

浮遊物体(構造物)の波による水平移動運動について

本 間 仁*・荻 原 国 宏**

1. はじめに

筆者らは、浮遊海上構造物のアンカーのある場合、ない場合等についていくつかの実験研究をして来た^{4)~7)}。アンカーのない場合については、第20回海岸工学講演会において理論解析について発表している¹⁾。その後、この問題について模型実験をしたところ、その理論解析では説明のつかない現象が表われていることに気付いた。すなわち、波は微小振幅波と考えても良いにもかかわらず、浮遊物体は、かなりの速度で波の進行方向に輸送されている。

一般に微小振幅波のような線形波では質量輸送の現象はないとされているが³⁾、この実験結果においては物体は輸送されている。本論文は物体の運動(振動)と波との関係によっては、このような現象が生ずることを示したものである。

2. 理論解析

(1) 運動方程式

図-1のごとく浮子と水中物体が連結されている構造物を考えると静的なつり合い状態では

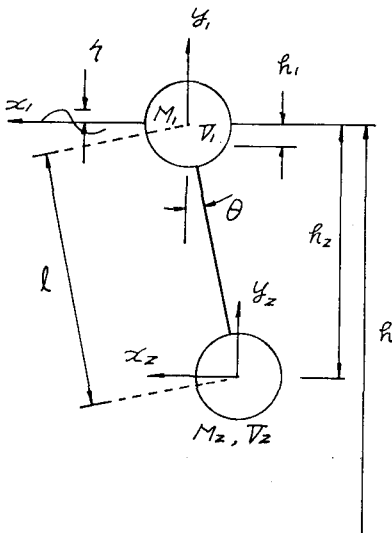


図-1

$$T = (M_2 g - \rho V_2 g) = (\rho V_1 g - M_1 g) \dots \dots \dots (1)$$

となる。 T は連結ワイヤに働いている張力である。いまワイヤはいつでも直線状をなす場合を考えると、座標 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) の間には

$$\left. \begin{aligned} x_1 - x_2 &= l \sin \theta \\ y_1 - y_2 &= l \cos \theta \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

の関係がある。次に各物体に波力が作用したときの運動方程式を作ると次のごとくなる。

$$\left. \begin{aligned} (M_1 + \rho V_1 C_{M1x}) \ddot{x}_1 + R_{1x} \dot{x}_1 + (M_2 + \rho V_2 C_{M2x}) \ddot{x}_2 \\ + R_{2x} \dot{x}_2 &= \rho V_1 C_{M1x} \frac{\partial u_1}{\partial t} + \rho V_2 C_{M2x} \frac{\partial u_2}{\partial t} \\ (M_1 + \rho V_1 C_{M1y}) \ddot{y}_1 + R_{1y} \dot{y}_1 + \rho g A_1 y_1 \\ + (M_2 + \rho V_2 C_{M2y}) \ddot{y}_2 + R_{2y} \dot{y}_2 \\ &= \rho V_1 C_{M1y} \frac{\partial v_1}{\partial t} + \rho V_2 C_{M2y} \frac{\partial v_2}{\partial t} \\ (M_2 + \rho V_2 C_{M2\theta}) \ddot{\theta} + R_{2\theta} \dot{\theta} + (M_2 g - \rho V_2 g) l \theta \\ &= -\rho V_2 C_{M2x} \frac{\partial u_2}{\partial t} \cdot l + \rho V_2 C_{M2y} \frac{\partial v_2}{\partial t} \cdot l \theta \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

M_1, M_2 は浮子および水中物体の質量、 V_1, V_2 はそれぞれの水中部分の体積、 ρ は水の密度、 $C_{M1x} \dots C_{M2\theta}$ は付加質量係数であり、 u_1, v_1, u_2, v_2 はそれぞれの物体の図心点に対応する波の波速を示す。式(3)の導びき方は、それぞれの物体の水平、鉛直方向の運動方程式を作り連結網の張力を消去して導びいている。さて回転運動が微小とすれば式(2)で $\sin \theta \approx \theta$ 、 $\cos \theta \approx 1$ とおけるので $x_2 = x_1 - l\theta$ 、 $dy_1 = dy_2$ となる。これを式(3)に代入して整理すれば、 x_1, y_1 については

