

養殖筏の設計外力に関する研究

中 村 充*・上 北 征 男**

1. ま え が き

カキ・真珠等養殖管理を必要とする有用水産生物の養殖には、養殖施設であると共に海上作業基地として養殖筏が用いられてきた。また海域汚染が著しくなく、経営形態も小規模な時期においては、湾内・島影等天然の地形を利用し、波の静穏な海域で漁場が形成されていた。しかし沿岸域の汚染の進行および漁場の拡大に伴ない漁場の沖出しが要求され、それに伴って従来経験的に行われていた筏の設計も外力としての波に対し安全であるための設計計算法の確立が急がされている。著者らは、これら養殖施設の設計基準化のための一連の研究を行なっている。

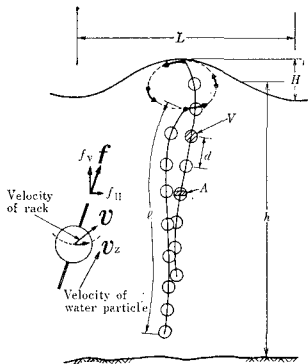
本研究は、養殖筏の設計外力、主として筏部に垂下された養殖連にかかる張力について検討したものである。

2. 理 論

垂下連の波による運動を模式的に示したのが図—1である。1個の養殖塊の垂下連の運動方程式は、図中の記号を用いて示すと式(1)で示される。

$$\frac{\sigma V}{g} \cdot \ddot{v} = f - (\sigma - w_0)V \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial S} - \frac{w_0}{2g} C_D A (v - v_z)^2 - \frac{w_0}{g} C_M V (v - v_z) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 σ , w_0 : 養殖物と海水の単位体積重量, V , A :



図—1 垂下連の波による運動

養殖物一塊の容積および流れに直角な遮影面積, g : 重力の加速度, v_z , $\dot{v}_z$: 水深 z の位置における水分子の移動速度および加速度, v , $\dot{v}$: 垂下体の運動速度と加速度, Ω : 重力ポテンシャル, C_D , C_M : 抗力係数および付加質量係数, f : 垂下ロープ張力。

(1) 垂下連に加わる鉛直力

水深 z の位置にある養殖塊 1 個によって垂下ロープに加わる力の鉛直方向成分 f_v は、ロープ上端の鉛直運動が表面 ($z=0$) の水粒子の運動と一致するとして、添字 s を付して表わすと式(2)となる。

$$f_v = \frac{\sigma}{g} V \dot{w}_s + \frac{w_0}{2g} C_D A (w_s - w_z)^2 + \frac{w_0}{g} C_M V (\dot{w}_s - \dot{w}_z) + (\sigma - w_0)V \dots\dots\dots (2)$$

式(2)中、波の運動に微小振幅波理論を適用し、

$$\left. \begin{aligned} w_z &= \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\sinh 2\pi(h+z)/L}{\sinh 2\pi h/L} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \\ \dot{w}_z &= \frac{2\pi^2 H}{T^2} \cdot \frac{\sinh 2\pi(h+z)/L}{\sinh 2\pi h/L} \sin\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 H : 波高, T : 波の周期, L : 波長, h : 水深, x : 波の進行方向座標, t : 時間, z : 静水面上の距離, 式(3)を式(2)に代入, 式(2)の最大値を求めると, (4)式を得る。

$$\left. \begin{aligned} M_z \leq 2D_z \text{ のとき} \\ f_v &= \frac{M_z^2}{2D_z} + D_z \left(1 - \frac{M_z^2}{4D_z^2}\right) + (\sigma - w_0)V \\ M_z > 2D_z \text{ のとき} \\ f_v &= M_z + (\sigma - w_0)V \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} M_z &= \frac{2\pi^2 w_0 V H}{g T^2} \left(\frac{\sigma}{w_0} + C_M S_z\right) \\ D_z &= \frac{\pi^2 C_D A w_0 H^2}{2g T^2} S_z^2 \\ S_z &= 1 - \frac{\sinh 2\pi(h+z)/L}{\sinh 2\pi h/L} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

