

地震時に海洋構造物の円柱体に作用する  
流体力の実験的研究EXPERIMENTAL STUDY ON THE FORCE ACTING ON THE CYLINDERS  
OF OFFSHORE STRUCTURES IN EARTHQUAKE

西岡 隆\*・南 忠夫\*\*・山口浩吉\*\*\*・佐野 忍\*\*\*\*

By Takashi NISHIOKA, Tadao MINAMI, Hiroyoshi YAMAGUCHI  
and Shinobu SANO

## 1. はじめに

海洋構造物に作用する自然外力は、構造体の自重や浮力のような静荷重のほかに、波浪や風、地震などによる変動荷重が挙げられる。これらのうちで波浪や風による荷重は海洋構造物に常時作用するものであり、厳しい海洋環境の中で、これらの荷重に対する安全性は最も注意が払われてきている。このような理由から、海洋構造物に作用する流体力や構造物の応答を取り扱った過去の研究の多くは、波浪や風荷重を対象としたものが多く、地震が作用する場合のように、構造物に励起される振動によって生じる流体力を取り扱ったものはきわめて限られている<sup>1)~10)</sup>。

過去に行われた地震時における海洋構造物の応答に関する研究では、波浪や一様流を対象としたいわゆる Morison の公式に基づいて流体力を算定している場合がほとんどである<sup>9)</sup>。海洋構造物に地震外力が作用する場合には、構造物と流体間の相対変位は比較的小さく、したがって波浪と比べ K.C. 数が低い領域にある。その上流体の運動によって、流体力が発生するというよりは、構造物に生じる比較的高い周波数領域の振動によって、周辺の静止した流体との間に流体力が作用するものと考えられる。

このような領域での研究は、Keulegan-Carpenter<sup>1)</sup> による研究、Sarpkaya<sup>2),3)</sup>, Shin<sup>4)</sup>, Ramberg ら<sup>5)</sup>の研究、本邦では田中ら<sup>6),14)</sup>の研究がある。しかし、これらの研究はいずれも地震時の K.C. 数と比較してやや高い領域の研究であり、地震時の海洋構造物の挙動を明らかにす

るためにその結果を直接用いることができない。

本研究は、海洋構造物に地震外力が作用する場合を想定し、比較的低振幅、高周波数領域で振動する円柱体に作用する流体力を振動実験によって解明し、不規則、非定常な地震が入力する場合の構造物の応答を数値シミュレーションの結果と比較したものである。地震を想定しているため、実験で用いた K.C. 数は  $K.C. < 1$  の領域とした。また Reynolds 数は  $10^2 \sim 10^4$  の範囲であり、実物の海洋構造物に対する Reynolds 数とは異なっている。

## 2. 実験装置

実験装置の断面図を Fig. 1 に示す。試験体の加振に用いた振動台は加振力 2000 kg、水平 1 方向、振動数範囲 DC~500 Hz の性能を有する電動油圧式振動台(明石製作所製 EHSS 2-10-7, A-2-10)である。実験に先立って行った試験によれば、本実験での振動数範囲 2.8~15 Hz、振幅 0~10 mm の正弦波入力に対して、十分安定した出力を得ることができた。

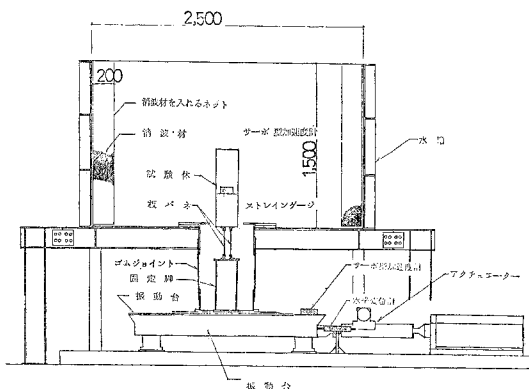


Fig. 1 Shaking Table and Test Equipment.

