

波動下における海中養殖施設の動的応答に関する研究

松原 雄平*・平尾 章**・野田 英明***

1. 緒 言

200 海里漁業専管水域の定着ならびに沖合漁業資源の漸減傾向から、わが国の沿岸水域における各種の養殖事業は、今後ますます盛んになるものと思われる。

従来、海中養殖施設は、その大半が、静穏な内湾域において開発・利用が進められてきた。しかしながら、最近では外海域に施設を係留し、厳しい波浪条件下における水産生物資源の増養殖が試みられており、その成果が注目されている。延縄式養殖施設も、その一例であり、一般には、施設を係留固定するための係留索（アンカーロープ）、養殖籠ならびに、これを潜水係留するためのメインロープおよび浮子（ブイ）とから構成されており、主として貝類の養殖を目的としている。現在、日本海沿岸の水深 40 m 以深の海域に、この延縄式養殖施設が試験設置されており、種々の調査が行なわれている。中でも、波の作用によって養殖施設が鉛直方向に大きく振動する場合、養殖貝に与える悪影響が懸念されており、波と養殖施設の応答現象の解明が急務となっている。

これまで養殖施設と波との応答問題を取り扱った研究は数少なく、わずかに、中村・上北¹⁾、木村・宗景²⁾、

村上³⁾、および著者ら⁴⁾の研究が挙げられるのみである。同様の現象を対象とした例としては、本間・荻原⁵⁾の研究があるが、なお解明すべき多くの問題が残されたままである。

そこで本研究は、この延縄式養殖施設の波との動的応答現象を解明するための第一段階として、延縄施設モデルに規則波を作用させた場合の浮子の変位ならびに係留索張力について理論的かつ実証的に検討を加えたものである。

2. 理論的検討

運動方程式の誘導

図-1 は、海底に 2 点係留された延縄養殖施設の模式図ならびに座標系を示したものである。沖側係留点 A を座標系の原点とし、波の進行方向を正として x 軸、鉛直上向きに y 軸をとる。ここで

- (1) 施設は波の進行方向と平行に係留されている。
- (2) 各浮子および沈子の運動は、 $x-y$ 平面を含む二次元運動である。
- (3) 係留ロープの伸び、たるみは無い。
- (4) 中央沈子の水平方向変位量は微小である。

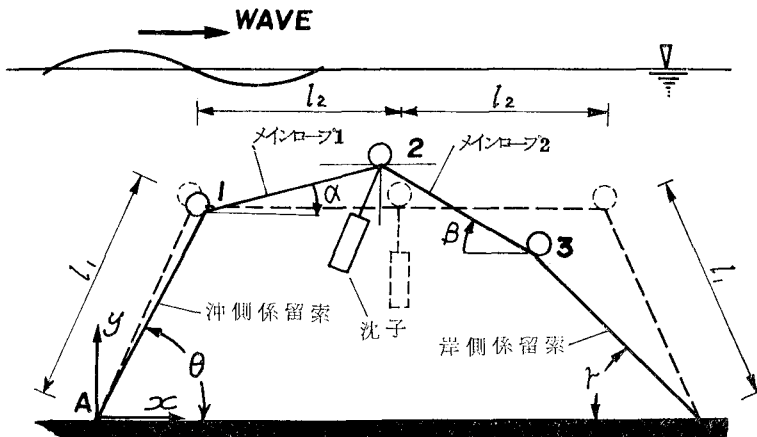


図-1 海中養殖施設模式図および座標系

* 正 会 員 工 修 鳥取大学助手 工学部土木工学科
 ** 学生会員 鳥取大学大学院土木工学専攻
 *** 正 会 員 工 博 鳥取大学教授 工学部海洋土木工学科