$$\left. \begin{aligned} [(M_1 + \rho V_1 C_{M1x}) + (M_2 + \rho V_2 C_{M2x})] \ddot{x}_1 \\ + (R_{1x} + R_{2x}) \dot{x}_1 &= (M_2 + \rho V_2 C_{M2x}) l \ddot{\theta} \\ + R_{2x} l \dot{\theta} + \rho V_1 C_{M1x} \frac{\partial u_1}{\partial t} + \rho V_2 C_{M2x} \frac{\partial u_2}{\partial t} \\ [(M_1 + \rho V_1 C_{M1y}) + (M_2 + \rho V_2 C_{M2y})] \ddot{y}_1 \\ + (R_{1y} + R_{2y}) \dot{y}_1 + \rho g A_1 y_1 &= \rho V_1 C_{M1y} \frac{\partial v_1}{\partial t} \\ + \rho V_2 C_{M2y} \frac{\partial v_2}{\partial t} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

となる。また波については

* 正会員 工博 東洋大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 東洋大学助教授 工学部土木工学科

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \frac{H}{2} \sin kct, \quad kc = \sigma \\ \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{H}{2} (kc)^2 \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \cos kct \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{H}{2} (kc)^2 \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \sin kct \end{aligned} \right\} \dots\dots (5)$$

となる。 x 座標の位置の相違による位相のずれは無視している。ここで式を扱いやすいように次のようなパラメーターを導入する。

$$\left. \begin{aligned} \frac{R_{ij}}{(M_i + \rho V_i C_{Mij})} &= 2\tilde{\gamma}_{ij}, \quad \frac{M_2 + \rho V_2 C_{M2j}}{M_1 + \rho V_1 C_{M1j}} = \bar{\alpha}_j, \\ \frac{\rho V_i C_{Mij}}{M_i + \rho V_i C_{Mij}} &= \tilde{f}_{ij}, \quad \frac{\rho g A_1}{(M_1 + \rho V_1 C_{M1j})} = \bar{n}_{1j}^2, \\ \frac{(M_2 g - \rho V_2 g)}{(M_2 + \rho V_2 C_{M2\theta})} &= n_{2\theta}^2, \\ \frac{R_{2\theta}}{(M_2 + \rho V_2 C_{M2\theta})} &= 2\tilde{\gamma}_{2\theta}, \quad \frac{\rho V_2 C_{M2x}}{M_2 + \rho V_2 C_{M2\theta}} = \tilde{f}_{2x}, \\ \frac{\rho V_2 C_{M2y}}{M_2 + \rho V_2 C_{M2\theta}} &= \tilde{f}_{2y} \end{aligned} \right\} \dots\dots (6)$$

$i=1, 2, \quad j=x, y$

さらに式(5)をも考慮して次のパラメーターを考えると運動方程式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{2\tilde{\gamma}_{1j} + 2\tilde{\gamma}_{2j} \cdot \alpha_i}{1 + \alpha_j} &= 2\gamma_{1j}, \quad \alpha_1 = \frac{\alpha_x l}{1 + \alpha_x}, \\ \alpha_2 &= \frac{2\tilde{\gamma}_{2x} \alpha_x l}{1 + \alpha_x}, \quad \frac{\bar{n}_{1y}^2}{1 + \alpha_y} = n_{1y}^2, \\ f_{ij} &= \frac{\tilde{f}_{ij}}{1 + \alpha_j} \cdot \frac{H\sigma^2}{2} \cdot \frac{1}{\sinh kh} \cdot [\delta_{xj} \cosh k(h-h_i) \\ &\quad + \delta_{yj} \sinh k(h-h_i)] \cdot [\delta_{1i} + \alpha_j \cdot \delta_{2i}] \end{aligned} \right\} \dots\dots (7)$$

$\delta_{xj} \dots \delta_{2i}$ はクロネッカーのデルタ,

$$\left. \begin{aligned} i &= 1, 2, \quad j = x, y \\ \ddot{x}_1 + 2\gamma_{1x} \dot{x}_1 &= \alpha_1 \ddot{\theta} + \alpha_2 \ddot{\theta} + (f_{1x} + f_{2x}) \cdot \cos \sigma t \\ \ddot{y}_1 + 2\gamma_{1y} \dot{y}_1 + n_{1y}^2 y &= (f_{1y} + f_{2y}) \sin \sigma t \\ \ddot{\theta} + 2\gamma_{2\theta} \dot{\theta} + n_{2\theta}^2 \theta &= -f_{2x} \cdot \frac{1}{l\alpha_x} \cos \sigma t \\ &\quad + f_{2y} \cdot \frac{1}{l\alpha_y} \cdot \theta \cdot \sin \sigma t \end{aligned} \right\} \dots\dots (8)$$

