

(1) はじめに

海洋に浮遊する海洋構造物が波によつてどのように運動し、又どのような構造物にすればその運動を小さくすることができるか、という事を明らかにするために各種の浮遊構造物を考えて実験解析してみた。

この種の問題については Buoy の問題で研究した例、浮き防波堤に関連した解析等、物体が運動をしない固定した場合にはバイルに働く波力の問題が解析されている¹⁾。本実験は波による変位ができるだけ小さい浮体、または大型の海洋構造物として利用できるような浮体について考えている。

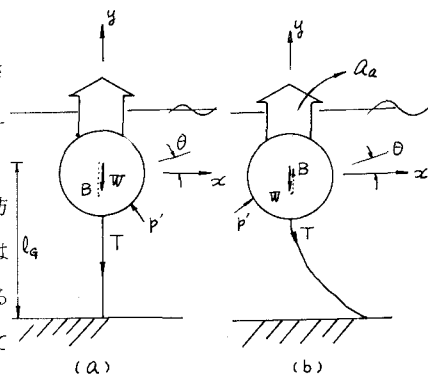


図 - 1

(2) 運動方程式

浮体のアンカーの方法によつてかなり運動の形態が異つてくる可能性があるが、いづれの場合にも共通して扱われる点をまずまとめておく。物体は剛体として運動するものとする。物体のアンカーの方法で a アンカーロープにプレテンションをもたせる場合と b プレテンションのない場合を考え、図 - 1 のように考える。

i) 物体の固有運動方程式 (固有振動方程式)

今物体の運動は 2 次元のとして、波の進行方向に平行な断面内での運動のみを考える。ある種の物体では直角方向の断面内での運動が卓越する事も報告されている²⁾。したがつて図 - 1 に示した x, y, θ の各軸方向の運動を考える。

$$\begin{cases} (M+M')\ddot{y} + R_y\dot{y} + k_y y = 0 \\ (M+M')\ddot{x} + R_x\dot{x} + k_x x = 0 \\ (I+I')\ddot{\theta} + R_\theta\dot{\theta} + k_\theta \theta = 0 \end{cases} \quad (1)$$

M', I' は付加質量と付加質量による慣性モーメントの増加分を表わす。 k_y, k_x, k_θ はそれぞれの軸方向の復元力のバネ定数を示し、(a)(b) の場合で若干異なる。

(a) きつ水線変化による浮力の増減によるもので $k_y = w a_a$

(b) ロープの伸びによるバネ定数

(a) ほとんどなく、最終的にはロープの張力の x 方向成分による復元力 k_x

(b) 方向に変位したときのロープの張力による水平方向成分による復元力によるもので $k_x = \frac{T}{l_g}$

(a) 浮力、重量、傾心、浮心、重心、の関係で決まり $k_\theta = w \cdot T a_l \cdot (I/T - a)$

(b) 浮力、重量、ロープ張力の関係で決まり $k_\theta = B \cdot (a - l_g) + w \cdot l_g$

となる。 R_x, R_y, R_θ は粘性減衰係数であつて、物体の形状、水の粘性によつて決まるため、模型によつてその値を把握することになる。

ii) 波による運動

波による運動は(1)式の右辺に波によるそれぞれの運動の外力を作用させてやれば良い事になる。その場合に種々の考え方ができる。例えば

(イ)物体の運動と波の運動をそれぞれ考え、物体表面での境界条件が合致するように波のポテンシャル解を求める方法。

(ロ)物体は静止した状態にし、その物体の表面の境界条件を満たすポテンシャル解を求める方法。

(ハ)物体は無視した、波のポテンシャル解を使う方法。

等が考えられるが、ある特殊な場合をのぞいて(イ)(ロ)の方法で解を求める事は、非常に複雑になつて解けない場合が多い。そこで(ハ)のような方法をとる事になる。

波のポテンシャルが判つた場合に物体表面に作用している圧力を求め、その各軸方向の合力を求める事になるが、圧力はベルヌイの式より

$$\frac{p}{\rho} = -\frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{g^2}{2} - \Omega + Const. \quad (2)$$

を使い、波に起因する圧力成分を考えるとときには前の2項のみを考えれば良く

$$\frac{p'}{\rho} = -\frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{g^2}{2} \quad (3)$$