と仮定する。

このとき、各浮子の x, y 座標は、つぎのように表わ

される。

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= l_1(\cos \theta - \cos \theta_0) \\ y_1 &= l_1(\sin \theta - \sin \theta_0) \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= l_1(\cos \theta - \cos \theta_0) + l_2(\cos \alpha - 1) \\ y_2 &= l_1(\sin \theta - \sin \theta_0) + l_2 \sin \alpha \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} x_3 &= l_1(\cos \gamma_0 - \cos \gamma) \\ y_3 &= l_1(\sin \gamma - \sin \gamma_0) \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

ここに、 x_i, y_i ($i=1, 2, 3$): 浮子 i ($i=1, 2, 3$) の x および y 座標, l_1, l_2 : アンカーおよびメインロープの長さ, θ, γ : 沖側および岸側アンカーロープの角度, α, β : メインロープ 1, 2 の x 軸とのなす角度であり, 添字 0 は, 静水時での値である。なお θ および α は反時計回りを正とし, γ および β は時計回りを正としている。また $\theta_0 = \gamma_0, \alpha_0 = \beta_0 = 0$ である。

つぎに, 施設形状の幾何学的条件から水平方向および鉛直方向に関する, つぎの拘束条件式をうる。

$$l_1(\cos \theta + \cos \gamma) + l_2(\cos \alpha + \cos \beta) = l_1(\cos \theta_0 + \cos \gamma_0) + 2l_2 \dots\dots (4)$$

$$l_1(\sin \theta - \sin \gamma) + l_2(\sin \alpha - \sin \beta) = 0 \dots\dots (5)$$

さて各浮子および沈子に作用する水平および鉛直方向の波力ならびに流体抵抗力を考慮すると, 各浮子の x, y 方向の運動方程式が得られる。すなわち,

$$m_1 \ddot{x}_1 = f_1 \cos \alpha - F_1 \cos \theta + F_{H_1} \dots\dots (6)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = f_2 \cos \beta - f_1 \cos \alpha + F_{H_2} \dots\dots (7)$$

$$m_3 \ddot{x}_3 = F_2 \cos \gamma - f_2 \cos \beta + F_{H_3} \dots\dots (8)$$

$$m_1 \ddot{y}_1 = F_{V_1} + N_1 + f_1 \sin \alpha - F_1 \sin \theta \dots\dots (9)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 = F_{V_2} + N_2 - f_1 \sin \alpha - f_2 \sin \beta - f_3 \dots\dots (10)$$

$$m_3 \ddot{y}_3 = F_{V_3} + N_3 + f_2 \sin \beta - F_2 \sin \gamma \dots\dots (11)$$

ここに, m_i ($i=1, 2, 3$): 浮子 i の質量, f_1, f_2, F_1, F_2 : それぞれメインロープ 1 および 2, 沖側係留索 (アンカーロープ) および岸側係留索の張力, f_3 : 中央沈子に作用する鉛直方向波力と水中重量との和, N_i : 浮子 i の浮力, である。さらに F_{H_i}, F_{V_i} は, 浮子 i に作用する水平方向ならびに鉛直方向の波力であり, モリソン式を参照すると, それぞれ次のように表わされる。

$$F_{H_i} = \rho_0 C_M V_i \dot{u}_i - \rho_0 C_V V_i \dot{x}_i + \frac{1}{2} \rho_0 C_D S_i (u_i - \dot{x}_i) |u_i - \dot{x}_i| \dots\dots (12)$$

$$F_{V_i} = \rho_0 C_M V_i \dot{w}_i - \rho_0 C_V V_i \dot{y}_i + \frac{1}{2} \rho_0 C_D S_i (w_i - \dot{y}_i) |w_i - \dot{y}_i| \dots\dots (13)$$

ここに, ρ_0 : 水の密度, C_M, C_D : それぞれ慣性力係数ならびに抗力係数, C_V : 実質付加質量係数, u_i, w_i : 座標 (x_i, y_i) ($i=1 \sim 3$) における水平方向ならびに鉛直方向の水粒子速度, V_i : 浮子 i の容積, である。

