

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——

上北 征男*・明田 定満**・田 島 泰***

1. ま え が き

200 海里時代を迎え、『とる漁業からつくる漁業』という資源管理型漁業の必要性が認識されるようになってきた。そこで、我が国の沿岸漁場を整備開発し沿岸海域での漁業生産の拡大を図ることを目的に人工魚礁の設置事業が各地で行なわれている。

人工魚礁の設計時に特に考慮しなければならない事項としては

- ① 人工魚礁の製作時、施工時において発生する部材応力が材料の許容強度の範囲内であること
- ② 滑動、転倒、洗掘に対して安定であり魚礁機能を損なわないこと
- ③ 海底に設置後、波、流れなどの外力に対して安全であること

がある。

①について 中村・上北ら、秀島・上北、河野による海底着底時の衝撃力の算定に関する研究がある。②については樫木ら、今井・佐藤らによる実験的研究および工藤・内田による現地調査がある。人工魚礁は対象となる魚介類の生態学的知見を考慮した構造物であるため、梁構造、面構造など各種各様な形態を有する複雑な構造をしている。③については円柱および角柱構造物を対象にして定常流場、波動場および波・流れ共存場における流体力の特性については数多くの研究があるが^{1)~4)}、人工魚礁のような複雑な構造を有する構造物に作用する流体力の適切な算定方法に関する知見は少ない。

本報告は図-1に示す最も一般的に用いられている角型魚礁を対象として波と流れの共存場における角型魚礁に作用する流体力の特性を明らかにしたものである。

2. 実験方法および実験条件

実験は、2.0 m/sec まで速度制御可能な観測台車を有する全長 100 m、幅 1 m、高さ 2.5 m の不規則波造波水路(造波能力: 周期 0.5 sec~5.0 sec, 最大波高 50 cm)を

用いた。図-2に示すように水路に付属している観測台車に図-1に示す部材長 30 cm, 部材幅 4 cm の塩化ビニル製角型魚礁模型を取り付け、模型に作用する全流体力および入射波の諸元を測定した。流れは進行波中を観測台車に取り付けた模型を一定速度(以下、流速と記す)で曳行させることで与えた。

実験条件は水深は 2.0 m で一定とし、模型は自由表面の影響を除くため静水面より 0.5 m 没水させてある。実験は観測台車の走行速度(流速) $U=0, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ m/sec の 7 ケース、波は周期 $T=1.5, 2.0, 2.5$ sec, 波高 $H=0.10, 0.15, 0.20$ m の 9 ケースの合計 63 ケースについて行なった。観測台車の走行は波の進行方向と逆方向とし、 $U>u$ の範囲で実験を行なった。

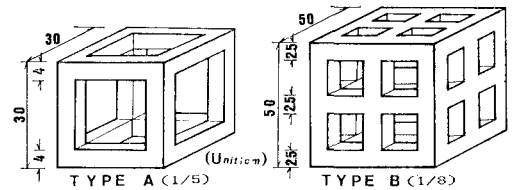


図-1 角型魚礁模型

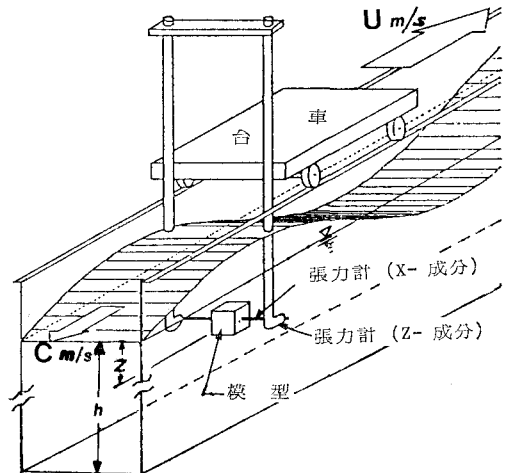


図-2 実験装置概略図

* 正会員 農博 水産工学研究所 水産土木工学部
 ** 正会員 水産工学研究所 水産土木工学部
 *** 日本大学理工学部(現間組広島支店)