但し、 ϕ は波の速度ポテンシャル、 $g^2 = u^2 + v^2$ 、 $u = \partial \phi / \partial x$ 、 $v = \partial \phi / \partial y$ である。

各軸方向の分力は

$$F_x = \oint p_x \cdot dA, \quad F_y = \oint p_y \cdot dA, \quad F_H = \oint p_M \cdot dA \quad (4)$$

但し、 p_x, p_y, p_M は物体表面 dA に働く圧力の x, y 軸方向成分と、その力による重心点を中心とするモーメント成分である。このようにして物体表面について集めると結局、加速度に比例する項と速度の2乗に比例する項がでてくる。

その点を考慮した式に Morison の式がある。

(ニ)質量係数、形状抵抗係数を使った式

$$F = \rho C_M \cdot Vol \cdot \frac{\partial g}{\partial t} + \rho C_D \cdot \frac{g \cdot |g|}{2} \cdot A \quad (5)$$

この場合も、 F として物体の微小部分を考えて物体全体について積分する事を考えなければいけない。 C_M, C_D の値は物体の形状、波の特性等の各種のファクターが、この中に集積された形になっているので、各場合で若干異つた値をとる可能性がある。

物体の運動を考えると(4)又は(5)式による外力を(1)の運動方程式の右辺に作用させて、その方程式の特性及び解を求めれば良い事になる。

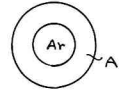
(3) 2、3 の浮遊構造物に対する解折例

(a)アンカーロープにプレテンションのない場合

(i)海中展望塔

図-2のように、円筒形の海洋に浮遊した海中展望塔を考え、これの安定性を実験解折したもので

ある。外力の考え方は(2)~(4)式による方法をとつたが $-\frac{\partial^2}{2}$ の項は無視した扱いをしている。これは K.P.Kerr³⁾ が船の運動解析をした例にならつたものであるが、この場合の解は次式となる。



$$\begin{cases} \frac{y}{H/2} = \frac{sgAF_v}{k_y} \cdot \frac{1}{H_1} \sin(\theta t) \\ \frac{\theta}{(H/2)/L} = \frac{sgAL^2 F_m}{k_\theta} \cdot \frac{1}{H_2} \cos(\theta t) \end{cases}$$

(6)

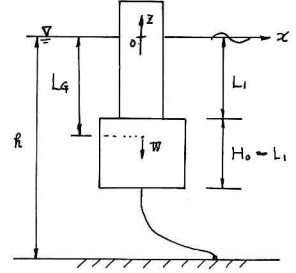


図 - 2

$$\begin{cases} F_v = r + \frac{\cosh k(h-L_1)}{\cosh k \cdot h} (1-r) - \frac{\cosh k(h-H_0)}{\cosh k \cdot h} \\ F_m = \frac{\sinh k(h-H_0)}{\cosh k \cdot h} \left(\frac{H_0}{L} + \frac{L_g}{L} + \frac{1}{2\pi} \right) - (1-r) \frac{\sinh k(h-L_1)}{\cosh k \cdot h} \end{cases}$$

$$\times \left(\frac{L_1}{L} + \frac{L_g}{L} + \frac{1}{2\pi} \right) - r \left(\frac{L_g}{L} + \frac{1}{2\pi} \right)$$

$$r = \frac{Ar}{A}$$

L 波長 k 水深

H₁, H₂ 応答関数の分母

$$\theta = 2\pi/T$$

$$k = 2\pi/L$$

この浮体の場合、波によつてアンカロープの限度まで引張られて、そこで鉛直、回転運動をする事になり、水平運動は長周期波以外では生じない。実験値はストロボ撮影により、その写真より各方向の運動の大きさを求めた。その結果と理論値の比較が図-3である。かなり実験値が散ばつており、余り良い相関を示していないが実験値に微小振巾波にならない波が含まれている事と、理論解析に 項に相当するものしか入っていない点で、まだ問題が残されている。