式 (6), (7) および (8) の辺々を相加えると

$$\sum_{i=1}^3 m_i \ddot{x}_i = -F_1 \cos \theta + F_2 \cos \gamma + \sum_{i=1}^3 F_{H_i} \dots\dots (15)$$

同様に, 式 (9), (10) および (11) の辺々を加えると

$$\sum_{i=1}^3 m_i \ddot{y}_i = \sum_{i=1}^3 (F_{V_i} + N_i) - F_1 \sin \theta - F_2 \sin \gamma \dots\dots (16)$$

式 (6), (9) から f_1 を消去すると

$$m_i (\ddot{x}_1 \sin \alpha - \ddot{y}_1 \cos \alpha) = F_1 \sin (\theta - \alpha) + F_{H_1} \sin \alpha - F_{V_1} \cos \alpha - N_1 \cos \alpha \dots\dots (16)$$

を得る。さらに, 式 (8), (11) から f_2 を消去すると

$$m_3 (\ddot{x}_3 \sin \beta + \ddot{y}_3 \cos \beta) = -F_2 \sin (\gamma - \beta) + F_{H_3} \sin \beta + F_{V_3} \cos \beta + N_3 \cos \beta \dots\dots (17)$$

式 (1), (2) および (3) の x_i, y_i ($i=1, 2, 3$) を時間に関して微分すると, $\dot{x}_i, \dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{y}_i$ ($i=1, 2, 3$) の各項は, それぞれ $\theta, \gamma, \alpha, \beta$ および, その角速度ならびに角加速度の関数として表わされる。この関係を式 (14), (15), (16) ならびに (17) の中の $\dot{x}_i, \dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{y}_i$ の各項へ代入すると, $\theta, \gamma, \alpha, \beta$ に関する運動方程式が得られる。さらに拘束条件式 (5) および (6) とから, 結局, 6 個の未知量 $\theta, \gamma, \alpha, \beta, F_1$ および F_2 に関する 2 階の連立微分方程式が得られる。ここで, θ の時間に関する微分項を以下のように差分化する。

$$\dot{\theta} = (\theta_i - \theta_{i-1}) / \Delta t \quad (i=1, 2, \dots)$$

$$\ddot{\theta} = (\theta_{i+1} - 2\theta_i + \theta_{i-1}) / \Delta t^2 \quad (i=1, 2, \dots)$$

この差分化を α, β, γ についても同様に行ない, 運動方程式中の各微分項を差分項でおきかえると, 最終的に $\theta_{i+1}, \gamma_{i+1}, \alpha_{i+1}, \beta_{i+1}, F_1, F_2$ を未知量とする 6 元 1 次

の連立方程式が得られる。

数値計算は, 初期値として

$$t=0 \quad \theta = \gamma = \theta_0 (= \gamma_0), \quad \alpha = \beta = 0, \\ \dot{\theta} = \dot{\gamma} = \dot{\alpha} = \dot{\beta} = 0$$

を与え, 解が十分安定するまで 50 周期以上計算を続け各浮子の変位ならびに係留索張力を求めた。なお, 計算時間ステップ Δt は $\Delta t = T/1000$ (sec) とした。

3. 実験装置および方法

実験は, 長さ 24 m, 幅 0.6 m, 深さ 1.1 m の二次元波動水槽を用いて行なった。模型は 3 個のプラスチック製浮子ならびに塩化ビニール製沈子, および直径 0.6 mm のナイロン製の係留ロープとからなっている。

表—1 に, 浮子ならびに沈子の寸法を示す。

入射波高の測定ならびに各ブイの位置における表面波形の測定は, 容量式波高計を用いて行なった。岸側ならびに沖側係留索張力の測定は, 高感度荷重センサ ($0.029 \text{ gf}/10^{-6}$) およびプーリーを用いて行なった。さらに, 波の作用による各浮子ならびに沈子の変位を水槽外部よりガラス壁を通してビデオカメラに撮影した。これらの波高計, 張力計ならびにビデオアナライザーからの出力

