

# 浮魚礁に関する研究

松原雄平\*・野田英明\*\*

## 1. 緒 言

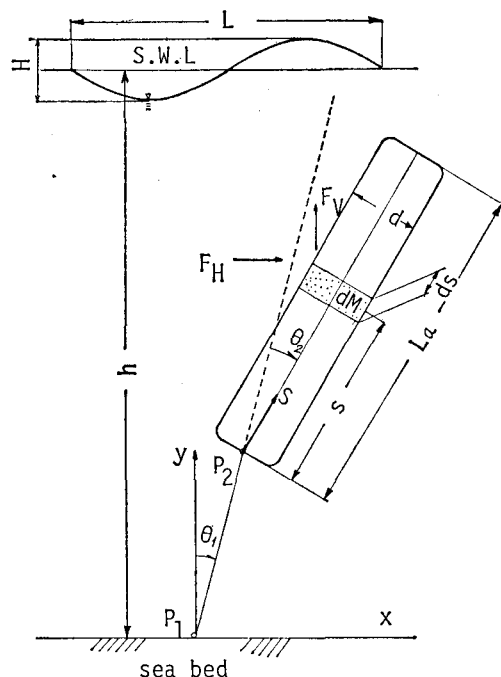
浮魚礁とは、沿岸漁業の再開発と、魚介類の資源管理を目的として考案された人工魚礁の一つである。これは水深 100 m 程度の沖合、海域の中層に網、ロープ、ブイ等により構造物を潜水浮遊させるもので回遊性底中層魚介類が帯留することで漁獲量の増大を図るものである。

浮魚礁は、海中の 1 点ないし数点で係留されるため、波力、潮汐力等が浮体に作用すると、浮体部は外力の方向に回転あるいは移動することが可能で、浮体に作用する流体力を緩和させる機能を有している。したがって、浮魚礁を機能的かつ経済的に設計する上では、波の特性と浮体の変化応答との関係および浮体に作用する流体力を明らかにする必要がある。しかし現在のところ、このような波と海中構造物との動的応答の問題については十分に解明されているとはいえない。木村<sup>1)</sup>は、浮魚礁の係留索張力について 3 種の浮体形状を想定して張力算定式を、また吉原<sup>2)</sup>は、海中係留球の波による応答ならびに索張力について考察を行なっているが、なお検討すべき点が残されている。同様の現象を対象とした研究例としては、R. A. Naftzger<sup>3)</sup>は、海底で係留された貯油タンクの波による動的応答問題を取り扱っている。

本研究は、海底の 1 点で係留された単円柱の浮魚礁モデルを想定し、波によって生ずる浮魚礁浮体部の変位、ならびに係留索張力の算定式を、すでに著者らが行なっている 1 自由度系による解析法<sup>4)</sup>をさらに進め、倒立剛体 2 重振り子の 2 自由度系の振動問題として導くとともに、あわせて、その実験的検証を行なったものである。

## 2. 理論的考察

図—1 は、海底の 1 点で係留された、長さ  $L_a$  の円柱浮魚礁と、それに作用する流体力ならびに座標系を模式的に示したものである。浮体の余剰浮力が鉛直方向の流体力に比べて大きく、かつ浮体の運動が、波の進行方向を含む 2 次元平面内に限られるものと仮定する。いま、



図—1 座標系および浮体模式図

浮体の微小質量要素  $dM$  について考えると、 $dM$  の中立位置からの変位は、点  $P_1$  まわりの係留索角  $\theta_1$  と点  $P_2$  まわりの浮体回転角  $\theta_2$  によって

$$x_1 = l \sin \theta_1 + S \sin (\theta_1 + \theta_2) \quad \cdots \cdots (1)$$

$$y_1 = l \cos \theta_1 + S \cos (\theta_1 + \theta_2) \quad \cdots \cdots (2)$$

のようになる。ここに、 $S$  は点  $P_2$  を原点とし、浮体中心軸に沿って上向きを正とし、 $l$  は係留索長である。要素  $dM$  の運動エネルギー  $dE$  は、式 (1), (2) より

$$dE = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) \cdot \rho_0 \{ (\dot{x}_1)^2 + (\dot{y}_1)^2 \} \cdot ds \quad \cdots \cdots (3)$$

