単純化した網生簀模型に作用する流体力について

傅 恩波, 佐藤 修, 梨本勝昭, 山本勝太郎

(1989 年 3 月 6 日)

Fluid Force on Simplified Models of Aquaculture Net Cage

En-Bo Fu,* Osamu Sato,* Katsuaki Nashimoto,*
and Katsutaro Yamamoto*

In this experiment, we measured the fluid force on simplified models of aquaculture net cage in steady flow and wave. Then we calculated the drag coefficient and added mass coefficient from the measured fluid force. The main results are as follows:

The added mass coefficient of models in wave was 12. The ratio of the drag force to the maximum wave force became small as the wave height-length ratio increased. However, the ratio of the mass force to the maximum wave force became large as the wave height-length ratio increased. Therefore, we cannot disregard the mass force and consider only the drag force, when we calculate the fluid force acting on aquaculture net cage in wave.

今まで多くの養殖は比較的海況条件の穏やかな内湾や沿岸を利用していたが、漁場も限定され思うように生産が伸びず、波の荒い沖合外洋域の漁場を積極的に利用することが強く要求されてきている。これに伴って養殖場の水深も深くなり、施設も次第に大型になることが予想される。しかも、網生簀などの施設について、施設の構造や繫留に関する今までの知識や技術だけでは十分といえず、荒天時などには莫大な波力が作用し、施設の破壊や流失などの恐れがあって、思うように沖合外洋域の漁場を積極的に活用できないのが現状である。そこで、内湾での養殖ではそれほど大きな問題とされていなかった波浪に対する網生簀の安全性が厳しく問われるようになってきた。沖合に設置した網生簀の安全性を検討するためには、それに作用する流体力を正確に算定する必要がある。網生簀に作用する流体力の算定について、中村,¹⁾ 木村²⁾ は網糸の直径が波高に比して十分小さい場合には、波による流体力は各部材位置での水粒子速度を使えば、定常流による抵抗と同じように計算できるとして取り扱っている。しかし、波による流体力は水粒子速度の自乗に比例する抗力と加速度に比例する質量力の和で与えられる。この計算方法では結果的に質量力を無視したものとなるが、実験的検証はなされていない。従って、網生簀に作用する流体力を正確に算定するには、これらの点は急いで解明する必要がある。そこで、本研究では単純化した縮小網生簀模型を用い、定常流中と波浪中における流体力を測定し、抗力および質量力をそれぞれ求

め検討した。

材料および方法

網生簀としては四角型、六角型、八角型、円型などが使用されているが、本研究では四角型を基本的に考えた。実験には、大きさの異なる 5 種類の単純化した縮小網生簀模型を用いた。模型の形は立方体とし、直径 2.8 mm の鉄の丸棒で網枠を製作し、Fig. 1 に示すような網

Fig. 1. Schematic diagram of simplified netting cage model.

* 北海道大学水産学部 (Faculty of Fisheries, Hokkaido University, Hakodate 041, Japan).

Table 1. Dimensions of models in the experiment

No.	L_M (cm)	Bulk of models (cm ³)	Diameter of twine		Mesh size		Volume of nets (cm ³)
			d_1 (mm)	d_2 (mm)	l_1 (mm)	l_2 (mm)	
1	35	1225	0.57	0.51	1.97	2.11	163.3
2	30	900	0.57	0.51	1.97	2.11	120.0
3	25	625	0.57	0.51	1.97	2.11	83.3
4	20	400	0.57	0.51	1.97	2.11	53.4
5	15	225	0.57	0.51	1.97	2.11	30.0

Fig. 2. Schematic diagram of the large-scale water channel for measuring the fluid force of models in steady flow.