表-1 浮子および沈子の諸元

	浮子 1, 3	浮子 2	沈子
型 状	球	球	円 柱
直 径 d (cm)	3.7	3.0	外径 2.6 内径 2.0
高 さ l (cm)			12.3
投影面積 S (cm ²)	10.75	7.07	水平 31.98 鉛直 2.04
体 積 V (cm ³)	26.52	14.14	65.30
質 量 m (gf·sec ² /cm)	5.1×10^{-3}	3.5×10^{-3}	4.0×10^{-2}
重 量 W (gf)	5.0	3.4	38.34
浮 力 B (gf)	26.52	14.14	27.60
余剰浮力 N (gf)	21.52	10.74	-10.74
密 度 ρ (gf·sec ² /cm ⁴)	1.9×10^{-4}	2.5×10^{-4}	6.1×10^{-4}

は、すべてマイクロコンピュータを用いて少なくとも5周期以上について解析し、各位相ごとに平均した。

実験条件は、水深を45cmと一定とし、沖波浅水比 h/L_0 および沖波波形勾配 H_0/L_0 が、いずれも微小振幅の条件を満たすように周期 T 、波高 H を決定した。すなわち、 $0.85 \text{ sec} \leq T \leq 2.69 \text{ sec}$ 、 $1.0 \text{ cm} \leq H \leq 12.6 \text{ cm}$ の範囲の波の条件で、16ケースの実験を行なった。

各浮子および沈子の設置水深は、それぞれ15cm、31.6cmである。

4. 実験結果の検討および考察

図-2は、静水中において浮子2に初期変位を与え、減衰自由振動させた場合の鉛直方向変位量の測定結果と $C_D=0.5$ 、 $C_M=1.5$ 、 $C_T=1.0$ において計算した結果を比較したものである。これより、実験値は計算値よりも、わずかに大きく現われているものの、ほぼ両者は一致していること、および両者の減衰振動周期は、いずれも約2secであることがわかる。以下に示す数値計算結果は、前述の抗力係数、慣性力係数の値を用いて得られた値である。

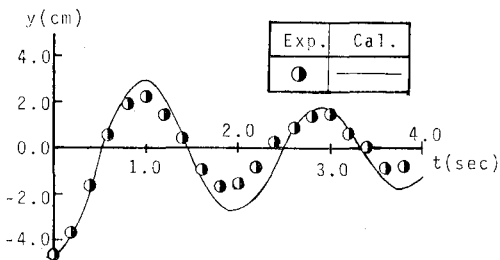


図-2 減衰自由振動(浮子2)