この場合のストロボ写真及び模型値に関する各種の値は表-1のようになっている。

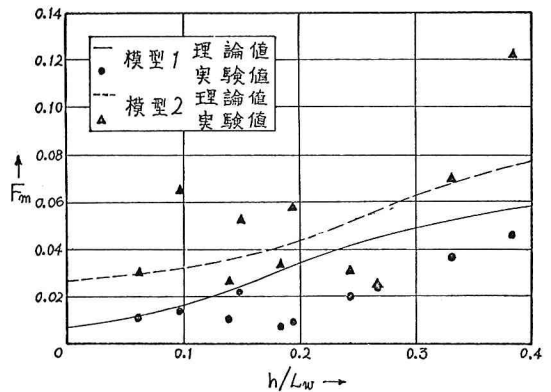
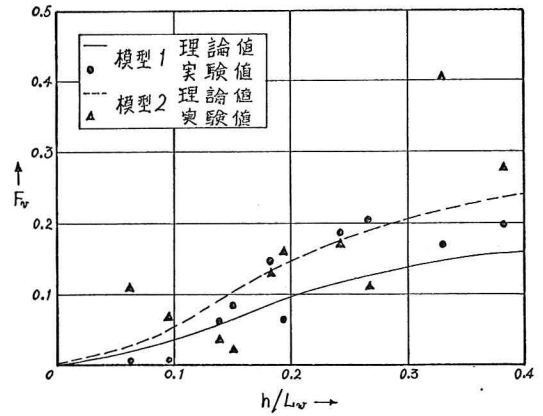
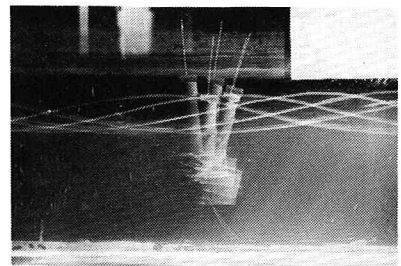


図 - 3

	Model 1	Model 2
Ar/A	0.0476	0.173
H cm	12.9	12.2
L cm	8.3	8.0
Lg cm	11.3	10.0
M g	375	456
I g·cm	2668	2973

表 - 1

写真 - 1



ii) 大型ポンツーン 4)

海上作業台又は海上小都市用の浮子用として考えた大型のポンツーンの解析である。模型は図-4に示すごとく円筒型浮子をもつものである。アンカーの方法としては前後2点とする事にし、模型では弱い板バネによつてアンカーしている。このときの運動の解は次式で示される。

$$\frac{y}{(H/2)} = \frac{Y_1 \cdot \cos k\ell/2}{H_{y1}} \sin(\omega t - \varphi_{y1}) + \frac{Y_2 \cdot \cos k\ell/2}{H_{y1}} \cos(\omega t - \varphi_{y1})$$

$$+ \frac{Y_3}{H_{y3}} \cos(3\omega t - \varphi_{y3}) + \frac{Y_5}{H_{y5}} \cos(5\omega t - \varphi_{y5}) + \dots \quad (7)$$

$$\frac{x}{(H/2)} = \frac{X_1 \cos(k\ell/2) \cdot (\omega \pi d^2 / kx)}{H_{x1}} \cos(\omega t - \varphi_{x1})$$

$$+ \frac{X_2 \cos(k\ell/2) \cdot (\omega d H / kx) \cdot (4\cos/3\pi)}{H_{x1}} \sin(\omega t - \varphi_{x1})$$

$$+ \frac{X_3}{H_{x3}} \sin(3\omega t - \varphi_{x3}) + \dots \quad (8)$$

$$\frac{\theta}{(H/2L)} = \frac{\theta_1 \sin(k\ell/2) \cdot \ell x g \cdot L / k_0 (\frac{I}{V} - a)}{H\theta_1}$$

$$\times \cos(\omega t - \varphi_{\theta 1}) + \frac{\theta_2 \cdot \cos(k\ell/2) \cdot \ell x g \cdot L / k_0 (\frac{I}{V} - a)}{H\theta_1}$$

$$\times \sin(\omega t - \varphi_{\theta 1}) + \frac{\theta_3}{H\theta_1} \cdot \sin(\omega t - \varphi_{\theta 1})$$

$$+ \frac{\theta_5}{H\theta_3} \sin(3\omega t - \varphi_{\theta 3}) + \dots \quad (9)$$