糸直径 $d_1=0.57$ mm, $d_2=0.51$ mm, 脚長 $l_1=1.97$ mm, $l_2=2.11$ mm のナイロン製無結節網地 6 枚を張った。なお、網地を張る前に網枠だけの流体力を予め測定し、枠による流体力分を取り除いた。模型の大きさは一辺の長さをそれぞれ 15, 20, 25, 30, 35 cm とした。模型の概要と諸元はそれぞれ Fig. 1 および Table 1 に示す。

定常流中の実験には北海道大学水産学部の大型回流水槽を使った。水槽は測定部の水路長 16 m, 幅 2 m, 水深 1 m である。この水槽の中央部に模型を流れに面を垂直にして設置し、それに作用する流体力は三分力検力計で測定した。なお、模型は直径 1.2 cm のパイプを通じて

三分力検力計と繋いだ。流速は 10~42 cm/s までの間で 6 段階に変化させた。なお、流速の測定は羽根車の直径が 5 mm の小型のプロベラ式流速計を用いた。実験装置の概略図を Fig. 2 に示す。

波浪中の実験にはフラッター型二次元造波水槽を用いた。使用した装置の概略図を Fig. 3 に示す。水槽の全長は 22 m, 幅は 1.0 m, 深さは 1.2 m である。なお、水深を 85 cm にして実験を行った。起波部から距離 8.4 m のところに模型を波の進行方向に面を垂直に設置した。この模型のすぐ側に容量式波高計を設置し、その出力をコンピューターに入力して、波高記録を得た。また、模型前後の起波部から 6.8 m と 11.7 m の 2 ヶ所に同じく容量式波高計を設置して、2 ペン電位差計で記録し、その波形の位相差から波長 L を読み取った。実験に用いた波の周期は 1.3~3.3 s, 波高は 3.1~23.0 cm, 波長は 225~970 cm の範囲であった。前者と同様に模型を固定し、それに作用する波力は三分力検力計を使って測定し、コンピューターに入力して、データーを処理した。

予め、使用した造波水槽で起こす波が微小振幅波理論に適合しているかどうかを調べるために、波の水粒子速度を前に述べた直径 5 mm の 8 枚羽根の小型流速計を用い測定した。実測値と微小振幅波理論による水粒子速度の計算値を比較するために、両者の比 K_r と波形勾配 H/L との関係を水深別に求め描いたのが Fig. 4 である。 K_r は波形勾配によってほとんど変化がなく、また水深

Fig. 3. Schematic diagram of the wave tank for measuring the fluid force of the models in wave.

WH₁₋₃: Wave height meter, B: Load cell.

Fig. 4. Relationship between the parameters of K_v and H/L , where K_v is the quotient of experimental values of velocity of water particles divided by the calculated ones, H is wave height, and L is wave length.

Fig. 5. Relationship between fluid force in steady flow and flow velocity.

によって明確な差は認められず、全体の平均値は約 0.80 が得られた。この K_v の値を用い、微小振幅波理論によって計算した水粒子の速度を修正した。

Fig. 6. Relationship between maximum fluid force in wave and maximum velocity of water particles.

結果および考察

定常流中で測定した模型の抗力と流速との関係を整理し示したのが Fig. 5 である。抗力はほぼ流速の 2 乗に比例する。波浪中において、模型に作用する最大波力と模型の中心部における水粒子の最大速度との関係を求め描いたのが Fig. 6 である。なお、水粒子の最大速度は微小振幅波理論¹⁾により求め修正したものである。Fig. 6 から見ると、最大波力は水粒子速度の増加とともに大きくなり、ほぼ最大水粒子速度の 1.4 乗に比例する。定常流中では流速が 10~42 cm/s の範囲で測定を行なった。波浪中では、最大の水粒子速度が 3~20 cm/s の範囲である。両者に共通の流速範囲は 10~20 cm/s である。この範囲で模型に作用する流体力を比較すると、波浪中で模型が受ける流体力は定常流中より大きい。

次に波浪中において模型に作用する流体力を抗力と質量力とに分けて考えて見る。物体に作用する水平方向の波力 R_w は Morison 式³⁾ および微小振幅波理論によって、次式で表わされる。

$$R_w = \frac{1}{2} \rho C_d A U^2 \sin(kx - \sigma t) |\sin(kx - \sigma t)| - \frac{2\pi}{T} \rho (C_{ma} + 1) V_N U \cos(kx - \sigma t) \quad (1)$$