3. 理 論

波と流れの共存場における物体に作用する流体力を算定する場合、流体力を抗力と質量力の和で表わされると仮定すると、抗力項の中に波と流れの相乗効果の項が現われ、波動場における流体力と定常流場における流体力を加算したものより大きな流体力が物体に作用する。本研究では堀川らの解析手法に従がい¹⁾、波と流れの相互干渉を無視し、波は波高 H 、周期 T の微小振幅波理論を適用し、流れは流速 U の一様定常流を考えた。水粒子速度は波動場での波による水粒子速度 u と定常流場での流速 U とのベクトル和で表わされるものとする。波と流れの共存場における物体に作用する流体力を、流体速度の2乗に比例する抗力と流体加速度に比例する質量力から構成される式(1)に示されるモリソンの式を用いて算定した。

$$\begin{aligned} F_T &= F_d + F_m \\ &= \frac{1}{2} \rho C_d A |U + u| (U + u) + \rho C_m V \frac{d(U + u)}{dt} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\left. \begin{aligned} u &= u_m \cos \sigma_0 t \\ u_m &= a \sigma \frac{\cosh k(h-z)}{\sinh kh} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 a ：波の振幅 ($=H/2$)、 T ：波の周期、 h ：水深、 z ：静水面からの模型設置水深、 u 、 du/dt ：波の水粒子水平速度および加速度、 k ：波数 ($=2\pi/L$)、 σ ：円周波数 ($=2\pi/T$)、 σ_0 ： $(=kU + \sigma)$ 、 C_d 、 C_m ：抗力係数、質量力係数、 ρ ：水の密度、 A 、 V ：物体の流れ方向の射影面積、排水体積、 U ：定常流速、 F_T 、 F_d 、 F_m ：全流体力、抗力、質量力

式(1)に式(2)で示す波の微小振幅波理論を適用すると、

$$\begin{aligned} F_T &= \frac{1}{2} \rho C_d A |U + u_m \cos \sigma_0 t| (U + u_m \cos \sigma_0 t) \\ &\quad - \rho C_m V \sigma u_m \sin \sigma_0 t \\ &= \pm \frac{1}{2} \rho C_d A U^2 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{u_m}{U} \right)^2 \right] \\ &\quad + 2 \left(\frac{u_m}{U} \right) \cos \sigma_0 t + \frac{1}{2} \left(\frac{u_m}{U} \right)^2 \cos 2\sigma_0 t \\ &\quad - \rho C_m V \sigma u_m \sin \sigma_0 t \quad \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

今、実験から得られた波形 η_{exp} および流体力 F_{exp} は式(4)に示すフーリエ級数に展開される。

$$\left. \begin{aligned} \eta_{\text{exp}} &= \eta_{\text{mean}} + \sum_{n=1}^N a_n \cos 2\pi f_n t \\ &\quad + \sum_{n=1}^N b_n \sin 2\pi f_n t \\ F_{\text{exp}} &= F_{\text{mean}} + \sum_{N=1}^N A_n \cos 2\pi f_n t \\ &\quad + \sum_{n=1}^N B_n \sin 2\pi f_n t \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(4)$$

実験で得られた波形 η および流体力 F を式(4)における定常項と卓越モードを用いて近似し、位相角 α を考慮すると式(5)、(6)が得られる。

$$\begin{aligned} \eta_{\text{exp}} &= \eta_{\text{mean}} + a_k \cos(2\pi f_k t + \alpha) \\ &\quad + b_k \sin(2\pi f_k t + \alpha) \\ &\doteq \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \cos(2\pi f_k t + \alpha + \phi) \quad \dots\dots\dots(5) \\ F_{\text{exp}} &= F_{\text{mean}} + A_k \cos(2\pi f_k t + \alpha) \\ &\quad + B_k \sin(2\pi f_k t + \alpha) \quad \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

ここで、波形 η は模型直上で測定したものであるから波形と流体力の位相角は等しくなければならないため波形の位相角と流体力の位相角を等しくするために式(6)に加法定理を適用し、式(7)に示す関係を用いて整理すると、式(8)が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \tan \phi &= -\frac{b_k}{a_k}, \quad \cos \phi = \frac{a_k}{\sqrt{a_k^2 + b_k^2}}, \\ \sin \phi &= -\frac{b_k}{\sqrt{a_k^2 + b_k^2}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$\begin{aligned} F_{\text{exp}} &= F_{\text{mean}} + \frac{A_k a_k + B_k b_k}{\sqrt{a_k^2 + b_k^2}} \cos(2\pi f_k t + \alpha + \phi) \\ &\quad + \frac{a_k B_k - A_k b_k}{\sqrt{a_k^2 + b_k^2}} \sin(2\pi f_k t + \alpha + \phi) \quad \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