式(4)を1本の垂下連長 l について合計し、1本の垂下連に加わる最大鉛直張力 F_v を求める。この場合式(4)の第1, 第2式の判別条件, $M_z \approx 2D_z$ は各水深によって異なるが, $w_s - w_z$, $\dot{w}_s - \dot{w}_z$ は連の最下端 ($z=-l$) で最大となるので $z=-l$ で判別すると1本の垂下連最大

* 正会員 農博 農林省農業土木試験場水産土木 第三研究室長
** 正会員 同上水産土木第一研究室主任研究官

鉛直張力 (F_V) は、式 (6) となる。

$$\left. \begin{aligned} M_l \leq 2D_l \text{ のとき} \\ F_V = \sum_1^n f_V = \frac{M_l}{2D_l} \sum_1^n M_z \\ + \left(1 - \frac{M_l^2}{4D_l^2} \right) \sum_1^n D_z + W' \\ M_l > 2D_l \text{ のとき} \\ F_V = \sum_1^n M_z + W' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $M_l = M_{z=l}$, $D_l = D_{z=l}$, W' : 1本の垂下連の全水中重量, n : 1本の垂下連の養殖塊の個数

$$\begin{aligned} \sum_1^n (S_z)^2 = \frac{1}{d} \int_{-l}^0 S_z^2 \cdot dz = \frac{h}{d} \left[\frac{l}{h} - \frac{2}{2\pi h/L} \left\{ \coth \frac{2\pi h}{L} - \frac{\cosh 2\pi(h-l)/L}{\sinh 2\pi h/L} \right\} \right. \\ \left. + \frac{1}{4\pi h/L} \left\{ \sinh \frac{4\pi h}{L} - \sinh \frac{4\pi}{L}(h-l) \right\} - \frac{l}{h} \right] \equiv \beta \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

式 (5) からの $M_l (M_{z=l})$, $D_l (D_{z=l})$, 式 (7), (9) を式 (6) に代入すると、式 (11) となる。

$$\left. \begin{aligned} M_l \geq 2D_l \text{ のとき} \\ F_V = \frac{2\pi^2 w_0 V H}{g T^2} \left(\frac{l}{d} \cdot \frac{\sigma}{w_0} + C_M \cdot \alpha \right) + W' \\ M_l < 2D_l \text{ のとき} \\ F_V = \frac{M_l}{2D_l} \frac{2\pi^2 w_0 V H}{g T^2} \left(\frac{l}{d} \cdot \frac{\sigma}{w_0} + C_M \cdot \alpha \right) \\ + \left(1 - \frac{M_l^2}{4D_l^2} \right) \frac{\pi^2 C_D A w_0 H^2}{2g T^2} + W' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

式 (11) は、1本の垂下連に加かる最大鉛直張力を示す。

(2) 垂下連に加わる水平力

波運動による垂下連の水平運動は、波による水粒子の水平運動より小さい。よって

ここで

$$\sum_1^n M_z = \frac{2\pi^2 w_0 V H}{g T^2} \left(n \frac{\sigma}{w_0} + C_M \sum_1^n S_z \right) \dots\dots\dots (7)$$

$$\begin{aligned} \sum_1^n S_z = \frac{1}{d} \sum_1^n S_z \cdot d = \frac{1}{d} \int_{-l}^0 S_z \cdot dz \\ = \frac{h}{d} \left[\frac{l}{h} - \frac{1}{2\pi h/L} \left\{ \coth \frac{2\pi h}{L} - \frac{\cosh 2\pi(h-l)/L}{\sinh 2\pi h/L} \right\} \right] \equiv \alpha \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

$$\sum_1^n D_z = \frac{\pi^2 C_D A w_0 H^2}{2g T^2} \sum_1^n (S_z)^2 \dots\dots\dots (9)$$

$$\left. \begin{aligned} u_z > u \\ u_z - u < u_z \\ \frac{\partial}{\partial t} (u_z - u) < \dot{u}_z \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 u , u_z : 水深 z における養殖塊の水方向運動速度および水粒子の水平方向移動速度, $\dot{u}_z$: 水粒子の水平方向の加速度