\* 正会員 工博 筑波大学助教授 構造工学系

\*\* Ph. D. 筑波大学助教授 構造工学系

\*\*\* 石川島播磨重工業

\*\*\*\* 鹿島建設

この振動台をまたいで、直径 2500 mm、深さ 1500 mm の鋼鉄製円形水槽を高さ 1 m の位置に設置した。水槽内壁には、加振によって発生する波の反射を防ぐために、厚さ 200 mm にわたってポリエチレン繊維片からなる消波層を設け、ナイロン製のネットで固定した。円形水槽底部の中心には、直径 500 mm の円穴を設け、その周囲に高さ 250 mm の円筒状のフランジが取り付けられている。この直下の位置にある振動台には、同様に直径 500 mm、高さ 200 mm の円筒フランジを取り付け、円筒形をしたゴム製のジョイントを介して水槽底部のフランジと連結した。このゴム製ジョイントは、水槽内の漏水を防ぐとともに、振動台と水槽間に抵抗なく相対変位を与えるためのものである。ゴム製ジョイントの外周には、網目の細かいナイロン製のネットを配して、水圧によるゴムのはらみ出しを補強した。この円筒形をした上下フランジとゴム製ジョイント内の空間に、直径 168 mm、高さ 500 mm の固定脚を介して試験体を取り付ける。試験体は幅 40 mm、高さ 200 mm の 2 枚の板ばねと鋼製円柱体からなっている。2 枚の板ばねは 100 mm の間隔をおいて平行に立てられ、円柱試験体を支持しているため、円柱試験体はローリングが拘束され、水平変位のみ生じるようになっている。実測の結果によれば、ローリングによる円柱上端での変位は水平方向の変位に対し 3% 以内であった。したがって、円柱試験体各部の水平変位は一樣となる。板ばねは長さ 200 mm、幅 40 mm のばね鋼板からなり、厚さは 3.3 mm、2.5 mm の 2 種類を用いている。板ばねの強軸と弱軸回りの剛性は著しく異なるため、加振方向と一致する弱軸直角方向の振動のみが誘起され、これと直角方向の運動は拘束されている。板ばね上端の円柱試験体との接合面は、板ばねによって乱される水の影響が水槽内に及ばないように、水槽底部の位置に一致して、予想される最大振幅に相当する直径を残して、穴あき円形カバープレートで覆われている。

円柱試験体の直径および高さを変化させることによって、円柱試験体に作用する質量力や減衰力を変化させることができる。実験に使用した円柱試験体の呼称、直径 ( $D$ )、高さ ( $L$ )、実質の重量 ( $W$ ) を **Table 1** に示した。

円柱試験体の呼称で A, B はそれぞれ試験体の高さの相違を、それに続く番号は試験体の直径の相違を表わしている。すなわち、A, B はそれぞれ高さが 68.3 cm, 38.3 cm の円柱体を表わし、番号 1, 2, 3, 4 に応じて直径 ( $D$ ) が 20 cm, 15 cm, 10 cm, 5 cm と変化する。円柱試験体の最大直径と水槽の直径の比は 12.5 であり、水槽壁面による境界の影響や波の反射による影響を極力少なくするように、可能な限り大きな値を用いた。

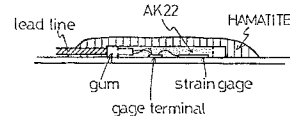
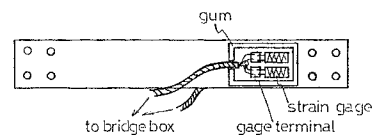
**Table 1** Dimension of Test Pieces.

試験体	$D$ (cm)	$L$ (cm)	$W$ (kgf)
A-1	20.0	68.3	17.0
A-2	15.0	68.5	12.7
A-3	10.0	68.0	9.92
A-4	5.0	68.3	7.29
B-1	20.0	38.3	13.8
B-2	15.0	38.5	10.4
B-3	10.0	38.3	8.31
B-4	5.0	38.5	6.29

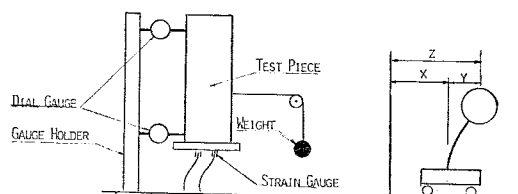
また円柱試験体の表面はできる限り摩擦による抵抗を少なくするように、滑らかに表面を仕上げ、その上に酢酸ビニール系ペイントを塗布した。

円柱試験体に生じる加速度を測定するために、試験体内の重心位置にサーボ型加速度計 (0~100 Hz, max  $\pm 2$  G) を取り付けた。加速度計からの出力はコードを介して円柱試験体底部の開口部より外部に導いた。一方、振動台と円柱試験体との相対変位を測定するために、板ばね上端の位置に防水型抵抗線ひずみ計を表裏 2 枚ずつ貼付し、防水処理を施した。防水処理は **Fig. 2** に示すように、まずゲージの周りにクロロレン製の形枠を取り付け、枠内に防湿剤を充填した。その上からゴム系接着剤をコーティングした。板ばねの変位とひずみの較正は、**Fig. 3** に示すように、板ばねと円柱試験体を設置した状態で円柱試験体の重心位置に水平方向力を加え、水平変位と水平方向力、ひずみの関係を求めた。水平変位 10 mm までは弾性領域内にあつて十分直線性が得られることを確認し、各試験体のばね定数を決定した。

