

$C_{D\tau(n)i}$: i 浮体の $\tau(n)$ 方向の抗力係数

$A_{\tau(n)i}$: i 浮体の $\tau(n)$ 面への投影面積

$(\dot{\xi}_i, \dot{\zeta}_i), (\ddot{\xi}_i, \ddot{\zeta}_i)$: i 浮体の図心における流体の速度と加速度の τ および n 成分で、図心における流体の速度と加速度の水平及び鉛直加速度を $(\dot{x}_i, \dot{z}_i), (\ddot{x}_i, \ddot{z}_i)$ とすれば

$$\left. \begin{aligned} (\dot{\xi}_i, \dot{\zeta}_i) &= (\dot{x}_i, \dot{z}_i) \cos \varphi - (\dot{z}_i, \dot{x}_i) \sin \varphi \\ (\ddot{\xi}_i, \ddot{\zeta}_i) &= (\ddot{x}_i, \ddot{z}_i) \sin \varphi + (\ddot{z}_i, \ddot{x}_i) \cos \varphi \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

$\dot{r}_{\tau(n)i}, \ddot{r}_{\tau(n)i}$: i 浮体の図心の速度と加速度の $\tau(n)$ 成分で

$$\left. \begin{aligned} \dot{r}_{\tau i} &= (l_0 + l_{QRi})\dot{\varphi} - \dot{Z}_0 \sin \varphi \\ \ddot{r}_{\tau i} &= (l_0 + l_{QRi})\ddot{\varphi} + 2(\dot{l}_0 + \dot{l}_{QRi})\dot{\varphi} - \ddot{Z}_0 \sin \varphi \\ \dot{r}_{ni} &= (\dot{l}_0 + \dot{l}_{QRi})\dot{\varphi} + \dot{Z}_0 \cos \varphi \\ \ddot{r}_{ni} &= -(\dot{l}_0 + \dot{l}_{QRi})\ddot{\varphi} + (\dot{l}_0 + \dot{l}_{QS}) + \ddot{Z}_0 \cos \varphi \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

3. 球状懸浮魚礁

これは浮体部の形状が球体で近似でき、大きさが係留索長や波長に比べて充分に小さく、浮体に働く流体力、浮力、重力、係留索張力が全て 1 点に作用するものとみなしえるもので、式 (1) は式 (5) となる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varphi} &= \alpha_{\tau} \frac{\dot{\xi}}{l} + \beta_{\tau} \frac{l}{D} \left(\frac{\dot{\xi}}{l} - \dot{\varphi} \right) \left| \frac{\dot{\xi}}{l} - \dot{\varphi} \right| - \sin \varphi \\ -\dot{\varphi}^2 &= \alpha_n \frac{\dot{\zeta}}{l} + \beta_n \frac{l}{D} \left| \frac{\dot{\zeta}}{l} \right| \left| \frac{\dot{\xi}}{l} \right| + \cos \varphi - \frac{T}{N} \end{aligned} \right\} \dots\dots (5)$$

ここに、 $\therefore p \left(= \sqrt{\frac{1-\delta}{\delta+K_S} \frac{g}{l} t} \right)$ に関する微分

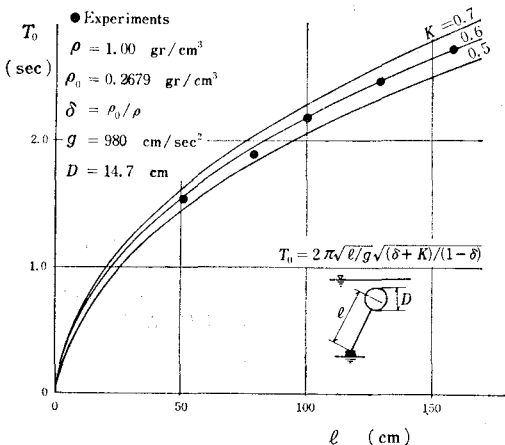
$$\alpha_{\tau} = \alpha_n = \frac{1+K_S}{\delta+K_S}, \quad \beta_{\tau} = \beta_n = \frac{1}{2} \frac{D A_S}{V_S} \frac{C_{DS}}{\delta+K_S} \dots\dots (6)$$