となる。したがって、浮体の全運動エネルギーは、 $\theta_1, \theta_2$  が微小であるとして、

$$E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \{ (3r^2 + 3r + 1) \dot{\theta}_1^2 + (3r + 2) \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2 \} \quad \cdots \cdots (4)$$

となる。ここに、 $I$  は点  $P_2$  に関する浮体の慣性モーメントで、 $1/3 \cdot \rho_0 \cdot V \cdot L_a^2$  であり、 $V$ : 浮体容積、 $\rho_0$ : 浮体

\* 正会員 工修 鳥取大学助手 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部海洋土木工学科

密度,  $r=l/La$  である.  $\theta_1, \theta_2$  に関する Lagrange の運動方程式は,

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial E}{\partial \theta_i} = Q_i \quad (i=1,2) \dots\dots\dots (5)$$

と表わされるので, 式 (4) を式 (5) に代入すると

$$\left. \begin{aligned} I(3r^2+3r+1)\ddot{\theta}_1 + I(1.5r+1)\ddot{\theta}_2 &= Q_1 \\ I(1.5r+1)\ddot{\theta}_1 + I\ddot{\theta}_2 &= Q_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

となる. ここに,  $Q_i$  ( $i=1,2$ ) は一般化力であり,  $\theta_1, \theta_2$  が, それぞれ単位量だけ増加する時にすべての外力がなす仕事である. すなわち, 圧力勾配力  $f_1$ , 仮想質量力  $f_2$ , 抗力  $f_3$ , 体積力  $f_4$  の外力が質量要素  $dM$  に作用すると考えれば, 外力のなす仕事  $dQ_1$  は,  $dQ_1=(l+s) \times \left( \sum_{i=1}^3 f_i + \theta_1 f_4 \right)$  で表わされるので, 浮体全体については,

$$\int_0^{La} dQ_1 = \int_0^{La} (l+s) \left( \sum_{i=1}^3 f_i + \theta_1 f_4 \right) \dots\dots\dots (7)$$

となる. ここに,  $f_1 = \rho \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) \frac{du}{dt} \cdot ds$ ,  $\rho$ : 水の密度,  $u$ : 水平方向の水粒子速度,  $f_2 = -K_1 \cdot \rho \cdot \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) \frac{d}{dt} \{ (l+s)\dot{\theta}_1 - u \}$ ,  $K_1$ : 仮想質量係数,  $f_3 = -c_1 \cdot \{ (l+s)\dot{\theta}_1 - u \}$ ,  $c_1$ : 抵抗係数,  $f_4 = -(\rho - \rho_0) \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) \cdot g \cdot ds$  である.

また,  $Q_2$  についても同様に

$$Q_2 = \int_0^{La} s \cdot \left( \sum_{i=1}^3 f_i + (\theta_1 + \theta_2) f_4 \right) \dots\dots\dots (8)$$

となり, 式 (7), (8) をそれぞれ式 (6) に代入し, Morison 式にならって整理すると,  $\theta_1, \theta_2$  に関する運動方程式が得られる. すなわち,

$$\begin{aligned} & (I + K_1 \cdot R) \ddot{\theta}_1 + R_2 \cdot I \cdot \ddot{\theta}_2 + c_1 \cdot \left( \frac{1}{3} + r^2 \right) \dot{\theta}_1 \cdot La^2 \\ & + (\rho - \rho_0) V g La (r+1) \theta_1 \\ & = \left\{ (1 + K_1) \int_0^{La} \rho A_s (l+s) \frac{du}{dt} \cdot ds \right. \\ & \quad \left. + C_D \frac{\rho}{2} d \int_0^{La} (l+s) \cdot u |u| ds \right\} \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & R_2 I \ddot{\theta}_1 + (I + K_2 R) \ddot{\theta}_2 + c_2 La^2 \left( \frac{1}{2} + r \right) \dot{\theta}_2 \\ & + (\rho - \rho_0) V g \frac{La}{2} \theta_2 \\ & = \left\{ (1 + K_2) \int_0^{La} \rho A_s \cdot s \cdot \frac{du}{dt} \cdot ds \right. \\ & \quad \left. + C_D \frac{\rho}{2} d \int_0^{La} s \cdot u |u| ds \right\} \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