各浮子の鉛直方向変位量

模型実験の結果から、各浮子の水平方向変位量は、鉛直方向のそれと比較して微小であることから、ここでは、鉛直方向の浮子の運動についてのみ検討する。

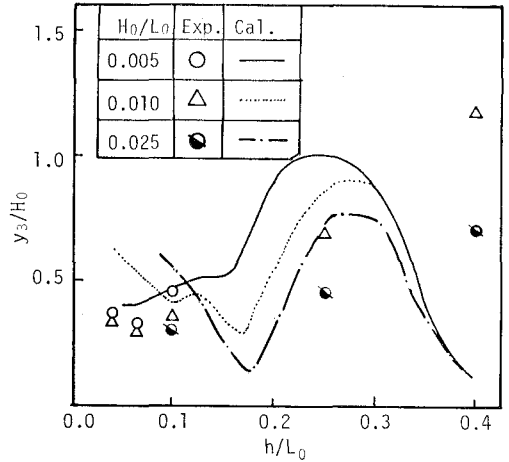


図-3 浮子3の鉛直方向変位量

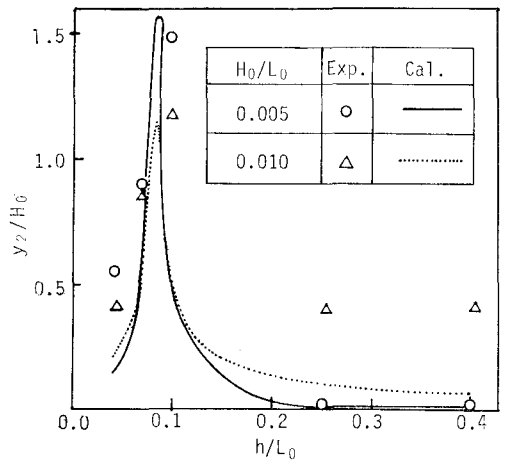


図-4 中央浮子の鉛直方向変位量

図-3および図-4は、それぞれ波の作用による浮子3および浮子2の鉛直方向変位量を沖波波高で無次元化し、 H_0/L_0 をパラメータにとり表わしたものである。また同図には、数値計算結果も合わせて示している。

図-3より、浮子3の無次元変位量は h/L_0 の増大とともに大きくなること、 H_0/L_0 の値が小さくなるにつれ、変位量は減少することなどがわかる。さらに数値計算結果は $h/L_0 < 0.1$ の範囲では、ほぼ実験結果に近い値をとるが $h/L_0 > 0.1$ の条件では、実験値とかなり異なることがわかる。特に $h/L_0 > 0.25$ の条件では、計算値は急激に減少している。これは、非線形項の差分計算にも、その一因があると考えられるが、現在のところ明確ではない。

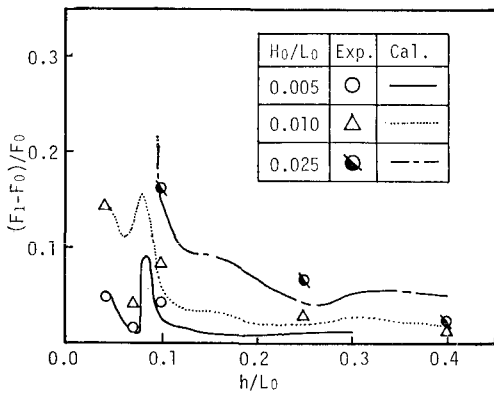
一方図-4において、中央浮子の鉛直変位量の測定結果で特徴的な点は、 h/L_0 の値が0.1付近で実測値が急激に増大し浮子2および沈子が共振現象を呈することである。この共振現象は、 H_0/L_0 の値にかかわらず認め

られ、その無次元変位量は H_0/L_0 の増大とともに減少している。数値計算結果と実験結果とを比較すると、共振点付近では両者の値はほぼ一致すること、しかし $h/L_0 > 0.2$ の条件では、理論値は、実験値よりも、かなり小さいことがわかる。

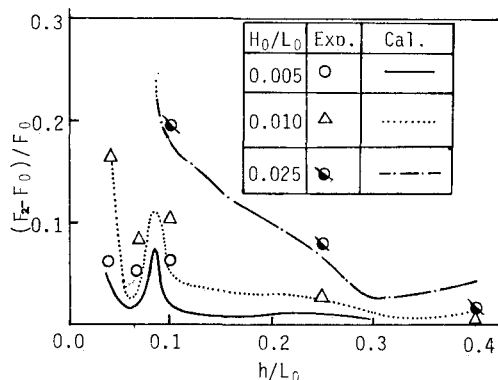
最大索張力

図—5 および 図—6 は、それぞれ岸側および沖側係留索張力の最大値を初期張力で除した値を、 H_0/L_0 パラメーターとして表わし、実験値と計算値とを比較したものである。これらの図より、

- (1) 波の特性にかかわらず、岸側・沖側係留索には、ほぼ同程度の索張力が発生すること。
- (2) h/L_0 を一定とした場合、 H_0/L_0 が増大するにつれて最大索張力も大きくなること。
- (3) $h/L_0 = 0.1$ 付近で最大索張力が急激に増大すること。この傾向は、 H_0/L_0 の値が大きくなるほど、顕著である。特に、この結果は、前述のように中央浮子および沈子の運動と係留索張力の変動とが密接に関係していることを示しており興味深い。
- (4) 最大索張力の計算値と実験値を比較すると、実験値が理論よりも、わずかに大きく現われている。