$Y_1, Y_2, \dots, X_1, X_2, \dots, \theta_1, \theta_2, \dots$, 無次元振幅

$\omega = 2\pi/T$, L 波長 H 波高

さらに $H_{y1}, H_{y2}, \dots, \varphi_{y1}, H_{x1}, H_{x2}, \dots, \theta_1, \theta_2, \dots, \varphi_{\theta 1}$ は応答関数と位相のづれで、それぞれ次のようになる。

$$\frac{1}{H_{ji}} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{i\omega}{\omega_{jn}}\right)^2\right]^2 + \left[\frac{2\gamma}{\omega_{jn}} \cdot \frac{i\omega}{\omega_{jn}}\right]^2}} \quad (10)$$

$$\tan \varphi_{ji} = \frac{2\gamma i\omega}{\omega_{jn}^2 - (i\omega)^2}$$

$j: y, x, \theta, \quad i = 1, 2, 3$

これらの解の中の共通項を無次元化して、グラフに示すと図-5のものとなる。これらは $k\ell/L$ と k_0/k をパラメーターとして示し

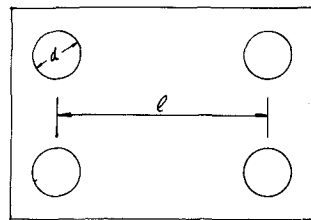


図 - 4

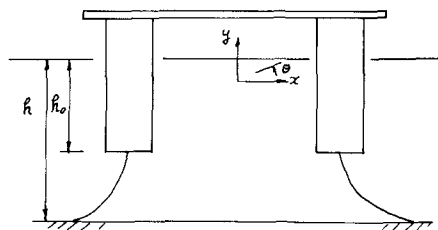
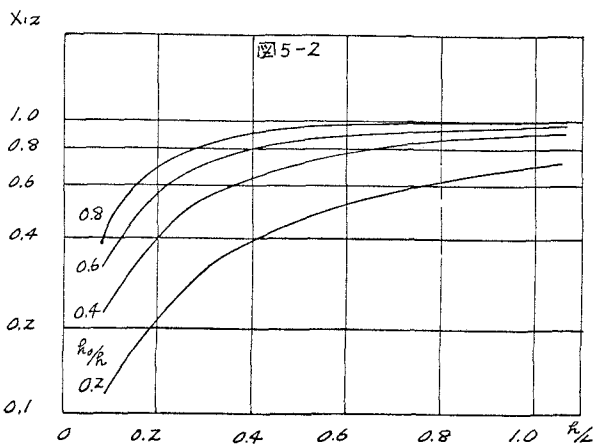
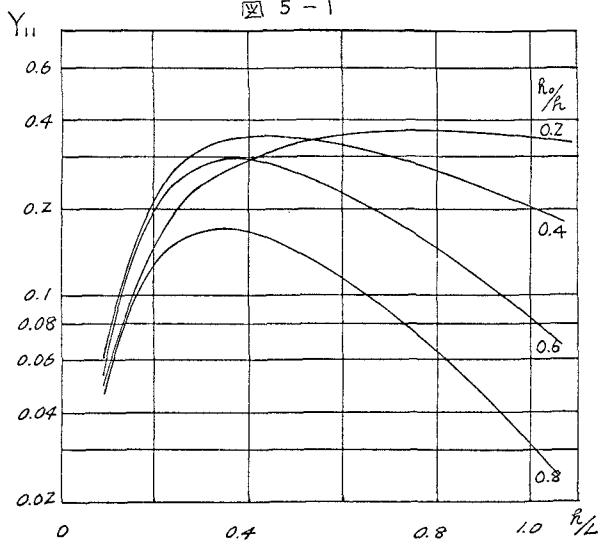


図 5-1



てあり、それぞれの動きを支配する波に対する特性がわかる。又これらの式から判るごとく波長と浮子間長の間には鉛直運動、水平運動は $\cos(\pi \ell/L)$ 、回転運動は $\sin(\pi \ell/L)$ (水平方向力より鉛直力の方が大きいとして) に支配されている。図-5からも判るごとく水平運動は浮子の深さが深い程、鉛直方向は浅い程その動きが大きい事が判る。