この式(8)の3つの式を連立にとけば良いが、第3式の外力項の第2項は微小振動を考えると第1項に比して無視してよいと考えられる。

(2) 運動方程式の解

式(8)の第2, 3式は、いずれも強制振動の式である。第1式は θ と y の運動の影響を受ける。 y の項はこの式の表面には表われていないが、 f_{1x} の中にその影響が入っていることは図-2をみればわかる。すなわち上段の図は波の大きさより浮子の動きが小さい場合、下段の

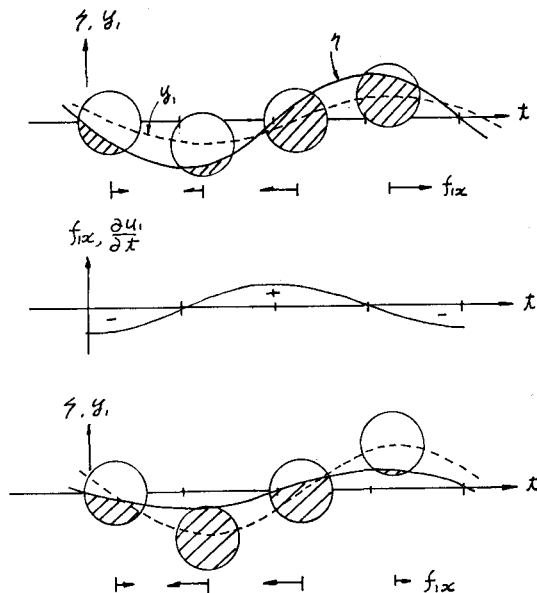


図-2

図は浮子の動きが大きい場合である。特の下段の図において顕著のように f_{1x} の(+)方向と(-)方向に働いている力の大きさに差が生じてくる。これは振幅の大きさとともに波と浮体の運動の位相のずれが支配要因になっていることがわかる。このことを考えると浮子の水中体積は

$$V_1 = V_{10} + A_1(\eta - y_1) \dots\dots (9)$$

と書け、また f_{1x} は

$$f_{1x} = f_{1x0} + f'_{1x} \cdot (\eta - y_1) = f_{1x0} \left[1 + \frac{A_1}{V_{10}} (\eta - y_1) \right] \dots\dots (10)$$

となり、 f_{1x0} は式(7)において $V_1 = V_{10}$ とおいた値であり、 f'_{1x} は

$$f'_{1x} = f_{1x0} \cdot \frac{A_1}{V_{10}} \dots\dots (11)$$

である。

次に式(8)の解を求めることにする。 y_1, θ については減衰振動系に強制外力の働いた場合の方程式であるので、解は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \frac{(f_{1y} + f_{2y})}{\sqrt{(n_{1y}^2 - \sigma^2)^2 + 4\gamma_{1y}^2 \sigma^2}} \cdot \sin(\sigma t - \varphi_y), \\ \tan \varphi_y &= \frac{2\gamma_{1y} \sigma}{n_{1y}^2 - \sigma^2} \\ \theta &= -\frac{f_{2x}}{l\alpha_x} \cdot \frac{1}{\sqrt{(n_{2\theta}^2 - \sigma^2)^2 + 4\gamma_{2\theta}^2 \sigma^2}} \cos(\sigma t - \varphi_\theta), \\ \tan \varphi_\theta &= \frac{2\gamma_{2\theta} \sigma}{n_{2\theta}^2 - \sigma^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots (12)$$