式 (9), (10) は, 2 自由度系の定常強制振動を表わす運動方程式である. この特別解は

$$\theta_1 = \Theta_1 e^{i(\omega t + t_1)}, \quad \theta_2 = \Theta_2 e^{i(\omega t + t_2)}$$

とおいて, これらの式を, 式 (9), (10) に代入し,  $\sin \omega t$ ,  $\cos \omega t$  の係数を等置すれば, 求める強制振動の解が得られる.

また,  $\theta_1, \theta_2$  が明らかになると, 係留索張力  $T_l$  が水平ならびに鉛直方向の流体力  $F_H$  および  $F_V$  と浮体の回転運動による遠心力  $F_C$  とのつり合い式から, つぎのように得られる. すなわち,

$$T_l = \sqrt{\{F_V + (\rho - \rho_0) V g\}^2 + F_H^2} + F_C - (\rho - \rho_0) V g \dots\dots\dots (11)$$

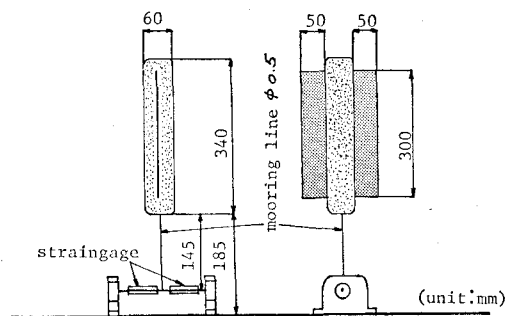
ここに

$$\begin{aligned} F_V &= -(1 + K_1) \rho A_s u_m \omega \frac{1}{K} \left\{ \cosh kLa \left( 1 + \frac{l}{La} \right) \right. \\ & \quad \left. - \cosh kl \right\} \cos \omega t \\ F_H &= -(1 + K_1) \rho A_s u_m \omega \left\{ \sinh kLa \left( 1 + \frac{l}{La} \right) \right. \\ & \quad \left. - \sinh kl \right\} \sin \omega t \\ & \quad + C_D \frac{\rho}{2} A_s u_m^2 \frac{1}{4K} \left\{ \sinh 2kLa \left( 1 + \frac{l}{La} \right) \right. \\ & \quad \left. + \sinh 2kl + 2kl \right\} \cos \omega t \\ F_C &= -(\rho_0 + K_1 \rho) V \dot{\theta}_1 La \left( \frac{1}{2} + \frac{l}{La} \right) \sin^2 (\omega t - \varphi_1) \\ & \quad - (\rho_0 + K_2 \rho) V \dot{\theta}_2 \frac{L}{2} \sin^2 (\omega t - \varphi_2) \end{aligned}$$

$$u_m = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{1}{\sinh kh}, \quad k = 2\pi/L, \quad \omega = 2\pi/T, \\ L \text{ は波長, } T \text{ は周期である.}$$

### 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 2 次元鋼製波動水槽を用いて行なった. 水槽の 1 端には 1/10 勾配の斜面が設置されており, 斜面先端より沖側 5 m の位置に 図—2 に示すような張力測定装置を設け, 浮魚礁係留索張力を測定した. 浮体部は, 長さ 34 cm, 直径 6 cm, 重量 768.5 gf の塩化ビニール製円柱である. また, 浮体が揚力によって横方向に動揺するのを防ぐために, 円柱の側面に 30 cm × 5 cm の塩化ビニール製の羽根を取りつけた. 張力計は, 水槽底面に固定した 2 個の軸受け間に燐青銅板を渡して, その中心に係留索を結び, そ