D : 球体の直径, δ : 球体の比重, N : $F-W$

K_S : 球体の付加質量係数, C_{DS} : 球体の抗力係数

V_S : 球体の体積, A_S : 球体の投影面積

3.1 固有周期



図—2 1 点で係留された球体の固有周期

固有周期 T_0 は、式 (5) の第 1 式の右边第 1, 第 2 項をゼロ, $\sin \varphi \doteq \varphi$ とし次式を得る。

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{\delta+K_S}{1-\delta} \frac{l}{g}} \dots\dots (7)$$

図—2 は実験値と式 (7) を比較したもので、これによれば球体の付加質量係数 K_S は 0.5 よりも 0.6 となる。これは式 (7) が抗力を無視した結果によるものと考えられる。

3.2 係留索張力

最大係留索張力の水平分力 $(T_H)_{\max}$ と鉛直分力 $(T_V)_{\max}$ は、式 (5) で $\xi/l \ll 1, \varphi \ll 1$ とし、Dronkers-Schonfeld の手法を用いることにより次式を得る²⁾。

$$\left. \begin{aligned} (T_H)_{\max} &\doteq (T_n)_m \cdot \varphi_m \\ (T_V)_{\max} &\doteq (T_n)_m \end{aligned} \right\} \dots\dots (8)$$

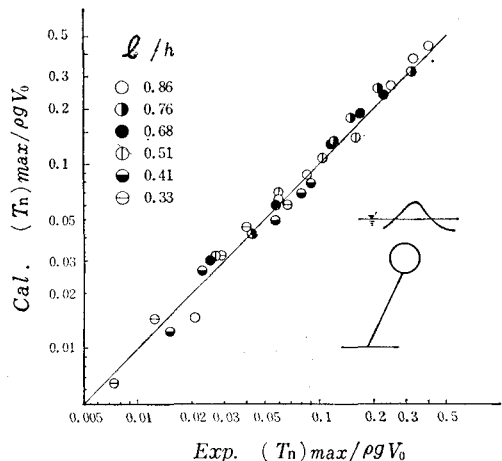
ここに、

$$\left. \begin{aligned} (T_n)_m &= N \{ (\lambda \varphi_m)^2 + (F_{V0})_{\max} / N + 1 \} \\ \lambda &= T_0 / T \quad (T: \text{波の周期}) \\ \varphi_m &= \frac{1}{\sqrt{2} q \lambda^2} [\{ (1-\lambda^2)^4 + 4q^2 \lambda^2 \}^{1/2} - (1-\lambda^2)^2]^{1/2} \\ &\quad \times \{ (\alpha_{\tau} - 1) \lambda^2 + 1 \} \frac{x_{Gm}}{l} \\ q &= \frac{8}{3\pi} \beta_{\tau} \frac{l}{D} \{ (\alpha_{\tau} - 1) \lambda^2 + 1 \} \frac{x_{Gm}}{l} \end{aligned} \right\} \dots\dots (9)$$

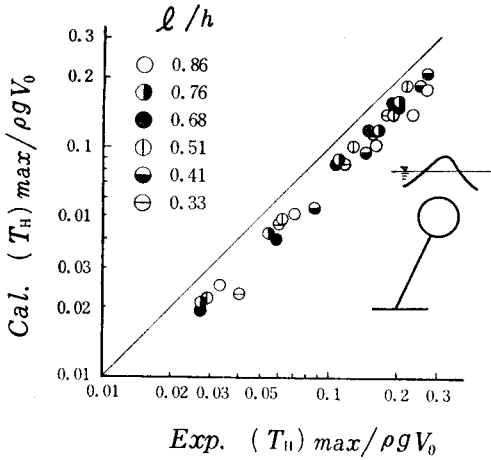
x_{Gm} : 浮体の重心位置での波による水粒子の水平移動半径

$(F_{V0})_{\max}$: 固定球体に働く鉛直波力の最大値

図—3, 4 は 図—2 の球体を水深 $h=2.50$ m の下で得た実験値と式 (8) との比較で、計算には $K_S=0.6, C_{DS}=0.5$ とした。図—3 の $(T_n)_{\max}$ は式 (9) の第 1 式の最大張力 $(T_n)_m$ から余剰浮力 N を差し引いた値、すなわち張力の最大変動値を意味し、これは以下に示す 図—6, 9 に