$$\begin{cases} Y_1 = Y_{11} + Y_{12}, & Y_{12} = -1 \\ Y_{11} = C_{11} R h_0 \frac{\sinh k(h-h_0)}{\cosh k h} \\ Y_{12} = -\frac{R H}{3\pi} \tanh k h \left[\frac{\sinh k(h-h_0)}{\sinh k h} \right]^2 \\ Y_3 = -\frac{Y_2}{5} \frac{\cos(3k\ell/2)}{\cos(k\ell/2)} \\ Y_5 = -\frac{Y_2}{35} \frac{\cos(5k\ell/2)}{\cos(k\ell/2)} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} X_1 = X_{11} + X_{12}, & X_{11} = 4R h_0 / \pi \\ X_{12} = C_{12} \tanh k h \left[1 - \frac{\sinh k(h-h_0)}{\sinh k h} \right] \\ X_2 = \tanh k h \cdot \left\{ R h_0 + \sinh k h \cdot \cosh k h \right. \\ \quad \left. - \sinh k(h-h_0) \cdot \cosh k(h-h_0) \right\} / (\sinh k h)^2 \\ X_3 = -\frac{X_2}{5} \frac{\cos(3k\ell/2)}{\cos(k\ell/2)} \\ X_5 = -\frac{X_2}{35} \frac{\cos(5k\ell/2)}{\cos(k\ell/2)} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \theta_1 = Y_{11} - Y_{12}, & \theta_2 = X_2 \\ \theta_3 = \frac{L}{h_0(I_A - a)} \cdot (\ell_{2g} \cdot Y_2 + \ell_{2g} \cdot X_2 \cdot \frac{H}{d} \cdot \frac{4G}{3\pi^2}) \\ \vdots \\ k = 2\pi/L \end{cases} \quad (13)$$

この解析を確認するために実験をした結果の一部より、その特性をまとめてみた。運動の記録はポンツーンの前、後端につけた板バネの変位をペン書きオツシロに記録させる方法をとった。固有振動の実験及び、余備実験より模型、波の特性は次のようになっている事がわかった。又 A 波は水平運動、D 波は鉛直運動、F 波は回転運動の共振点附近に相当

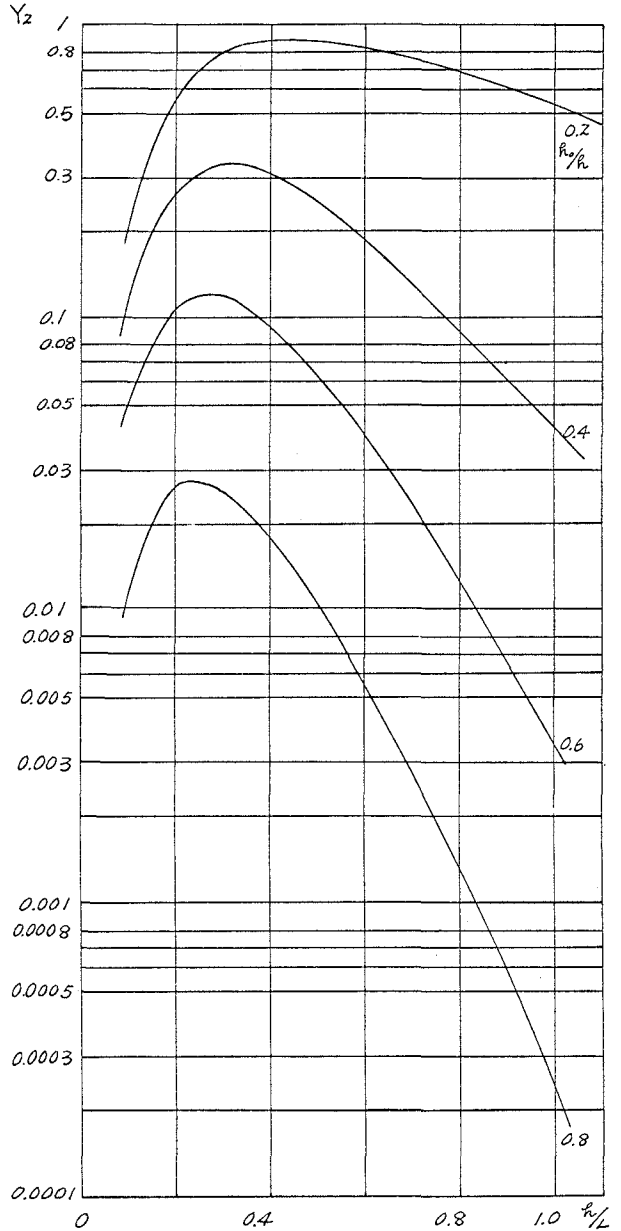
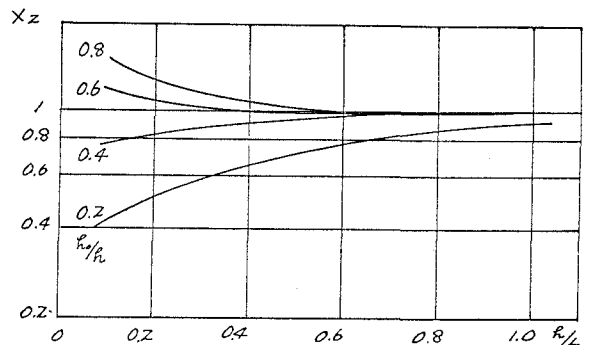