式(3)各項と式(8)を比較することより定義づけられた式(9)～(12)を用いて抗力係数 C_d 、質量力係数 C_m を算定した。

$$C_{dWF} = \frac{2(F_{\text{mean}} + F_{\text{afft}})}{\rho A |U + u| (U + u)|_{t=0}} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$C_{dW0} = \frac{2F_{\text{mean}}}{\rho A U^2 [1 + (u_m/U)^2/2]|_{t=0}} \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$C_{dW1} = \frac{F_{\text{afft}}}{\rho A U u_m|_{t=0}} \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$C_{mWF} = \frac{F_{\text{mfft}}}{\rho V |du/dt|_{t=T/4, 3T/4}} \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここで、 F_{mean} は平均値、 F_{afft} はFFTによるReal項、 F_{mfft} はFFTによるImage項。

4. 結果および考察

4.1 定常流場における抗力係数

角型魚礁を一定速度 U で動かした場合、角型魚礁に作用する流体力は一様流速 U の定常流場に置かれた角型魚礁に作用する流体力と等しいと考えられる。定常流場に置かれた角型魚礁に作用する流体力 F_f は式(1)の抗力項を用いて次のように表わされる。

$$F_f = \frac{1}{2} \rho C_{dF} A U^2 \quad \dots\dots\dots(13)$$

定常流場における抗力係数 C_{dF} を求める実験は、図-1に示す2種類の角型魚礁および辺長30cmの立方体について行なった。実験値を用いて式(13)から抗力係数を求め、 R_e 数で整理した結果を図-3に示す。本実験における R_e 数の範囲内では、 R_e 数に依存せず角型魚

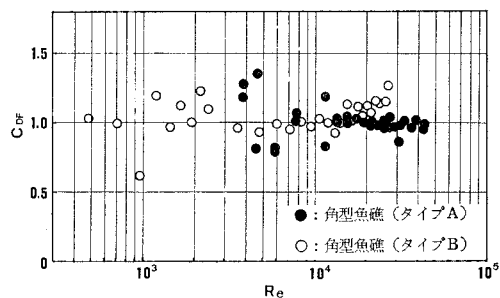


図-3 定常流場における抗力係数

礁の抗力係数はほぼ一定値をとる。角型魚礁(タイプA)の抗力係数は $C_{df}=0.98$ であり, 角型魚礁(タイプB)の抗力係数は $C_{df}=1.12$ を得た。

角柱部材で構成された角型魚礁に作用する流体力を各角柱部材に独立して作用したものの総和と考えると, 一般に角柱部材の抗力係数は $C_a=2.05$ とされているが本実験で得られた $C_{df}=0.98\sim 1.12$ はほぼ半分であり, このことは後面部材に作用する流れが前面部材の影響を強く受けて小さくなることおよび部材長の有限性による効果と推察される。

4.2 波動場および波と波れの共存場における抗力係数

実験値を用いて式(9), (12)から抗力係数 C_{aw} , 質量力係数 C_{mw} を求め, $K.C$ 数(代表長に部材長をとり代表速度に波の最大水粒子速度を用いた)で整理した結果を図-4, 図-5に示す。波動場における抗力係数 C_{aw} についてみると平均が $C_{aw}=1.48$ と定常流場での $C_{df}=0.98$ に比べて大きい値をとることは鉛直円柱にもみられる現象であり, この原因として抗力を算定する際に波の水粒子速度を用いているため流れとして定常状態ではないことに起因していると思われる。

一方, 波と流れの共存場の抗力係数 C_{awf} は, 実験範囲が流れの支配的な範囲で行なったため, 図-5にみられるようにバラバラはあるが $K.C$ 数に対する依存性はみられない。抗力係数はほぼ一定で, 平均は $C_{awf}=1.01$ となり定常流場での抗力係数 $C_{df}=0.98$ とほぼ一致した。