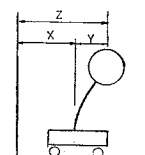
振動台の水平変位および加速度を検出するために、振



**Fig. 2**



**Fig. 3**



**Fig. 4**

動台側面に電磁誘導型変位計，振動台上面に抵抗線型加速度計（2G，0~40Hz）を取り付けた。

### 3. 自由振動実験から求められる流体力

水中で振動する円柱体の運動方程式は，Fig. 4 に示すように，振動台の水平変位を  $x(t)$ ，円柱試験体の水平変位を  $z(t)$  にとると，次式で表わされる。

$$(M + \bar{M})\ddot{z} + c(\dot{z} - \dot{x}) + k(z - x) + f(\dot{z}) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし， $M$ ， $\bar{M}$  はそれぞれ円柱試験体の質量および付加質量であり， $c$ ， $k$  はそれぞれ空中における減衰係数およびばね定数である。また  $\bar{M}\ddot{z}$  および  $f(\dot{z})$  はそれぞれ質量力，減衰力を表わしている。

式 (1) において  $x(t) = 0$  と置けば自由振動の運動方程式となる。水深方向に平均化された質量係数  $C_M$  を用いて付加質量  $\bar{M}$  を表示すれば，

$$\bar{M} = C_M \cdot \pi/4 \rho D^2 H \quad \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。ただし， $\rho$ ， $D$ ， $H$  はそれぞれ流体の密度，円柱試験体の直径と水没深さを与えている。水槽底面の境界条件によって，質量係数は水深によって変化するため，式 (2) で与えられる質量係数は円柱試験体の水没深さ  $H$  における平均値である。

減衰力  $f(\dot{z})$  の値は必ずしも線形な形になるとは限らない。しかし，この実験のように比較的減衰が小さく，そのうえ単振動に近い場合には，等価線形化法を用いて，線形化しても問題の本質を損なわない。式 (1) を線形化すると， $f(\dot{z})$  と等価減衰係数  $\bar{C}$  の間の関係は，

$$\bar{C} = \int_0^T f(\dot{z}) \dot{z} dt / \int_0^T \dot{z}^2 dt \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表わされる。ここで， $T$  は振動周期を与えている。いま仮に，減衰力  $f(\dot{z})$  が Morison の公式で表わされるとし，抗力係数  $C_D$  を用いて，

$$f(\dot{z}) = C_D \cdot 1/2 \rho D H \dot{z} |\dot{z}| \quad \dots\dots\dots (4)$$

で表わされる場合について考える。振動する円柱試験体の絶対速度  $\dot{z}$  が， $\dot{z} = A\omega \cos \omega t$  で与えられる場合には，式 (4) を式 (3) に代入して得られる等価減衰係数  $\bar{C}$  は，

$$\bar{C} = \frac{4}{3\pi} C_D \rho D H \omega A = 0.424 C_D \rho D H \omega A \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。その結果，等価減衰係数を求めることによって，減衰力  $f(\dot{z})$  の性質を解明することができる。

まず初めに，Table 1 に示す 8 本の円柱試験体のおのおのについて，円柱試験体の全高 1/4 ごとに 0~6/4 の範囲で水没深さ  $H$  を変化させて，自由振動実験を行った。自由振動実験は円柱試験体の重心位置に水平方向に鋼線を取り付け，他端に滑車を介して重錘をつり下げ

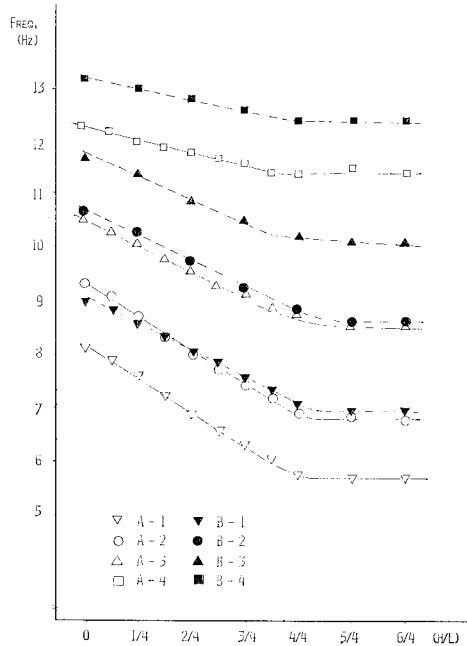


Fig. 5 Frequency vs.  $H/L$  (Free Vibration).