図5-3 ↑

図5-4 ↓



している。図-5-6は前端、後端の鉛直運動の振巾を波高、波長、浮子間長で無次元化して共振曲線を求めたものであるが、その傾向を示しているが線型の応答曲線（図中の実線で $\delta/\omega_m = 0.1$ に相当）とはずれている。

これらの実験 Data を使つて、先の理論解析中に含まれる C_M, C_D の値を求めると表-2のごとくなっている。この表には鉛直、水平運動からの値を示してある。理論解析の式からも判るごとく C_M, C_D 項の間には 90° の位相のずれがある点から、実験値についてその支配度を求めると表中の $y_{cm}, y_{cd}, x_{cm}, x_{cd}$ のごとくなる。なおこれらは波高で無次元化してある。

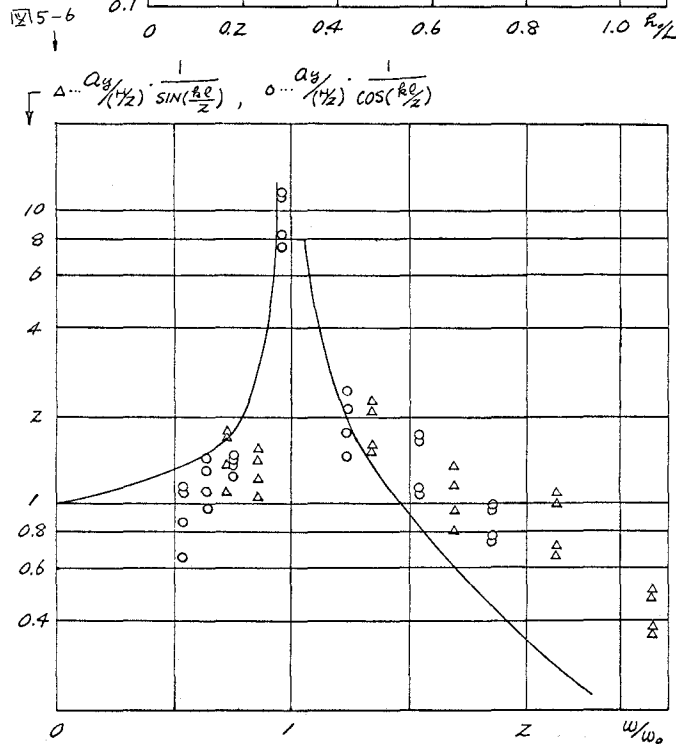
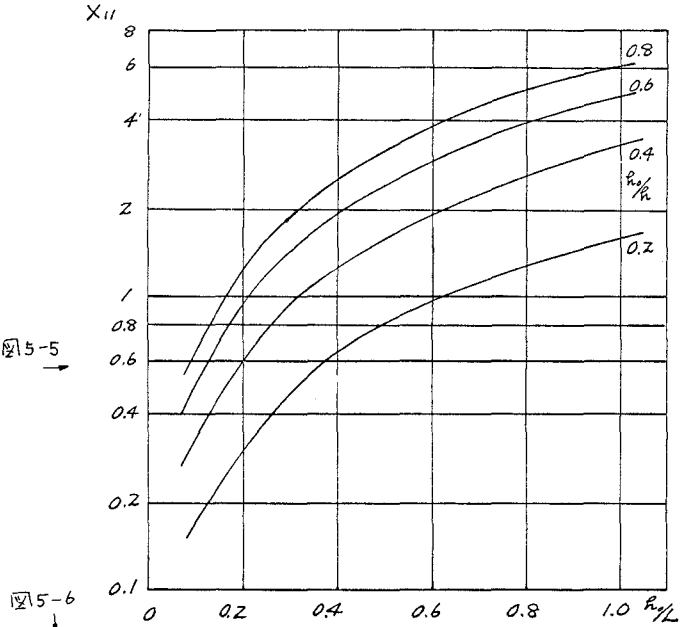
鉛直運動では波長の長い所では C_M 項が大きくなっている。又水平、回転運動でも顕著ではないが同様な傾向はある。