図—2 浮体および張力測定装置

の左右両面に防水ゲージを貼付したものである。これにより、ゲージ面が常に外力方向を向き、測定精度が向上する。係留索には伸縮の無視できる直径 0.5 mm のワイヤーを用いた。張力測定結果は同一地点に設置した容量式波高計から得られる波形とペンレコーダーに同時出力させた。また浮体の波による変位は、外部よりガラス壁面を通して 16 ミリシネフィルムに水面波形とともに撮影しモーションアナライザーで解析した。実験は、水深を 60 cm に保ち、波の周期  $T = 0.84 \text{ sec} \sim 3.4 \text{ sec}$ 、波高  $H = 1.40 \text{ cm} \sim 8.70 \text{ cm}$  の範囲の規則波を用いて 18 ケースについて行なった。

#### 4. 実験結果の考察

式 (9), (10) において速度、加速度項を 0 とおくと固有周期  $T_1, T_2$  ( $T_2 < T_1$ ) が、 $\theta_1, \theta_2$  に関する同次方程式から算定される。図-3 は、木村が行なった長柱態浮魚

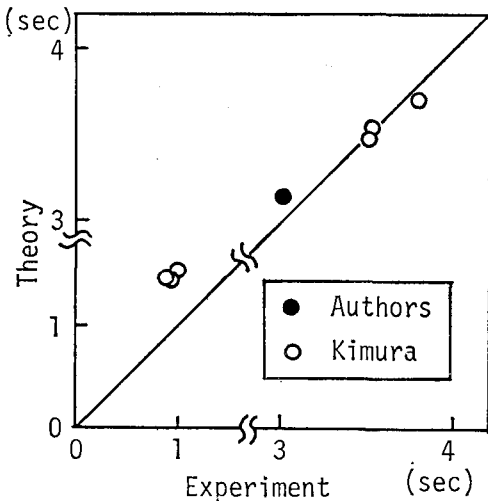


図-3 固有周期の理論値と実験値の比較

礁 ( $L_a = 1.03 \text{ m}$ ,  $d = 0.09 \text{ m}$ ) の固有振動数の測定結果ならびに著者らの行なった測定結果 ( $T_1$  のみ) と計算結果と比較したものである。この図より、第 1 次基本振動周期  $T_1$  については実測値、理論値ともにほぼ一致しているものの第 2 次基本振動周期については、理論値が実測値よりもわずかに大きいことがわかる。

図-4 は、今回の一連の実験から観察された、波の作用による浮体部の振動状況を模式的に示したものである。タイプ 1 は、係留索角  $\theta_1$ 、浮体回転角  $\theta_2$  が波の位相とほぼ同位相で現われる振動形であり、特に基本振動周期近傍で顕著である。タイプ 2 は、 $\theta_2$  に比べて  $\theta_1$  の時間的変化がきわめて小さく、浮体は点  $P_1$  を中心に回転運動を行なう振動形である。一方、タイプ 3 は、点  $P_2$

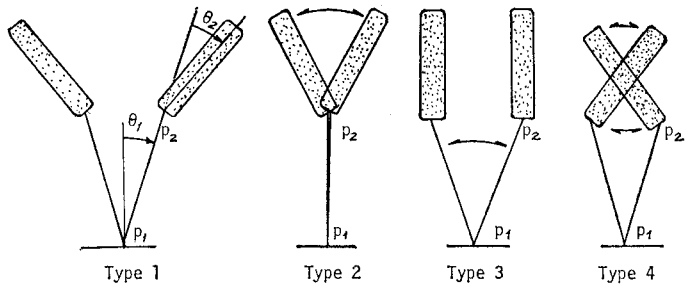


図-4 浮体の振動状況

まわりの浮体の回転運動が殆んど観察されない振動であり、浮体は中立の位置を保ち波の進行方向に振動するものである。最後にタイプ 4 は、 $\theta_1$  と  $\theta_2$  とが逆位相となるものであり、浮体の回転中心は点  $P_2$  より上方に存在する。タイプ 1 およびタイプ 4 は、それぞれ 1 次ならびに 2 次の基本振動に対応しており、これらの図は、波の特性の変化とともに、浮体の変位応答は、きわめて複雑に変化することを示している。