今、潮流速 (U_0) に波による水粒子の運動が重なるとき、近似的に両運動を重ね合わせて

$$\begin{aligned} U_z = U_0 + \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\cosh 2\pi(h+z)/L}{\sinh 2\pi h/L} \sin \left(\frac{2\pi}{L} x - \frac{2\pi}{T} t \right) \\ \equiv U_0 + \dot{u}_{zm} \cdot \sin \theta \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

式 (13) を式 (1) に代入し式 (12) の関係を考慮すると、式 (14) となる。

$$f_H \leq \frac{w_0}{g} V \left(\frac{\sigma}{w_0} + C_M \right) \dot{u}_z + \frac{w_0}{2g} C_D A U_z^2 \dots\dots\dots (14)$$

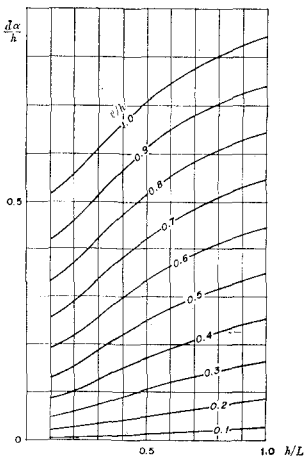


図-2 α を求める図

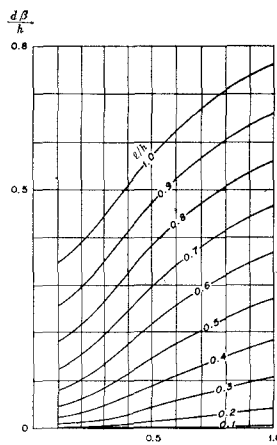


図-3 β を求める図

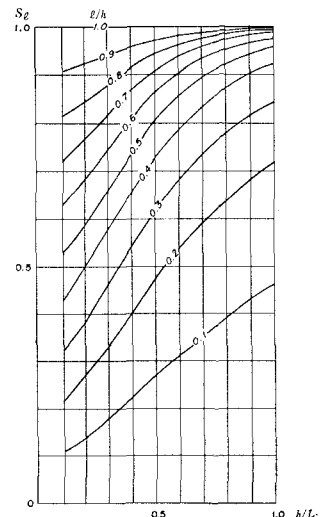


図-4 S_L を求める図

式(14)中右辺第1項は、垂下連上端の係留の仕方によって影響を受け係留索のタルミがなくなった場合の衝撃力の発生に大きく影響するが、一般に最大張力の発生時には係留索をたるませる方向に作用するのでこの項を無視すると

$$f_H \leq \frac{w_0}{2g} C_D A (U_0 + u_{zm})^2 \dots\dots\dots (15)$$

で与えられる。1本の垂下連に加わる水平力(F_H)は、式(15)を合計して

$$\begin{aligned} F_H &= \sum_1^n f_H = \frac{w_0}{2g} C_D A \left[n U_0^2 + 2 U_0 \sum_1^n u_{zm} + \sum_1^n u_{zm}^2 \right] \\ &= \frac{w_0}{2g} C_D A \left[\frac{l}{d} U_0^2 + \frac{L H S_l}{T d} U_0 + \frac{\pi^2 H^2}{T^2} \frac{h}{d} S_u \right] \end{aligned} \dots\dots\dots (16)$$

ここに

$$\begin{aligned} S_u &= \sum_1^n u_{zm}^2 \\ &= \frac{1}{4\pi h/L} \left\{ \sinh \frac{4\pi h}{L} - \sin \frac{4\pi}{L} (h-l) \right\} + \frac{l}{h} \\ &\dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

以上の理論式における α , β , S_l , S_u を図-2~5 に図示する。

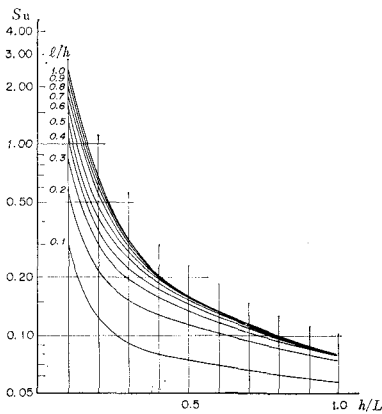


図-5 S_u を求める図

3. 実験と考察

(1) 模型実験

(a) 実験装置と実験波

模型実験に用いた水槽は、長さ 25 m × 幅 1.5 m × 水深 2.5 m の造波水槽で一端にフラップ型の造波機が、他端にはサンフレックスを填充した消波装置がとりつけられている。用いた実験波の範囲は、波高 $H=7.0$ cm ~ 28.0 cm, 周期 $T=1.0 \sim 2.6$ sec, 波長 $L=2.0 \sim 10$ m である。