もう一つ大きな問題は共振点付近ではその共振運動が大きくなって、他の方向の運動が消えてしまう事である。例へば、D波の場合、鉛直運動は浮子間長、波長の関係ではほとんどなくなつて回転運動が大きくなるはずであるが、実際には鉛直運動の共振点のため鉛直運動になつてしまつている。

ここに示したデータはかなり散ばつてはいるが、まだとりまとめ中の一部より顕著なものだけをひろつたものである。現在他のデータ及び安定板をつけた場合のものもとりまとめている。

(b) アンカーロープにプレテンションのある場合

このタイプのは円筒形浮子をもつ写真-1、球形浮子をもつ写真-2について実験解析してみた。これらはいずれも浮子部分が水中に沈んだ Submerged Buoy System に属する。ここに示すのは写真-2のもので、解析方法としては(5)式による波力値を各部分にわたつて求め、それを合成することによつて運動外力を求め運動方程式をといた。



その場合、図-6で柱の部分の力が球の部分の力に比して小さいので無視した結果は次式のごとくなる。

$$\frac{x}{(H/2)} = \frac{1}{H_1} \cdot \frac{1}{R_x} \cdot [A_1 \cos(\Omega t - \varphi) - A_2 \sin(\Omega t - \varphi)]$$

$$\frac{\theta}{(H/2L)} = \frac{1}{H_1} \cdot \frac{1}{R_\theta} \cdot [B_1 \cos(\Omega t - \varphi) + B_2 \sin(\Omega t - \varphi)]$$

$$A_1 = -C_M S \pi \frac{\Omega^2}{\sinh R R} \int_{l_a}^{l_a + 2r} (y^2 + 2l_s y + r^2 - l_s^2) \cdot \cosh R (R - y) dy$$

$$A_2 = \frac{C_D S r^2}{3} \left(\frac{H}{2}\right) \cdot \Omega^2 \left(\frac{\cosh R S}{\sinh R R}\right)^2$$

$$B_1 = -C_M S \Omega^2 L \cdot \frac{4\pi r^3}{3} \cdot \frac{\cosh R S}{\sinh R R}$$

$$B_2 = C_D S \pi r^2 \frac{4LL}{3\pi} \cdot \left(\frac{H}{2}\right) \Omega^2 \left(\frac{\cosh R S}{\sinh R R}\right)^2$$

実験値の解析は、やはりストロボにより写真撮影して、それより運動を解析した。(写真-2)すなわち重心点の水平運動、回転運動を座標値として求め、それより振巾を決定した。 C_M 項、 C_D 項のききぐあいについては(a)(ii)で行なつたような方法で決定しなければいけないが、上式の A_1, A_2, B_1, B_2 の値を求めると C_M 項の方がかなり大きいので C_M 項のみを考えて、実験値より C_M の値を求めたのが表-3である。これからも判るごとく C_M の値がかなり散ばっている事と、水平運動、回転運動より求めた値にかなりの差がある。

この事は C_D 項を無視してはいけないのか、外力のとり方に工夫をしなければいけない、実験方法の問題等があり、今後ともつと研究を進めなければいけないと考えている。

(4) おわりに

以上にまとめたものは、いずれも現在研究を進めているもので、ここに示したデータ等はその中間段階でのまとめと考えていただきたい。現在のところ波力のとり方についての研究が主であるが、今後この種の構造物で、安定度を増すにはどのようにすべきか、又ランダムな波の場合にはどうなるか等の問題についても取りくむ事になつている。