図—3 張力の最大変動値 $(T_n)_{\max}$ の計算値と実験値の比較



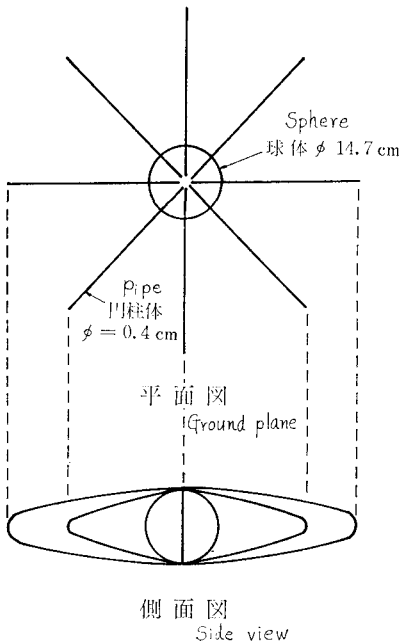
図—4 最大水平力 $(T_H)_{max}$ の計算値と実験値の比較

についても同様である。

張力の最大変動値に関してはほぼ妥当な結果といえるが、最大水平力は計算値の方が実験値よりも全て小さい。これは抗力係数 $C_{DS}=0.5$ によるものと考えられる。

4. 複合態浮魚礁

これは図—5のように、球体と柱体からなる浮体で、このような浮体の固有周期と係留索張力は、式(6)で $\alpha_\tau, \beta_\tau, \delta$ を求める際、 C_{DS}, K_S, δ を式(10)の $C_{D\tau}, K_\tau, \delta$ で与え、式(9)の $(F_{V_0})_{max}$ を固定した複合態に働く流体力の鉛直最大力で与えれば、式(7), (8) から求ま



図—5 複合態浮魚礁

る。

$$\left. \begin{aligned} C_{D\tau} &= C_{DS} + C_{DP\tau} \cdot A_{P\tau} / A_S \\ K_\tau &= K_S + (1 + K_{P\tau}) \cdot V_P / V_S \\ \delta &= (\rho_S V_S + \rho_P V_P - \rho_P V_S) / \rho V_S \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

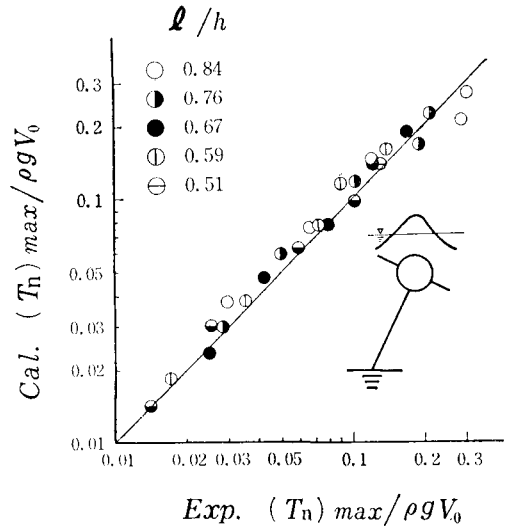
ここに、

$C_{DP\tau}, K_{P\tau}$: 柱体の τ 方向の抗力係数と付加質量係数

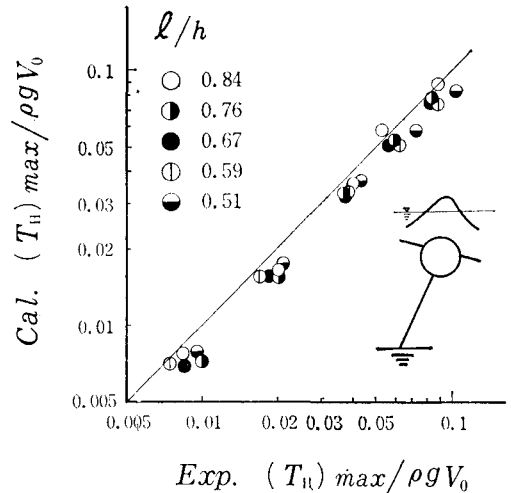
$A_{P\tau}$: 柱体の τ 面への投影面積

V_P, ρ_P : 柱体の体積と密度

図—6, 7は計算値と実験値との比較で、ほぼ妥当な結果といえる。



図—6 張力の最大変動値 $(T_n)_{max}$ の計算値 ($C_{Dn}=1.932, C_{D\tau}=1.457, K=0.579$) と実験値の比較



図—7 最大水平力 $(T_H)_{max}$ の計算値と実験値の比較

5. 長柱態浮魚礁

5.1 固有周期

式 (1) で水粒子の速度と加速度をゼロ, 式 (2) の右辺第3項を無視し, さらに $\varphi \ll 1$, $\theta \ll 1$ とみなすことにより次式を得る³⁾.

