a\sigma/|U|$  の関係 (逆流)

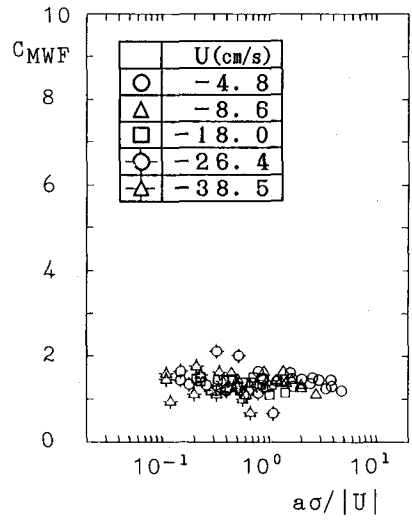


図-7  $C_{MWF}$  と  $a\sigma/|U|$  関係 (逆流)

図-6および図-7は、それぞれ逆流における抗力係数および慣性力係数を  $a\sigma/|U|$  で整理したものである。定性的に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。

$$\left. \begin{aligned} C_{DWF} &= 1.16 \times \left( \frac{a\sigma}{|U|} \right) + 0.02 \quad \left( \frac{a\sigma}{|U|} < 1 \right) \\ C_{DWF} &= 0.99 \times \left( \frac{a\sigma}{|U|} \right) + 0.18 \quad \left( \frac{a\sigma}{|U|} \geq 1 \right) \end{aligned} \right\} \dots (9)$$

$$\left. \begin{aligned} C_{MWF} &= 1.35 \quad \left( \frac{a\sigma}{|U|} < 1 \right) \\ C_{MWF} &= 1.33 \quad \left( \frac{a\sigma}{|U|} \geq 1 \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (10)$$

(5) 共存場における流体力の再現計算

図-8は、周期  $T=1.6$  s、波高  $H=2.7$  cm、断面平均流速  $U_d=10$  cm/s、 $a\sigma/|U|=1.16$ 、 $I_f=1.08$  の順流の場合について、式(7)および式(8)より求めた流体力係数と修正モリソン式から算定された計算値(図中実線)を実測値(図中・印)と比較したものである。同図には、計算波力を構成する抗力  $F_D$  と慣性力  $F_M$  の時間的変化も併記されている。若干の位相差は認められるものの、水位変動および全流体力の各計算値は実測値をよく再現していることが読み取れる。

図-9は、逆流の場合の水位変動および流体力について再現計算を行ったものである(周期  $T=2.0$  cm、波高  $H=7.2$  cm、断面平均流速  $U_d=40$  cm/s、 $a\sigma/|U|=0.29$ 、 $I_f=1.22$ )。なお、流体力係数については式(9)および式(10)を用いて決定した。順流の場合と同様に、逆流の場合についても実測流体力の再現性が高いことが分かる。

以上より、 $a\sigma/|U|$  によって整理された  $C_{DWF}$  および  $C_{MWF}$  の実験回帰式並びに修正モリソン式の有効性が確

認されたといえる。

5. あとがき

本研究では、波と流れの共存場に設置された無孔半球体に作用する流体力の特性を明らかにするとともに、そこでの流体力の算定法について検討した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) 共存場に設置された無孔半球体に作用する流体力は、鉛直円柱と同様に波と流れの力の線形和では単純に代用できない。

(2) 修正モリソン式を用いて共存場における流体力を算定する場合には、 $a\sigma/|U|$  によって整理された抗力係数  $C_{DWF}$  および慣性力係数  $C_{MWF}$  の実験回帰式が有効で

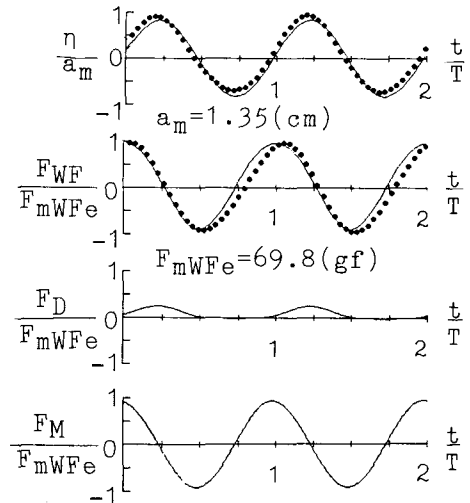
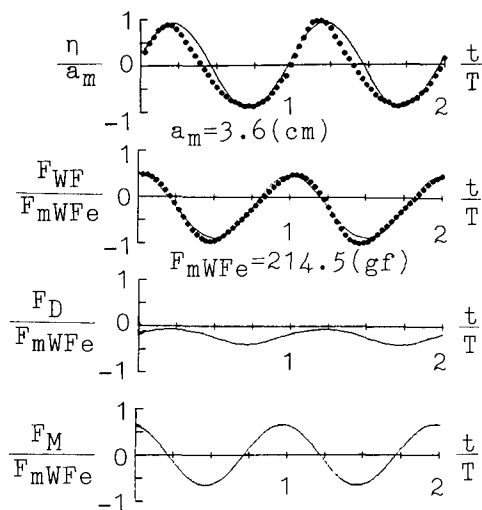


図-8 計算波形と実測波形の比較 (順流)



図—9 計算波形と実測波形の比較 (逆流)

ある。

(3)  $a\sigma/|U|$  が小さく流れが支配的な共存場では、抗力係数  $C_{DWF}$  が流れ場の抗力係数  $C_{DF}$  に漸近する。

(4) 共存場における流体力の算定のために修正モリソン式を用いる方法は、実測流体力を高い精度で再現す

ることができ、妥当な方法である。

## 参 考 文 献

- 石原藤次郎 (1972): 水工水理学, 丸善, pp. 494-495.
- 岩垣雄一・浅野敏之・永井文博 (1982): 波と流れの共存場に置かれた円柱に作用する流体力, 第 29 回海講論文集, 土木学会, pp. 433-437.
- 上北征男・明田定満・田島 泰 (1985): 角型魚礁に作用する流体力の特性について—波と流れの共存場—, 第 32 回海講論文集, 土木学会, pp. 643-646.
- 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.
- 堀川清司・水口 優・北沢 修・柳本泰伴 (1976): 波と流れが共存する場における流体力について (1), 第 23 回海講論文集, pp. 39-44.
- 堀川清司・北沢 修・中井雅彦・水口 優 (1977): 波と流れが共存する場における流体力について (2), 第 24 回海講論文集, pp. 347-351.
- 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.