これらの実験は、いずれも東洋大学工学部において行なつたもので、実験に参加した、比企三蔵(S 46年修士)、青柳進(S 45年)、江森担也、安藤裕司、三浦晴男(S 46年)の諸君に感謝する。

参考文献

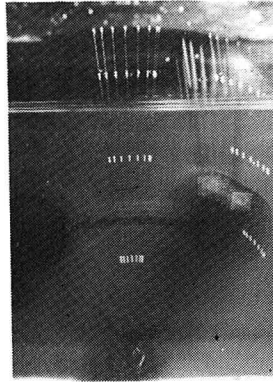


写真-1

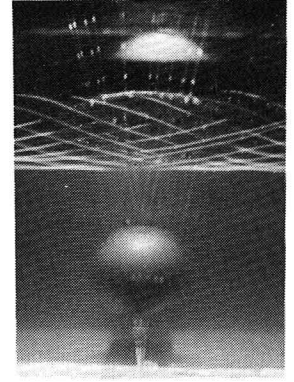
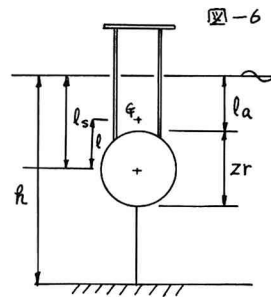


写真-2

表-3

T	0.68		1.0		1.60	
Model	Cmx	Cmθ	Cmx	Cmθ	Cmx	Cmθ
1	3.08	2.80	1.13	1.70	1.27	2.37
2	2.27	2.42	0.78	1.30	1.25	2.74
3	2.06	2.28	0.62	1.17	1.18	3.00



r = 5 cm
h = 30 cm
l_a = 10 cm
l_s = 15 cm
s = 15 cm

M = 83 g (1)
M = 133 g (2)
M = 183 g (3)

1) 水理公式集 (昭和46年版) P 522 水中及び水面上の物体に作用する波力

Buoy Technology, 1964, Buoy Technology Symposium *

Transactions 2nd International Buoy Technology Symposium (1967)

岩垣雄一「波浪に対する構造物の動的応答」1971年度水工学に関する夏期研修会備義集 B

P B - 2 - 1

2) 椎貝博美、河野二夫「波動による球の振動」第15回海岸工学講演会 (1968) P 97

河野二夫「波の進行に直角水平方向の球の振動」土木学会論文報告集第179号 P 49 ~ 60

3) K.P.Kerr "Stability characteristics of Various Buoy Configuration" *の文献 P.5

4) 本間 仁、荻原国宏「大型ボンツーンの運動」第18回海岸工学講演会論文集 (1971) P181

		A	B	C	D	E	F	G	
L		26.2	45.8	103.2	141.6	188.7	242.7	318.7	cm
T		0.55	0.66	0.82	1.04	1.30	1.56	1.92	sec
y	cm	0.78	0.35	0.59	1.30	0.35	0.40	0.64	
y	ed	0.17	0.46	0.38	1.35	0.04	0.03	0.05	
x	cm	0.12	0.10	0.01	0.28	0.04	0.11	0.06	
x	ed	0.06	0.04	0.01	0.17	0.03	0.02	0.02	
y	Cm	1.5	1.8	5.1	1.5	1.9	2.1	1.4	
	Cd	0.11	0.08	0.02	0.08	0.003	0.002	—	
x	Cm	3.45	2.38	2.19	0.70	1.96	0.04	0.32	
	Cd	72.5	66.2	12.9	242.9	30.6	138.7	87.7	

表-2

$$l = 67 \text{ cm} \quad d = 11.4 \text{ cm} \quad h = 30.5 \text{ cm} \quad h_0 = 24.0 \text{ cm}$$

$$M = 10207 \text{ g} \quad I = 25.0 \cdot 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}$$

$$\omega n\theta = 4.48 \text{ 1/sec} \quad \omega n\gamma = 6.13 \text{ 1/sec} \quad \omega n\alpha = 11.9 \text{ 1/sec}$$

$$\zeta\theta = 0.098 \quad \zeta\gamma = 0.114 \quad \zeta\alpha = 1.096$$

$$Cm\theta = 1.18 \quad Cm\gamma = 0.17 \quad Cm\alpha = 0.69$$