(b) 垂下張力測定器と垂下体模型

垂下体の連張力の測定器は、図-6 に示すように、鉛

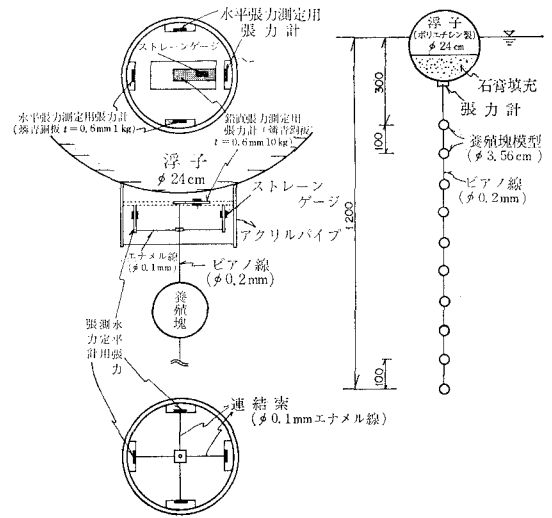


図-6 張力計および垂下連模型

直・水平分力の測定可能な張力計として製作し、浮子の下端に取りつけた。垂下体模型は1個の養殖塊を直径 $D=3.56$ cm のピンポン玉の中に密度 ($\sigma_0=2.20$) のガラス玉を填充したものを用い、図-6 に示すように中心間隔が 10 cm として 10 個を $\phi 0.2$ mm のピアノ線で連結した。1本の垂下連を製作後連全体の空中重量 (W)、水中重量 (W') を測定し、式(18)により模型養殖塊の見かけの比重 (σ_r)、容積 (V) を算出した。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{W}{W - W'} \\ V &= W / (10 \cdot w_0 \cdot \sigma_r) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

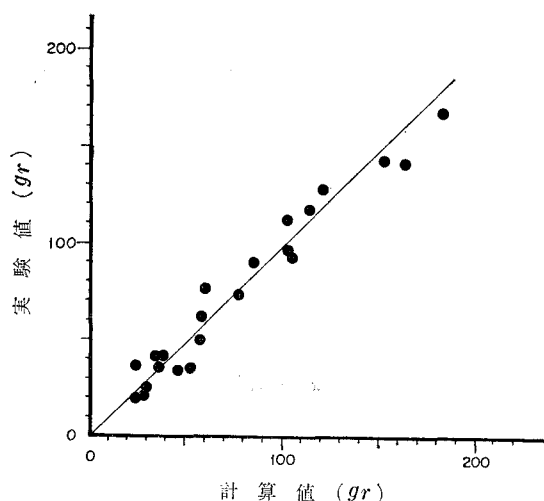
その結果 $\sigma_r=2.15$ gr/cm³, $V=23.71$ cm³ を得た。

垂下体を海中に保持する浮子は、 $\phi 24$ cm の発泡スチロール製のものを用いた。また、浮子が波の水表面を横揺なく上下動するように浮子の内側下部に石膏を填充した。その時浮子の余剰浮力は、約 3.0 kgf である。

(c) 実験結果と考察

実験波の諸元は、容量式波高計 2 本を用い、1 本を浮子の位置に、他の 1 本を波長測定のために 1.5 m 離れた位置に設けペン書きオシログラフの記録から波高 H , 波長 L , 周期 T を読みとった。また、各実験波毎に、張力は鉛直方向作用力 (F_V)、水平方向作用力 (F_H) を張力計を用いて測定し、波の記録と同時にペン書きオシログラフに記録した。

図-7 は、理論計算値と鉛直方向の実測値を対比して示したものである。縦軸の理論値は、式(11)の右辺第1項に各実験毎の測定した波の諸元 (H , L , T) および $\sigma_r=2.15$ gr/cm³, $w_0=1.00$ gr/cm³, $V=23.71$ cm³, $l=1.30$ m, $h=2.5$ m, $d=10.0$ cm, $C_M=0.5$ を代入して求めたものである。