ここに、

ρ : 水の密度

C_d : 網生簀模型の抗力係数

C_{ma} : 網生質模型の付加質量係数

T : 波の周期

A : 模型外側の全表面積

U : 模型中心における水粒子の水平方向の最大速度

σ : 角振動数, $\sigma = 2\pi/T$

V_N : 網地の体積

なお, 網地の体積 V_N は近似的に次式を適用して求めた。

$$V_N = \frac{1}{4} \pi K_s (d_1^2 l_1 + d_2^2 l_2) \quad (2)$$

$$K_s = \frac{S}{S_1}$$

ここに,

d_1, d_2 : 網糸の直径

l_1, l_2 : 脚長

S : 網地の全面積

S_1 : 1 目の面積

$(kx - \sigma t) = \pi/2$ の時, すなわち波峰が模型の中心上を通過した時, 上式では抗力が最大となり, 質量力が零となる。また, $(kx - \sigma t) = 0$ の時, すなわち模型の中心上の水位が静水面に一致した時, 抗力が零となり, 質量力が最大となる。これらの関係を利用して, 抗力係数および質量係数を求めた。抗力係数 C_d とレイノルズ数 Re との関係を Fig. 7 に示す。定常流下での抗力係数と比較するために, 図中に定常流中で求めた抗力係数も同時に描いた。なお, 定常流中の抗力係数はニュートン抵抗則を適用して次式から求めた。

$$C_d = \frac{R_D}{\frac{1}{2} \rho A U^2} \quad (3)$$

ここに,

R_D : 抗力

Fig. 7. Relationship between the drag coefficient (C_d) and Reynold's number (Re).

Fig. 8. Relationship between the added mass coefficient (C_{ma}) and KC number.

ρ : 水の密度

U : 定常流の流速

また, レイノルズ数は次式で求めた。

$$Re = \frac{UL_M}{\nu} \quad (4)$$

ここに,

U : 模型中心における水粒子の最大速度, 定常流の場合では, 流速である。

L_M : 模型の一辺の長さ

ν : 水の動粘性係数

Fig. 7 から見ると, 波浪中と定常流中の抗力係数はレイノルズ数によって変り, ほぼ同じ変化傾向を示す。Fig. 8 は付加質量係数 C_{ma} と KC 数 (Kenlegan Carpenter number) との関係を示す。KC 数は次式で求めた。

$$KC = \frac{TU}{L_M} \quad (5)$$

ここに,

T : 波の周期

L_M : 模型の一辺の長さ

付加質量係数 C_{ma} は若干変動しているが, KC 数によってほとんど変化せず, ほぼ一定の値となる。全体の平均値は 12 となる。模型に作用する波力は抗力と質量力の和で与えるので, 最大波力に占める最大抗力の割合と波形勾配との関係を求め示したのが Fig. 9 である。図からわかるように, 最大抗力と最大波力との比は波形勾配 H/L が小さい場合には大きい, 波形勾配の増大によって次第に減少する。 H/L が 1.5×10^{-2} になると, その割合は 0.7 以下になる。一方, 最大波力に占める最大質量力の割合と波形勾配 H/L との関係を模型別に求め描いたのが Fig. 10 である。この図から明らかなように最大質量力の割合は波形勾配 H/L が小さい場合には小さ

Fig. 9. Relationship between R_{D-MAX}/R_{W-MAX} and H/L , where R_{D-MAX} is maximum drag force, R_{W-MAX} is maximum wave force, H is wave height, and L is wave length.

●: model 1, ○: model 2, ▲: model 3, △: model 4, □: model 5.

Fig. 10. Relationship between R_{M-MAX}/R_{W-MAX} and H/L , where R_{M-MAX} is maximum mass force, R_{W-MAX} is maximum wave force, H is wave height, and L is wave length.

●: model 1, ○: model 2, ▲: model 3, △: model 4, □: model 5.