y_1, θ が求まったので次に x_1 の解を求めることにする。そこで x の外力項を求めてみる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 \ddot{\theta} + \alpha_2 \dot{\theta} &= \frac{f_{2x}}{l\alpha_x} \frac{1}{\sqrt{(n_{2\theta}^2 - \sigma^2)^2 + 4\gamma_{2\theta}^2 \sigma^2}} \\ &\times [\alpha_1 \sigma^2 \cos(\sigma t - \varphi_\theta) + \alpha_2 \sigma \sin(\sigma t - \varphi_\theta)] \\ (f_{1x} + f_{2x}) \cos \sigma t &= (f_{1x_0} + f_{2x}) \cos \sigma t \\ f_{1x_0} \frac{A_1}{V_{10}} (\eta - y_1) \cos \sigma t &= f_{1x_0} \frac{A_1}{V_{10}} \\ &\times \left[\frac{H}{2} \sin \sigma t - \frac{(f_{1y} + f_{2y})}{\sqrt{(n_{1y}^2 - \sigma^2)^2 + 4\gamma_{1y}^2 \sigma^2}} \right. \\ &\left. \times \sin(\sigma t - \varphi_y) \right] \cdot \cos \sigma t \end{aligned} \right\} (13)$$

式(13)の最後の式は次のごとく書きなおせる。

$$\begin{aligned} f_{1x_0} \frac{A_1}{V_{10}} (\eta - y_1) \cos \sigma t &= \frac{f_{1x_0} A_1}{V_{10}} \\ &\times \left[\left(\frac{H}{2} - \frac{f_{1y} + f_{2y}}{\sqrt{(n_{1y}^2 - \sigma^2)^2 + 4\gamma_{1y}^2 \sigma^2}} \cdot \cos \varphi_y \right) \frac{\sin 2\sigma t}{2} \right. \\ &+ \frac{f_{1y} + f_{2y}}{\sqrt{(n_{1y}^2 - \sigma^2)^2 + 4\gamma_{1y}^2 \sigma^2}} \sin \varphi_y \frac{\cos 2\sigma t}{2} \\ &\left. + \frac{f_{1y} + f_{2y}}{\sqrt{(n_{1y}^2 - \sigma^2)^2 + 4\gamma_{1y}^2 \sigma^2}} \sin \varphi_y \cdot \frac{1}{2} \right] \dots\dots (14) \end{aligned}$$

結局これらの式をまとめると、 x 方向の運動の外力項は次のごとくなる。

$$F_x = A \sin \sigma t + B \cos \sigma t + C \sin 2\sigma t + D \cos 2\sigma t + D \dots\dots\dots (15)$$

A, B, C, D, E はそれぞれ式(13), (14)より次のごとく求まる。

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{f_{2x}}{l\alpha_x} \frac{1}{\sqrt{(n_{2\theta}^2 - \sigma^2)^2 + 4\gamma_{2\theta}^2 \sigma^2}} \\ &\times (\alpha_1 \sigma^2 \sin \varphi_\theta + \alpha_2 \sigma \cos \varphi_\theta) \\ B &= \frac{f_{2x}}{l\alpha_x} \frac{1}{\sqrt{(n_{2\theta}^2 - \sigma^2)^2 + 4\gamma_{2\theta}^2 \sigma^2}} \\ &\times (\alpha_1 \sigma^2 \cos \varphi_\theta - \alpha_2 \sigma \sin \varphi_\theta) + (f_{1x_0} + f_{2x}) \\ C &= \frac{f_{1x_0} A_1}{2V_{10}} \left[\frac{H}{2} - \frac{f_{1y} + f_{2y}}{\sqrt{(n_{1y}^2 - \sigma^2)^2 + 4\gamma_{1y}^2 \sigma^2}} \cos \varphi_y \right] \\ D &= \frac{f_{1x_0} A_1}{2V_{10}} \left[\frac{f_{1y} + f_{2y}}{\sqrt{(n_{1y}^2 - \sigma^2)^2 + 4\gamma_{1y}^2 \sigma^2}} \sin \varphi_y \right] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

式(8)は線形方程式であるので式(15)の各項の解の和を求めれば良いことになる。

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{1}{\sqrt{\sigma^2 + 4\gamma_{1x}^2}} \cdot \frac{1}{\sigma} \\ &\times [-A \cos(\sigma t - \varphi_{x1}) + B \sin(\sigma t - \varphi_{x1})] \\ &+ \frac{1}{\sqrt{\sigma^2 + \gamma_{1x}^2}} \cdot \frac{1}{4\sigma} \cdot [-C \cos(2\sigma t - \varphi_{x2}) \\ &+ D \sin(2\sigma t - \varphi_{x2})] + \frac{D}{2\gamma_{1x}} t + E \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