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= T_0 \sqrt{1 + a(f+d)/e} \\ T_2 &= T_0 \sqrt{(c-ad)/e} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

ここに,

$$\left. \begin{aligned} T_0 &= 2\pi \sqrt{(\delta + K_\tau)/((1-\delta) \cdot l/g)} \\ \delta &= \rho_0/\rho, \quad K_\tau = \sum_i [K_{\tau i} \cdot V_i/V_0] \\ \alpha_{\tau i} &= K_{\tau i}/(\delta + K_\tau) \cdot V_i/V_0 \\ a &= \delta/(\delta + K_\tau) \cdot l_{QG}/l + \sum_i [\alpha_{\tau i} \cdot l_{QRi}/l] \\ c &= \delta/(\delta + K_\tau) (k/l)^2 + \sum_i [\alpha_{\tau i} l_{QRi} \cdot l_{GRi}/l^2] \\ d &= \sum_i [\alpha_{\tau i} \cdot l_{GRi}/l] \\ e &= l_{QG}/l + F/N \cdot l_{GS}/l \\ f &= l_{QG}/l \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

図-8 は, 直径 $D=9.1$ cm, 長さ $B=103.0$ cm, 自重 $W=3.980$ g, 浮力 $F=6.699$ g, 下端から重心までの距離 $l_{QG}=30.1$ cm, 浮心から重心までの距離 $l_{GS}=19.1$ cm なるアクリルパイプを係留索長 $l=38.5, 42.0, 60.0$ cm として得た実験値を示す。

計算結果は, 上記円柱を4等分して式 (11) から求めた。

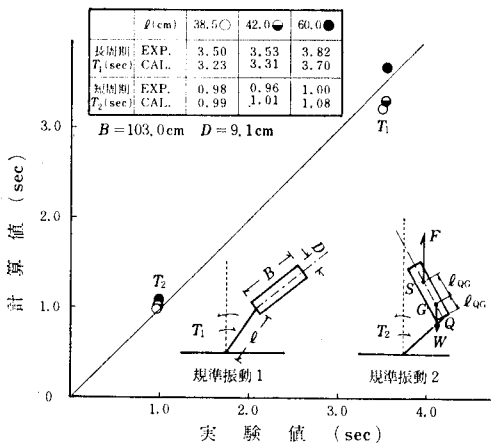


図-8 固有周期の計算値と実験値の比較

5.2 係留索張力

(1) $T \gg T_1$ の場合

波の周期 (T) が固有周期 (T_1) に比べて十分に長いときには, 定常流として取扱うことができ, 式 (1), (2) で $\dot{r}_\tau, \dot{r}_n, \ddot{r}_\tau, \ddot{r}_n$ をゼロと近似することにより次式が得られる。

$$\sin \varphi_{j+1} = \sum_i \left\{ \frac{(f_{\tau i})_{\varphi=\varphi_j}}{N} \frac{l_{QG i}}{l} \right\} \left/ \left(\frac{F}{N} \frac{l_{GS}}{l} - \frac{W}{N} \frac{l_{QG}}{l} \right) \right. \dots\dots\dots (13)$$

そこで, 式 (13) を満たす φ を摂動法で求めれば, 係留の最大索張力 (T_n)_m とその水平分力 (T_H)_{max} は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} (T_n)_m &= N \left(1 + \sum_i [f_{ni}]/N \right) \\ (T_H)_{\max} &= \frac{T_n}{N} \sin \theta \\ &= \frac{\sum_i [f_{\tau i}]}{N} \cos \varphi + \frac{\sum_i [f_{ni}]}{N} \sin \varphi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