い値を示すが、 H/L の増加に伴って次第に大きくなり、模型の容積の大きい方がその比率も大きい。従って、波形勾配が小さい場合では波力は主に抗力によって生ずるが、波形勾配が大きくなると、抗力は減少し、質量力が大きな割合を占める。実際の養殖場として、水深 40 m を想定した場合、波高 3 m、波長 200 m の波の条件下では、波形勾配が 0.015 となる。その時の抗力の割合は Fig. 9 を利用し試算すると 0.65 となる。従って、抗力だけによって網生簀に作用する波力を計算する方法には若干問題が生ずる場合も起こる。網生簀のような物体の質量力に関する研究は少なく、ほとんど明らかにされていない。秀島⁴⁾は円型の金網模型を用い加速曳航により、その模型の付加質量係数を求めた。その付加質量係数は 2.2 であると報告している。また、堆*は金網製の半球状の

ざるを二つ接合した網球模型（直径 20.5 cm、体積 44.1 cm³）を使い加速曳航して、網球の付加質量係数は 5 の値を得ている。これらの研究はいずれも円柱状の針金で作った網を使用して付加質量係数を求めているが、いずれも円柱の付加質量係数 1.0 より大きな値を算出している。これは網状物体で囲まれた水塊と周囲の水塊の運動のずれによって生じたものと考えられる。一方、傳ら⁶⁾は波浪中で平面網地の付加質量係数（網地に垂直方向）は約 6 程度になることを実験で求めている。本研究では網地で作った生簀模型の付加質量係数はこれらよりさらに大きくなり約 12 となった。これは生簀に用いた網地の質量力のほか、生簀の内部の水と外部の水の運動のずれによって生じた質量力も作用し、このような大きな値になったものと考えられるので、今後解明すべき課題で

* 物体の形状と付加質量係数に関する基礎的研究，北海道大学卒業論文，1980。

ある。

本研究で使った網地では網糸の平均直径 $d ((d_1+d_2)/2)$ と脚長 $l ((l_1+l_2)/2)$ との比 d/l は 0.26 であるが, 実際の網生簀に使用している網糸の直径は石田⁶⁾ の資料によれば 2.7~2.9 mm が適当とされているので, 脚長を 6 節 ($l=3.03$ cm) として d/l を求めると, 0.089~0.096 となる。本実験で用いた d/l の値はこれらよりはるかに大きい。また, 網糸直径と波高との比 d/H は本実験の値では $1.8 \times 10^{-3} \sim 2.3 \times 10^{-3}$ の範囲である。実際の波高 2~8 m とすれば, d/H は $1.45 \times 10^{-3} \sim 3.38 \times 10^{-4}$ となる。従って, 本実験で測定した d/H の範囲では充分とはいえないので, 実物に近い模型を用いて今後実験する必要がある。

ここでは基本的に網生簀を固定し網地は変形せず, しかも運動しないものと考えて流体力を解析した。しかし, 網生簀を実際に設置する場合には多くはアンカーやコンクリートブロックを使用して, ロープなどで繫留し

ている。従って, 波浪によって網生簀自身が運動するし, 網地も変形する。また, 海に設置した網生簀は種々の方向から波と遭遇することになるので, 今後, これらの条件を考慮して網生簀に作用する流体力を解明する所存である。

文 献

- 1) 中村 充: 水産土木学, 工業時事通信社, 東京, 1979, pp. 1-508.
- 2) 木村晴保: 水産土木事例と計算法 (II) (出口利祐, 中村 充監修), 日本水産資源保護協会, 東京, 1980, pp. 94-111.
- 3) 岩垣雄一, 樺木 亨: 海岸工学, 共立出版, 東京, 1979, pp. 235-269.
- 4) 秀島好昭: 水産土木, 20, 15-22 (1983).
- 5) 傳 恩波, 佐藤 修, 梨本勝昭, 山本勝太郎: 日水誌, 55, 65-70 (1989).
- 6) 石田善之: 水産土木, 12, 9-18 (1976).