図-5 は式 (9), (10) において、 $c_1 = 0.014$ ,  $c_2 = 0.045$  において算定される係留索角  $\theta_1$  (実線)、浮体回転角  $\theta_2$  (一点鎖線) と実験結果を比較したもので、縦軸に振幅  $\theta_1, \theta_2$ 、横軸に振動数  $\omega$  をとって示してある。この図より、 $\theta_1$  は実験値、理論値ともに  $\omega = 2$  付近で急激に大きくなり最大値を示していること、および  $\theta_2$  も、ほぼ同様の傾向を示すものの  $\theta_2$  が最大となる  $\omega$  は  $\theta_1$  のそれに比べてわずかに高周波数側になる。また  $\omega = 5$  付近

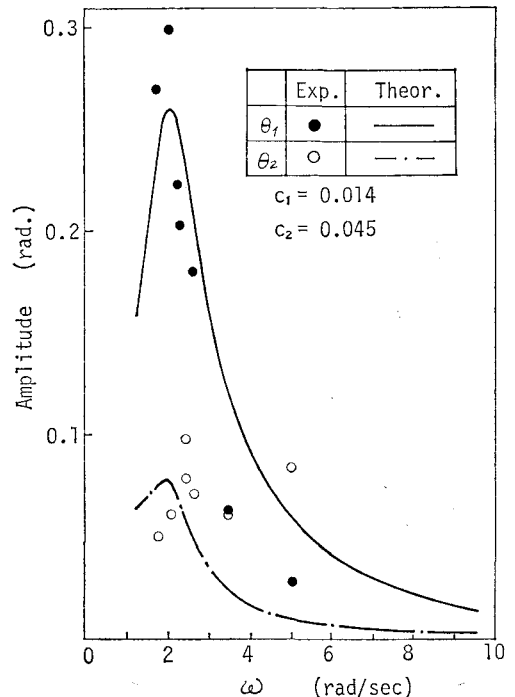


図-5 共振曲線

では、 $\theta_2$  実験値と理論値とが大きく異なっていることがわかる。この周期では、タイプ 4 に示されるような振動形となっており、式 (9)、(10) の算定結果は、タイプ 4 の高次の基準振動に対しては、実際の値よりもかなり小さく見積ることを示している。これは、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$  の振幅を決定する上で、きわめて重要なパラメータである減衰定数  $c_1$ 、 $c_2$  に問題があるためと思われる。ここでは、線型減衰を仮定してこれらの値を決めたが減衰定数  $c_1$ 、 $c_2$  は、等価減衰定数の仮定に基づいて決定されるべきであると考えられ、今後、さらに検討する必要がある。

図-6 (a)、(b) および (c) は、波の一周期における表面波形  $\eta$ 、係留索角  $\theta_1$ 、浮体回転角  $\theta_2$ 、係留索張力  $T_i$  の時間的変化を示したものであり、実線が理論値、丸印が実験値である。

図-6 (a) は、 $H/L=0.0128$ 、 $h/L=0.5462$  の条件における結果で、第 2 次基本振動周近傍での記録である。この図より、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$  の実測値が理論値よりも約 10 倍程度大きく、しかも  $\theta_1$  に関しては、実験値の位相と理論値のそれが、逆転していることがわかる。一方、係留索張力は、実験値にわずかにばらつきが見られるものの理論値との対応は、比較的良好なことがわかる。このことから、第 2 次基準振動では、索張力の時間的変化は、浮体の変位応答によって、それほど影響を受けないことがわかる。

図-6 (b) は、 $H/L=0.0233$ 、 $h/L=0.1605$  の条件で得られた結果である。これより、係留索角  $\theta_1$  は、最大値、最小値ともに理論値が実験値よりもわずかに大きい