(2) $T \ll T_2$ の場合

この場合には, 一般に浮体に働く変動外力は浮体の加速度運動に吸収され, $\varphi, \theta \ll 1$ となるため, 係留の最大索張力 (T_n)_m, とその水平分力 (T_H)_{max} は式 (15) となる。

$$\left. \begin{aligned} (T_n)_m &\doteq N \\ (T_H)_{\max} &\ll \sum_i [(f_{\tau i})_{\varphi=0}]/N \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

(3) 上記 (1), (2) 以外の場合

この場合には, 式 (1) を数値計算する⁴⁾。

図-9, 10 の実験値は次の条件の下で得られた結果である。

[実験条件]

浮体: 円柱 $D=9.1$ cm, $B=130.0$ cm (下端より 53.0 cm までに水を入れる)
自重 $W=3.988$ g
浮力 $F=6.699$ g, $l_{QG}=32.4$ cm

係留索長: $l=60.0$ cm

固有周期: $T_1=3.82$ sec, $T_2=1.0$ sec ($T_0=3.08$ sec)

水槽水深: $h=250.0$ cm

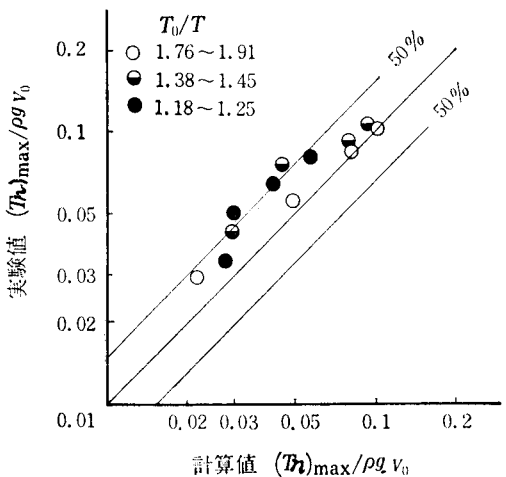
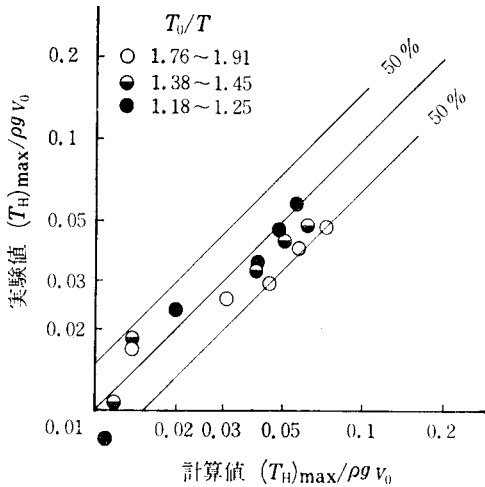


図-9 張力の最大変動値の計算値と実験値の比較 (長柱態)



図—10 最大水平力の計算値と実験値の比較
(長柱態)

波 高 $H=4.2\text{ cm} \sim 38.0\text{ cm}$

周 期 $T=1.615 \sim 2.608\text{ sec}$

計算値は、円柱体を4等分割し、式(1),(2)の諸係数を与えて数値計算を行なった。

係留索張力の最大水平力と最大鉛直力とも計算値はほぼ $\pm 50\%$ 範囲で一致している。

6. あとがき

係留索張力、特にその水平分力は係留浮体の固有周期と密接な関係がある。本文中で指摘できなかったが一般に係留索張力の水平分力は、同一場に固定された浮体に働く流体力の水平分力よりも小さいと考えがちであるが、固有周期よりも長い周期の波の下では前者が後者に比べて大きく、固有周期に近い周期の波の下では非常に大きくなる結果を得た⁵⁾。このことは浮魚礁の設計に際し、係留索張力を推算するとき、特に注意しなければならない。また長柱態浮魚礁の場合、固有周期 T_1 に近い周期の波の下では、係留索張力の測定値は不安定となり、5.2 (3) では十分に説明できなかった。

参 考 文 献

- 1) エリ・ランダウ, イエ・リフシッツ 著, 竹内均訳: 流体力学 1, 東京図書, pp. 33~38, 1970.
- 2) 木村晴保: 浮魚礁係留のための浮体に働く波力と係留張力の基礎的研究, 農土場報第16号, pp. 126~127, 1977.
- 3), 4), 5) 玉木仁志: 波動下に一点係留された柱状態浮魚礁の係留索に生ずる張力の推算について, 東海大学 51 年度卒業研究.