ただし

$$\tan \varphi_{x1} = \frac{\sigma}{2\gamma_{1x}}, \quad \tan \varphi_{x2} = \frac{\sigma}{\gamma_{1x}} \dots\dots\dots (18)$$

である。式(17)の積分定数 E は初期条件の与え方によ

って $E=0$ とおける。この式をみると x 方向の運動は波の周期をもつ往復運動, その半分の周期をもつ運動, 移送される運動の3つより成立っていることがわかる。

(3) 浮子の水平移送速度について

浮子の水平移送速度 U は式(17)より $\frac{dx_1}{dt}$ として往復成分をのぞけば求めることができる。すなわち

$$\begin{aligned} U &= D/2\gamma_{1x} \\ &= \frac{f_{1x_0} A_1}{4\gamma_{1x} \cdot V_{10}} \cdot \frac{f_{1y} + f_{2y}}{\sqrt{(n_{1y}^2 - \sigma^2)^2 + 4\gamma_{1y}^2 \sigma^2}} \cdot \sin \varphi_y \end{aligned} \dots\dots\dots (19)$$

この式の間項が y 方向の振動の振幅(a_y)を与えていることを考慮して f_{1x_0} を式(6), (7)を使って書きなおすと,

$$\begin{aligned} U &= \frac{A_1}{4\gamma_{1x}} \cdot \frac{\rho C_{M1x}}{(M_2 + \rho V_2 C_{M2x} + M_1 + \rho V_1 C_{M1x})} \\ &\cdot \frac{H\sigma^2}{2} \cdot \frac{\cosh k(h-h_1)}{\sinh kh} \cdot a_y \cdot \sin \varphi_y \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

となる。

3. 模型実験

実験は径の大きさの異なる3種のプラスチック球を用いて行い, 球径の最大のもの A を浮子とし他の2種 B, C を水中物体とし, 連結するくさりの長さ l を3種類かえて6種の模型を考えた。これに上球(A)のきつ水深を2種, 波を3種類かえることにより, 実験ケースは36種類行ったことになる。観測は8mm撮影機によって撮影したフィルムをプロジェクターによって映写して, 浮子および水中球に付けられたマーカーの座標を読みとることによりデータを得た。実験条件の諸元は表—1のごとくなっている。

表—1

	A	B	C
直径 cm	11.95	10.14	6.47
体積 cm ³	893.65	545.62	141.74
質量 g	149.38	72.50	23.08

くさりの長さ l

$$l_1 = 5 \text{ cm}, \quad l_2 = 9 \text{ cm}, \quad l_3 = 12 \text{ cm}$$

波の条件

	$\bar{B}$	$\bar{C}$	$\bar{E}$
T sec	0.68	0.82	1.29
H cm	1.60	1.44	1.46

きつ水深と下球に加えた質量

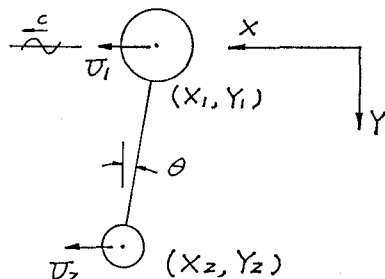
球	A~B	A~C	
きつ水			
4.5 cm	608.27 g	253.81 g	a)
5.975	770.27	415.81	b)

このデータ(マーカーの座標)より各球の中心座標およびくさりの傾き角 θ を求め、それらについて次のような式を仮定して、各式の係数を最小自乗法によって決定した。すなわち上球の中心の座標を (X_1, Y_1) , 下球の中心の座標 (X_2, Y_2) くさりの傾きを θ とし、波の周期を T とすれば、これらの各座標値は波の周期にしたがって運動するとして

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= A_{11} \sin \omega t + A_{12} \cos \omega t \\ X_1 &= B_{11} \sin \omega t + B_{12} \cos \omega t + U_1 t \\ Y_2 &= A_{21} \sin \omega t + A_{22} \cos \omega t \\ X_2 &= B_{21} \sin \omega t + B_{22} \cos \omega t + U_2 t \\ \theta &= C_1 \sin \omega t + C_2 \cos \omega t \\ \omega &= 2\pi/T \end{aligned} \right\} \dots\dots (21)$$