そこで, 波と流れの共存場の抗力係数 C_{awf} に対する波の影響をみるために, 波の水粒子速度と流れの強さの比を表わす $a\sigma/U$ で抗力係数 C_{awf} を整理した結果を図-6に示す。角型魚礁が角柱部材の組合せから成る3次元構造を有する構造物であるため鉛直円柱による結果と単純に比較することは問題があるが, 堀川らの鉛直円柱を用いた実験では $a\sigma/U$ が小さいとき(流れが支配的)定常流場の抗力係数に漸近し, $a\sigma/U$ が大きくなるにつれ波動場の抗力係数に漸近する結果が得られているが¹⁾,

本実験ではそういう傾向がみられずほぼ一定となった。これらの結果から角型魚礁の抗力係数について考察すると, 角柱の抗力係数は $C_a=2.05$ とされているが, 角

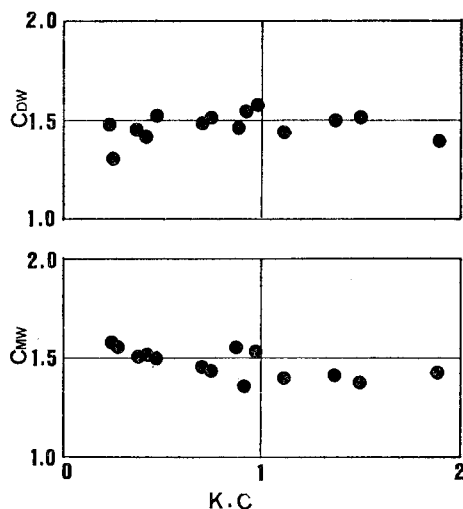


図-4 波動場における抗力係数と質量力係数

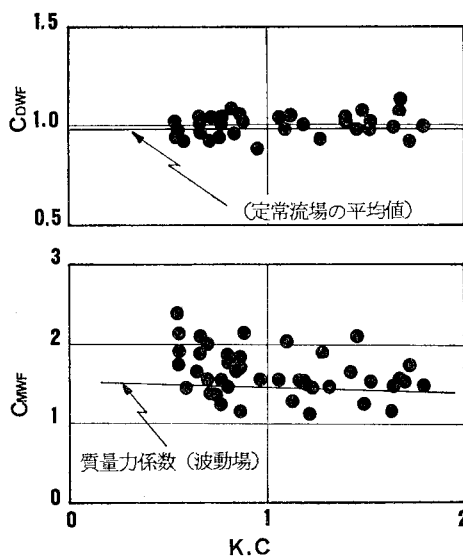
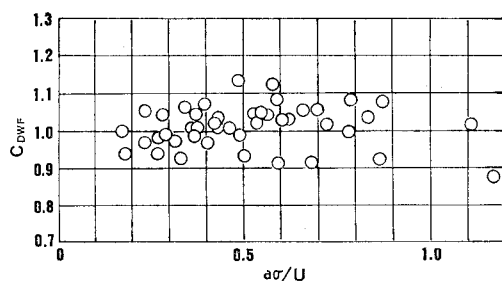


図-5 波と流れの共存場における抗力係数と質量力係数

図-6 C_{awf} と $a\sigma/U$ の関係

柱部材で構成された角型魚礁の抗力係数が波動場および波と流れの共存場において小さくなる原因は、角型魚礁を構成する角柱部材の部材長の有限性の影響および各部材間の相互干渉により後面部材に作用する流速が逡減した影響によるものと考えられる。

4.3 波動場および波と流れの共存場における質量力係数

図-4、図-5に示すように、波動場における質量力係数 C_{mw} および波と流れの共存場における質量力係数 C_{mwf} は $K.C$ 数が大きくなるにつれて小さくなる傾向がみられるが、実験した $K.C$ 数の範囲内において $K.C$ 数に対する依存性は小さく、波動場での質量力係数 C_{mw} の平均は $C_{mw}=1.50$ 、波と流れの共存場での質量力係数 C_{mwf} の平均は $C_{mwf}=1.64$ が得られた。 C_{mwf} 多少のばらつきはあるものの $C_{mwf}=C_{mw}$ とみなしてもよい。