図—7 垂下連張力の理論値と計算値の比較
(鉛直成分)

図—7 は、少しのバラツキはあるが計算値と実測値がほぼ合致している。このバラツキは実験の性格上浮子の運動が水粒子の運動と完全に一致しないこと、また周期 T が短くなるにつれ浮子の横揺れが生じたためと考えられる。以上の事を考慮すると式 (11) は垂下連の鉛直張力算定に充分供し得る。

(2) 現地実験

現地実験は、広島県情島東岸水深 $h=20$ m の位置に、縦 21 m×横 9.0 m の竹材で組まれた筏に垂下された養殖連一本に柳計器製の自記式張力計 (最大測定張力 100 kg) を取り付け測定した。またその時の波の記録は、広島管区気象台の風記録から S.M.B 法を用いて推算したものである。張力測定に用いた垂下連の張力測定時の諸数値は、次に示す通りである。

垂下連の長さ $l=10$ m

垂下連の空中重量および水中重量 $W=36.0$ kg

$W'=8.0$ kg

垂下連 1 本当りの養殖塊数 $n=17$ 個

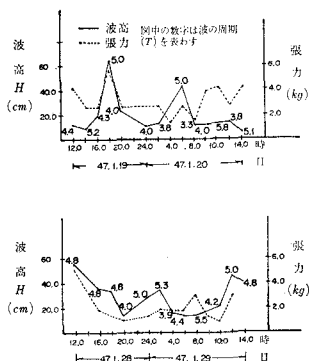
養殖塊の平均径 $D=21.5$ cm

養殖塊の見かけの比重 $\sigma_r=1.36$ gr/cm³

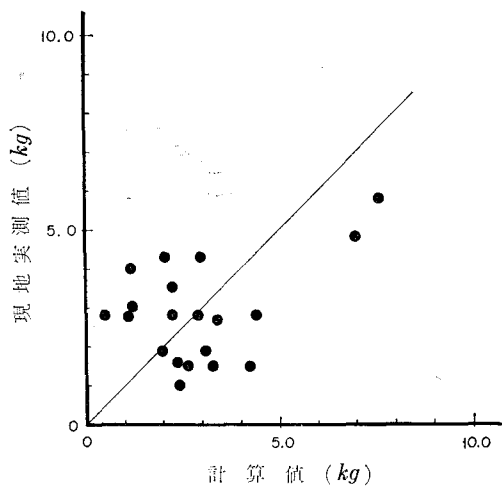
養殖塊の垂下間隔 $d=59$ cm

観測記録を図示したのが図—8 である。図中の実線は波高を示し、数字は周期 T を表わしている。また点線はその時生じている垂下連張力から水中重量を差し引いた張力の変動成分の最大値を示す。風記録から求められた波の諸元を用い、式 (11) を用いて求めた鉛直張力の計算値と実測張力値を比較しているのが図—9 である。

図—9 によれば、計算値と実測値のバラツキは大きい、その傾向は一致していることがわかる。このバラツキの原因は、波の諸元の不正確さに基因して生じたも



図—8 垂下連現地張力と波



図—9 鉛直張力計算値と現地実測値

の、また、潮流力を無視したことによるものと考えられる。

結 言

養殖筏の設計に際し、筏部材の算定に必要な垂下連張力について、理論的に検討し、模型実験、現地実験により理論式の検証を行なった。その結果、垂下連の鉛直最大張力算定には、式 (11) を用いて求められる。

最後に、模型実験には東京水産大学研究生大竹臣哉氏に、現地実験の観測には広島県水産試験場荒川好満氏に多大の援助を賜った。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 中村 充: 浮養殖施設の設計法, FAO 水産増養殖国際会議論文集 (I), 水産庁, pp. 126~131, 1976. 5.
- 2) 広島県農地経済部水産課: カキ養殖法, カキ養殖シリーズ 1, 1966. 5.
- 3) 土木学会: 水理公式集 (昭和38年増補改訂版), pp. 447~452, pp. 488~503.