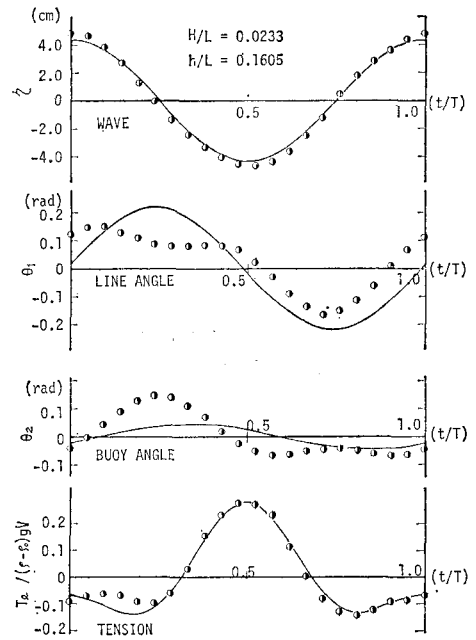


図-6 (b)

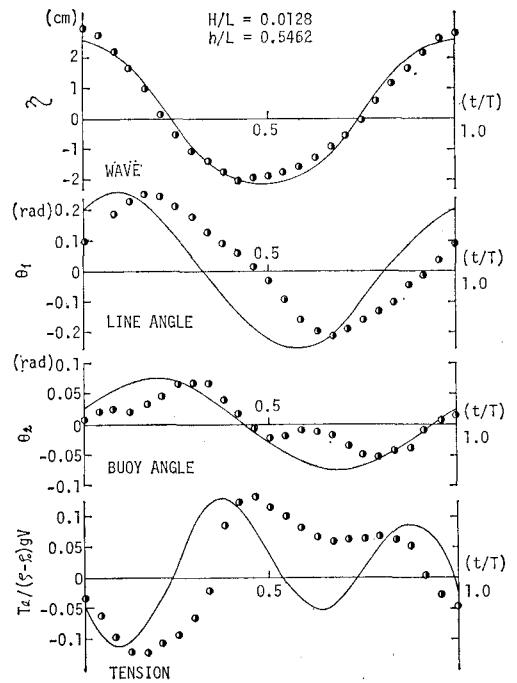


図-6 (c)

ものの、ほぼ両者は一致しており、また、それらの位相についても同様のことがいえる。一方、浮体回転角  $\theta_2$  は、最大と最小値の絶対値が異なっており、波の一周期で非対称な運動を行なっていることがわかる。また、係留索張力の測定結果は、計算結果ときわめて良い対応を示している。さらに、波の一周期における索張力の時間

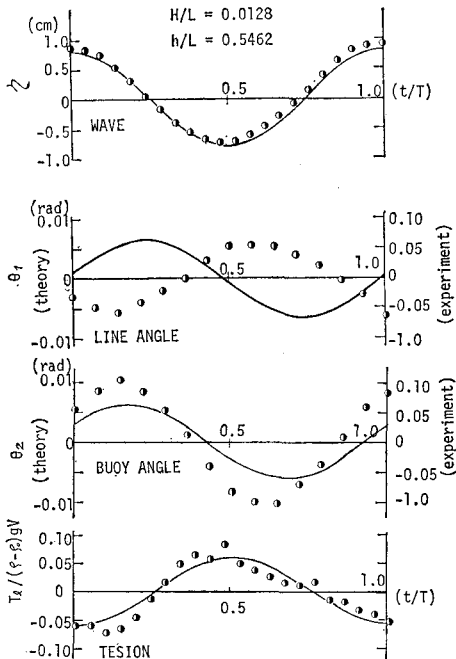


図-6 (a)  $\eta$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $T_i/(\rho-\rho_0)gV$  の時間的変化