4.4 波と流れの共存場における平均流体力

波と流れの共存場における角型魚礁に作用する流体力の平均値が波の存在することにより定常流場での抗力に比べてどの程度増加するか検討した。

波と流れの共存場における流体力の平均値と定常流場での抗力との比は式(3)、式(13)を比較することにより、また、図-5より $C_{awf} \doteq C_{af}$ であるから

$$\frac{F_{\text{mean}}}{F_f} = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{a\sigma}{U} \right)^2 \left(\frac{\cosh k(h-z)}{\sinh kh} \right)^2 \dots (14)$$

と表される。

そこで、図-7は波と流れの共存場における流体力の平均値 F_{mean} と定常流場での抗力 F_f との比と波の最大水粒子速度を示す $a\sigma$ と流速 U の比である $a\sigma/U$ の関係を $\frac{\cosh k(h-z)}{\sinh kh}$ をパラメータにして整理したものである。 $a\sigma/U$ が大きくなるにつれて、また、相対水深 kh が小さくなるにつれて波と流れの相乗効果が大きくなり F_{mean}/F_f が大きくなる傾向がみられる。

図-8は図-3、図-4に示した角型魚礁の抗力係数 C_{af} 、質量力係数 C_{mw} の平均値を式(1)に代入して周期 $T=1.28$ sec、波高 $H=0.114$ m、流速 $U=0.405$ m/sec の場合について求めた計算値と実測値とを比較したものである。波形および流体力の各計算値は実測値と良く一致しており、魚礁設置事業で一般的に用いられている部材長 l と部材幅 a の比 l/a が6~8倍程度の角型魚礁に作用する流体力の算定の際には、流れが卓越する場合、抗力係数は定常流場の C_{af} 、また、質量力係数は波動場における質量力係数 C_{mw} を用いて算定してもほぼ妥当な算定値が得られる。

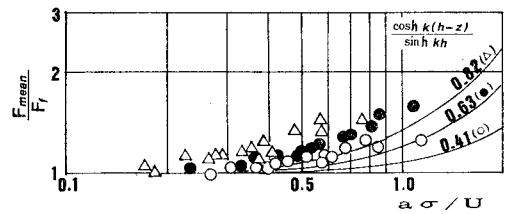


図-7 波と流れの共存場における流体力の平均値

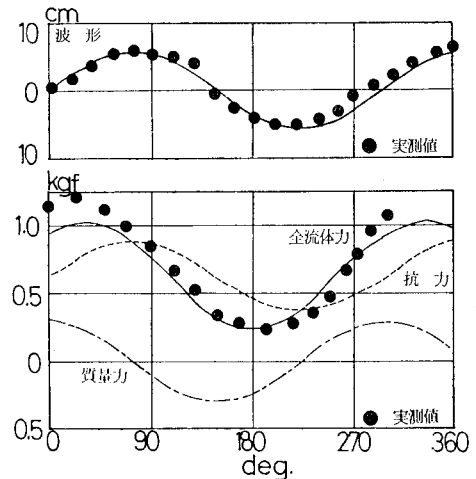


図-8 計算値と実験値の比較

5. おわりに

波と流れの共存場における角型魚礁に作用する流体力は、流れが卓越する場合、定常流場での抗力係数 C_{af} および波動場での質量力係数 C_{mw} を用いて算定してもほぼ妥当な算定値が得られた。

なお、波の卓越する場合に角型魚礁に作用する流体力の算定、角型魚礁の開口比および部材の形状変化と流体力係数の関係について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 堀川清司・水口 優・北沢 修・柳本泰伴: 波と流れが共存する場における流体力について (1), 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 39~44, 1976.
- 2) 堀川清司・北沢 修・中井雅彦・水口 優: 波と流れが共存する場における流体力について (2), 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 347~351, 1977.
- 3) 小寺山亘・田代昭正: 波浪中を前進する鉛直円柱に加わる流体力についての実験的研究, 日本造船学会論文集第151号, pp. 132~139, 1982.
- 4) 田中紀男・池田良穂・西野公夫: 振動する各種二次元柱体に働く粘性流体力, 日本造船学会第6回海洋工学シンポジウム, pp. 55~64, 1982.