と書ける。 U_1, U_2 はこの浮子構造物の平均移動速度を示しており、 $U_1=U_2$ のはずであるが、独立に求めるこ

とができるのでこのような形にした。2次の運動が加わっていると、倍周期の項等をも考えに入れなければいけないが、フィルムを映写したところ、ほとんどがこのような式で表示できると考えられたので、以下このまま話を進める。



図—3

表—2

No.	模型	きつ水深	l	波	A_1	B_1	A_2	B_2	C_1	U_1
1	A~C	a)	l_1	$\bar{B}$	0.486	0.588	0.477	0.349	0.091	0.346
2			"	$\bar{C}$	0.567	0.603	0.963	1.029	0.257	0.783
3			"	$\bar{E}$	0.245	0.666	1.323	0.746	0.021	0.243
4			l_2	$\bar{B}$	0.334	0.388	0.240	0.320	0.031	0.410
5			"	$\bar{C}$	0.486	1.396	1.506	0.105	0.157	0.728
6			"	$\bar{E}$	0.265	0.352	0.426	0.847	0.056	0.181
7			l_3	$\bar{B}$	0.331	0.608	0.922	0.334	0.032	0.346
8			"	$\bar{C}$	0.441	0.468	0.698	0.274	0.063	0.334
9			"	$\bar{E}$	0.436	0.562	1.287	1.155	0.072	0.381
10	A~C	b)	l_1	$\bar{B}$	0.536	1.043	0.863	0.557	0.222	1.230
11			"	$\bar{C}$	0.601	0.264	0.578	0.580	0.076	0.321
12			"	$\bar{E}$	0.382	0.848	1.152	1.007	0.036	0.414
13			l_2	$\bar{B}$	0.676	1.494	1.795	0.209	0.188	0.789
14			"	$\bar{C}$	0.673	0.104	2.233	2.070	0.214	0.873
15			"	$\bar{E}$	0.748	0.667	1.984	0.886	0.025	0.292
16			l_3	$\bar{B}$	0.736	1.499	1.005	0.115	0.115	0.786
17			"	$\bar{C}$	0.654	0.475	1.375	0.648	0.042	0.609
18			"	$\bar{E}$	0.576	0.574	1.835	1.015	0.041	0.416
19	A~B	a)	l_1	$\bar{B}$	0.686	0.863	1.958	0.528	0.086	0.913
20			"	$\bar{C}$	1.104	1.291	1.183	0.718	0.154	0.579
21			"	$\bar{E}$	0.197	0.381	0.444	0.255	0.028	0.333
22			l_2	$\bar{B}$	0.534	0.794	0.907	0.477	0.040	0.833
23			"	$\bar{C}$	1.186	1.062	1.163	0.759	0.053	0.645
24			"	$\bar{E}$	0.622	0.635	2.126	0.881	0.152	0.215
25			l_3	$\bar{B}$	0.125	0.200	1.245	0.221	0.021	0.595
26			"	$\bar{C}$	0.069	0.256	1.271	0.149	0.011	0.481
27			"	$\bar{E}$	0.534	1.969	1.948	0.731	0.200	1.360
28	A~B	b)	l_1	$\bar{B}$	1.570	0.299	2.071	0.158	0.091	0.858
29			"	$\bar{C}$	1.281	1.414	1.043	0.317	0.264	0.833
30			"	$\bar{E}$	0.528	0.598	0.667	0.820	0.049	0.158
31			l_2	$\bar{B}$	1.796	0.349	1.668	0.455	0.046	0.999
32			"	$\bar{C}$	1.485	2.451	2.268	0.227	0.303	1.070
33			"	$\bar{E}$	0.481	0.061	0.400	0.414	0.046	0.110
34			l_3	$\bar{B}$	1.816	0.382	1.731	0.719	0.038	1.050
35			"	$\bar{C}$	0.874	1.511	1.657	0.309	0.111	0.692
36			"	$\bar{E}$	0.862	1.375	1.343	0.623	0.079	0.573

$A_1, B_1, A_2, B_2 \dots \text{cm}, C_1 \dots \text{rad}, U_1 \dots \text{cm/sec.}$

$A_{11} \sim C_2$ までの係数の値が求まれば、次のような操作によって振幅、位相が決定できる。

$$A_1 = \sqrt{A_{11}^2 + A_{12}^2}, \cos \varphi_{A1} = A_{11}/A_1 \dots\dots\dots (22)$$