的变化は、波の谷の位相で最大索張力を示しており、鉛直方向の慣性力が、その支配的要素となっていることがわかる。

図-6(c)は、 $H/L=0.0066$ ,  $h/L=0.0799$ の条件で得られた、第一次基本振動周期近傍における結果である。この図において、係留索角  $\theta_1$ 、浮体回転角  $\theta_2$  の理論値と実験値を比較すれば、両者の位相はわずかに異なっているものの、それらの最大値、最小値は良く一致していること、および  $\theta_2$  の位相は、 $\theta_1$  と比較すると、わずかな遅れが認められることがわかる。係留索張力の時間的な変化は、図-6(a)および(b)の結果と異なり、一周りに張力のピークが2回現われる双峰形の変化を示していることがわかる。これは、 $\theta_1$ ,  $\theta_2$  の値が、ほぼ0に近くなる位相と対応していることから、浮体の遠心力もまた、係留索張力の変動に大きく影響していることがわかる。特に、波の周期が浮体の基本振動周期  $T_1$  と一致すると、浮体の遠心力の効果が卓越し、その結果、過大な索張力が生ずる可能性があるといえる。

図-7は、 $l/d=2.416$ と一定の場合、式(11)から計

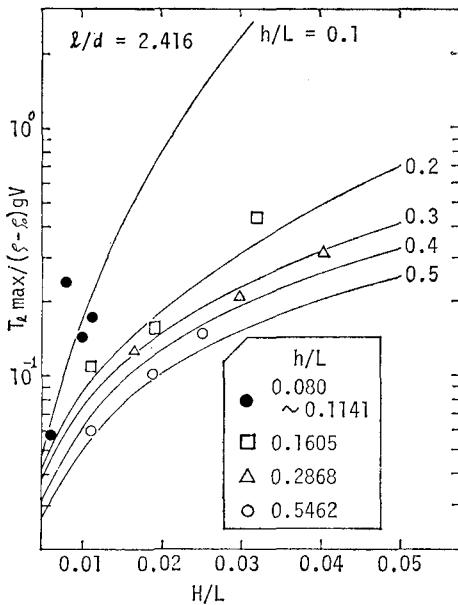


図-7 最大係留索張力と  $H/L$  および  $h/L$  の関係

算される最大係留索張力を、余剰浮力で無次元化して、 $H/L$  との関係、 $h/L$  をパラメーターにとって示したものである。また、同図には、実験によって得られた無次元最大係留索張力を  $h/L$  をパラメーターとして示してある。この図より  $h/L$  を一定にとると  $H/L$  の増大とともに最大索張力が大きくなること、 $h/L$  が大きくなるにつれて最大索張力が増加することなどがわかる。また、実験結果も、計算結果と、かなり一致しており、式(11)から、係留索に発生する最大張力がかなり正確に算定されることが明らかとなった。

## 5. 結 語

この研究では、波の作用によって生じる浮魚礁浮体部の変位および係留索張力について理論的に算定式を導くとともに実験的に検討を加えてきた。得られた結果を要約すると以下のようである。

1) 波による浮体の変位量を表わす係留索角  $\theta_1$ 、浮体回転角  $\theta_2$  については、本研究で導いた式(9),(10)によって一部を除き、ほぼ妥当に算定されることがわかった。しかし、タイプ4の振動モードについては、理論的に説明することができず、減衰定数の算定方法も含めて検討の余地があると思われる。

2) 係留索張力については、この研究で導いた張力算定式で精度よく算定されることがわかった。特に、波の周期が浮体の第一次の固有周期に近づくにつれて、鉛直方向の慣性力に加えて浮体の回転運動による遠心力が最大係留索張力の支配的要因となることから、係留索に大きな引張力が発生することがわかった。

## 参 考 文 献

- 1) 木村晴保: 波によって生ずる浮魚礁の係留索張力, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 612~616, 1978.
- 2) 吉原 進・上原教善: 海中係留球に作用する規則波波力, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 387~391, 1978.
- 3) Naftzger, R. A. and S. K. Chakrabarti: Dynamic behavior of floating storage vessel, Journal of the Waterway Port Coastal and Ocean Division, pp. 157~167, 1980.
- 4) 野田英明・松原雄平: 浮魚礁に関する研究(1), ——波による動的応答——, 鳥取大学工学部研究報告, 第11巻, 第1号, pp. 230~236, 1980.