図—5 岸側係留索張力

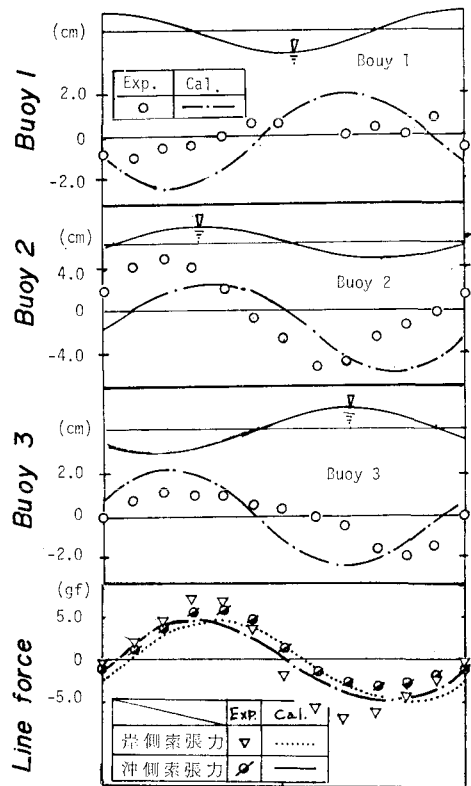


図—6 沖側係留索張力

浮子の鉛直変位量ならびに係留索張力の時間的変化

図—7 は、 $h/L_0 = 0.10$, $H_0/L_0 = 0.01$ の実験条件より得られる各浮子の鉛直変位ならびに索張力の時間的変化を波の一周期について示し、計算結果と比較したものである。これより

- (1) 浮子 1 と 3 の鉛直方向変位量は、互いに逆位相となること、また実験値が理論値よりもやや大きく、位相もわずかに異なっていること、浮子は、実験値が計算値よりも、かなり大きく位相も、わずかに異なることがわかる。
- (2) 測定された岸側ならびに沖側索張力の時間的変化は中央浮子の変位の時間的変化とよく対応していること、さらに、計算結果と、ほぼ一致することもわかる。



図—7 浮子の変位量ならびに係留索張力の時間的変化

5. 結 語

以上、本研究では、延縄式養殖施設を対象にして、比較的簡単なモデルを想定し理論的に波動下における係留浮子および係留索張力の数値計算法を示し、さらに、模型実験によって、その検証を行なった。得られた結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 本研究で想定した養殖施設モデルは、ある特定の波の条件で共振を起こし、その変位量が急激に増大

すること、さらに、この結果は、数値計算結果とも
ほぼ一致することがわかった。

(2) 係留索張力の時間的变化、ならびに最大索張力の
計算値は、実験値とほぼ一致することがわかった。

今後、計算手法を改良し、計算精度を高めるとともに、
実験モデルについても、現実の養殖施設形状に近づける
必要がある。また実際の施設において種々の観測調査を
行ない、実用に供しうる算定公式を提案するつもりであ
る。

最後に、この研究に多大のご援助を賜った鳥取県水産
試験場の諸氏に深謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 中村 充・上北征男: 養殖筏の設計外力に関する研究, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 625~629, 1977.
- 2) 木村晴保・宗景志浩: 波動下における沖合養殖いけすの係留張力の算定法について, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 501~505, 1982.
- 3) 村上仁士・細井由彦・津野道彦: 津波による養殖筏の挙動に関する実験的研究, 土木学会中・四国支部講演概要集, 1982.
- 4) 松原雄平・野田英明: 浮魚礁に関する研究, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 436~440.
- 5) 本間 仁・萩原国宏: 浮遊物体(構造物)の波による水平移動運動について, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 515~519, 1974.