このようにしてすべての実験ケースの振幅を表にまとめたのが表—2である。 A_1, A_2 は鉛直, B_1, B_2 は水平方向の振幅を示し, C_1 は回転の振幅を示している。この表には U_1 (上球の平均移動速度) のみを示しているが, U_2 の値もこの値とほとんど同じであるので, ここでは省略した。また位相については波との位相が必要であるが, データ精度 (波と物体の動きの間) に問題があるのと, 紙面の都合で, ここでは省略した。これらの実験ケースの中で U_1 が大きくなっている場合について, いかなるファクターが効いているのかについて以下のような分析を試みた。

(1) 各項目ごとの分類

表—3

	$U_1 > 0.5$	$A_1 > 0.8$	$A_2 > 1.5$	$C_1 > 0.1$	$B_1 > B_2$	$B_1 < A_1$	$B_1 > 1$	$B_2 > 1$
1					○			
2	○			●				●
3					○			
4				●	●		●	
5	○				○			
6					○			
7								
8								
9							○	○
10	●			●	●		●	
11						○		
12	○		●	●	●		●	○
13	●		●	●		●		●
14			○			○		
15	○			●	●		●	
16	○					●		
17			○			○		○
18								
19	●		●		●			
20	○	●		●	○		●	
21					○			
22	●				●			
23	○	●			●	●	●	
24			○	○				
25	○				○			
26	●		●	●	●		●	
27								
28	●	●	●		●	●		
29	●	●		●	●		●	
30								
31	●	●	●			●		
32	●	●	●	●	●		●	
33						○		
34	●	●	●			●		
35	○	●	●	●	●		●	
36	○	●			●		●	
%		100	75	92	70	60	92	40

移送速度がいかなる場合に大きくなるかを確かむために, まず $U_1 > 0.5 \text{ cm/sec}$ の場合を 36 case 中より選んでみた。

その結果が表—3の中に示されている。黒印のものは $U_1 > 1.0 \text{ cm/sec}$ の場合である。これと各種ファクターがどのような関係を示すか, 合せて表—3の中に示してある。

すなわち $A_1 > 0.8$ は浮子の鉛直方向運動の振幅が 0.8 cm 以上のケース, $A_2 > 1.5$ は水中球の鉛直運動の振幅が 1.5 cm 以上のケース, $C_1 > 0.1 \text{ rad}$ はくさりの回転運動の振幅が 0.1 rad より大きいケース, $B_1, B_2 > 1.0$ はそれぞれの球の水平振動の振幅が 1.0 cm 以上のケースを示している。 $B_1 > B_2$, $B_1 < A_1$ はそれぞれの振幅の比較をしたものである。

同表で丸印をつけたケースは, それぞれの項目に相当

しており, そのうち黒丸になっているのは $U_1 > 0.5 \text{ cm/sec}$ に相当しているものである。したがって丸印をつけたケースで黒丸がついているものが多いほど, U_1 とその項目との相関性が強いことを示している。その傾向をみるために同表の最下段に丸印のケース中に黒丸のしめる割合を 100 分率で示してある。

この結果をみると 90% 以上の割合を示しているのは $A_1 > 0.8$, $C_1 > 0.1$, $B_1 > 1.0$ である。すなわち浮子の運動が大きい, 回転運動が卓越している場合である。これらの相互の関係は C_1 の条件のうち A_1 の条件と一致するのは 4/12 であり, B_1 の条件と一致するのは 9/12 となっていて, 後者の方が相関性が非常に強いことを示している。したがって, A_1 の大きい条件と B_1 , C_1 の大きい条件の間にはあまり強い相関はなく, 互に独立して U_1 を大きくする条件になっているようである。

前者は先に理論式で求めた式 (20) で a_y の値が大きくなることに相当していることがわかる。後者の条件は浮体が水平方向に大きく動くことを意味しており (C_1 の大きいことも結果的にはこれと同じことになる), したがって波と浮体の運動との間に位相のずれが大きくなっているのではないかと想像される。そのため, この条件が式 (20) の $\sin \varphi_y$ を大きくする条件に相当しているのかもしれない。しかし, 現在のと

ころ位相についてのデータが十分得られていないので、この考え方で良いかどうか判定しかねるが、この点については今後の問題点としたい。

(2) 相関係数について

表—2 に示されている各要素と U_1 との間の相関係数を計算してみた。相関係数は通常使われている次式を使用した。

$$r^2 = \frac{E[(X-E(X)) \cdot (Y-E(Y))]}{\sigma(X) \cdot \sigma(Y)} \dots\dots\dots (23)$$

$E[]$ は平均、 σ^2 は分散を示す。これによってこの36ケースの U_1 と A_1, A_2, B_1, B_2, C_1 の相関係数を求めたところ表—4のごとくになった。また $A_1 > 0.8$ のケースのみを選んで求めた相関係数も同表中に示してある。これをみればわかるごとく B_2 以外は $0.5 \sim 0.6$ の相関を示しており、特に A_1 のうち $A_1 > 0.8$ となるケースのみをとったときの相関係数は 0.869 と非常に強い相関値を示していることがわかる。

表—4

	r_{36}	r
$U_1 \sim A_1$	0.525	0.869
$\sim A_2$	0.575	
$\sim B_1$	0.509	
$\sim B_2$	-0.072	
$\sim C_1$	0.573	

(3) 模型実験に対応する理論式(20)の値

上記のごとく鉛直運動が、浮子の水平移送にかなりきいていることがわかった。そこで式(20)によって与えられる U の値がどの程度になるか、本実験の場合に適用してみる。波の条件 $\bar{C}$ とし、模型の組合せ $A \sim B$ 、きっ水 b) のケースとすると、

$$A_1 = 99.4 \text{ cm}^2, V_1 = 446.8 \text{ cm}^3, M_1 = 149.4 \text{ g},$$

$$V_2 = 545.6 \text{ cm}^3$$

$$M_2 = 842.8 \text{ g}, C_{M_1} = C_{M_2} = 1.5$$

$$T = 0.8 \text{ sec}, H = 1.5 \text{ cm}, \sigma = 2\pi/T = 7.85 \text{ 1/sec},$$

$$L = 97.6 \text{ cm}, h = 35 \text{ cm}, h_1 = 1.5 \text{ cm},$$

$$k = 2\pi/L = 0.064 \text{ 1/cm}$$

を式(20)に代入すると

$$U = 0.6464 \times \frac{a_{1y}}{\gamma_{1x}} \cdot \sin \varphi_y \text{ (cm/sec)} \dots\dots\dots (24)$$

を得る。 $a_{1y} = 1 \sim 2 \text{ cm}$, $\gamma_{1x} = h \cdot \omega_m = 0.01 \cdot \omega_m = 0.1 \sim 0.8 \text{ 1/s}$, $\sin \varphi_y = 0.01 \sim 0.2$ 程度と考えられるので U のオーダーとしては $0.01 \sim 2.6 \text{ cm/sec}$ となって実験値の U_1 の値と大差がないことがわかる。

なお詳細については位相 φ_y , 減衰係数 γ_{1x} , 質量係数 C_M 等の値についてデータを得なければいけない、今後この点について補足実験する予定である。

4. おわりに

(1) 微小振幅波であっても波と物体の運動のずれがある場合には水平方向に移送される現象があることを理論、及び実験によって確認した。

(2) 実験による確認は、本報告で示した部分では不十分な所があるので、引きつづき実験をして検討することになっている。

(3) 本研究は昭和48年度建設省研究「波浪観測ステーションの調査研究」の研究費によって行われ、また実験データは昭和48年度卒論生沢田義治(協和電設)君の卒論のものを使用させていただいた。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 本間 仁・荻原国宏: 浮子とロープで結合された浮遊構造物の運動, 第20回海岸工学講演会論文集(1973)
- 2) 坪井忠二: 振動論, 現代工学社
- 3) 土木学会: 水理公式集, 昭和46年改訂版, 基礎編「波」
- 4) 本間 仁: 浮遊構造物の安定性について, 土木学会第4回海洋開発シンポジウム
- 5) 本間 仁・荻原国宏: 大型ボンツーンの波による運動, 第18回海岸工学講演会(1971)
- 6) 本間・荻原・江森担也: 球形浮子をもつ海洋構造物の運動, 土木学会第28回年次学術講演会(1973)
- 7) 本間・荻原・比企三蔵: 円筒形浮子をもつ海洋構造物の運動, 土木学会第28回年次学術講演会(1973)