る。続いて所定の初期変位（4mm~1mm）を与えた状態で鋼線を切断し，自由振動を発生させる。あらかじめ円柱試験体内部に設置したサーボ型加速度計，および板ばね上脚部に取り付けたストレインゲージの出力はデータレコーダー，およびペン書きオシロに記録した。その結果得られた自由振動の波形から，各実験条件に対応する固有振動数  $f_0^*$ ，対数減衰率  $\delta$  を読み取った。Fig. 5 は各試験体の固有振動数  $f_0^*$  と，水没深さ  $H$  を試験体の全長  $L$  で無次元化した値  $H/L$  の関係を示したものである。横軸上で  $H/L = 0$  の値は板ばねのみ水没した状態を示している。水没深さが増加するにつれて，いずれの試験体も固有振動数は減少するが，完全水没状態以後では一定値を示している。

次いで固有振動数  $f_0^*$ ，対数減衰率  $\delta$  を用いて，以下の式から付加質量  $\bar{M}$ ，等価減衰係数  $\bar{C}$  を決定した。

$$\left. \begin{aligned} \bar{M} &= M \left\{ \left( \frac{f_0}{f_0^*} \right)^2 - 1 \right\} \\ \bar{C} &= 4 \pi \bar{M} \left( \frac{f_0}{f_0^*} \right)^3 f_0^* \frac{\delta^2}{\sqrt{4 \pi^2 + \delta^2}} - c \end{aligned} \right\} \dots\dots (6)$$

ただし， $f_0$  は空中における各試験体の固有振動数を表わしている。式 (6) で与えられる付加質量  $\bar{M}$ ，減衰係数  $\bar{C}$  は，水槽底面から水面に至る間の平均値を与えていることに注意しなければならない。Table 2 に水温一定の状態では求められた付加質量  $\bar{M}$ ，等価減衰係数  $\bar{C}$  の値を示した。表の中で，水深  $H = 0$  のときの  $\bar{M}$ ， $\bar{C}$  の値は，水槽と振動台の間に介在する水が振動中に板ばねに作用することによるものである。これらの値を各水

Table 2 Added Mass and Equivalent Damping Coefficient in Free Vibration.

Test pieces	In the Air		Added Mass ( $\bar{M}$ ) and Equivalent Damping Coefficient ( $\bar{C}$ )							
			$H$	0	1/4	2/4	3/4	4/4	5/4	6/4
A-1	$M$	17.0	$\bar{M}$	0.73	3.37	7.83	12.87	18.39	19.21	19.62
	$C$	14.8	$\bar{C}$	3.7	9.0	12.3	12.4	11.4	10.4	10.6
A-2	$M$	12.7	$\bar{M}$	0.43	1.44	5.00	8.09	11.51	11.85	12.19
	$C$	13.0	$\bar{C}$	2.7	6.3	8.5	11.2	8.6	9.8	10.6
A-3	$M$	9.92	$\bar{M}$	0.36	1.43	2.71	4.02	5.61	5.89	5.95
	$C$	11.1	$\bar{C}$	1.2	3.0	4.9	5.1	6.1	6.9	7.0
A-4	$M$	7.29	$\bar{M}$	0.37	0.73	1.01	1.31	1.60	1.60	1.60
	$C$	9.19	$\bar{C}$	2.6	3.0	4.0	5.1	6.5	5.8	6.5
B-1	$M$	13.8	$\bar{M}$	2.36	3.70	6.13	8.83	11.88	12.94	13.19
	$C$	14.4	$\bar{C}$	6.8	9.2	10.6	14.1	12.5	11.1	11.7
B-2	$M$	10.4	$\bar{M}$	0.41	1.26	2.63	4.21	5.91	6.21	6.27
	$C$	12.5	$\bar{C}$	1.8	5.1	5.8	7.2	8.0	7.1	6.6
B-3	$M$	8.31	$\bar{M}$	0.43	0.91	1.75	2.57	3.19	3.44	3.44
	$C$	8.62	$\bar{C}$	3.9	5.1	6.0	6.9	6.0	6.9	5.7
B-4	$M$	6.29	$\bar{M}$	0.38	0.60	0.81	1.04	1.27	1.27	1.27
	$C$	8.27	$\bar{C}$	2.1	5.7	4.8	6.0	5.0	7.4	6.8

Unit :  $M$  and  $\bar{M}$  [kg]  $C$  and  $\bar{C}$  [kg/s]

没深さでの付加質量, 等価減衰係数から差し引き, 円柱本体に作用する付加質量  $\bar{M}$ , 等価減衰係数  $\bar{C}$  とした. 自由振動によって, 表面波が若干生じるが, 実験の範囲での Froude 数は 0.04 以下であり, 造波による影響はほとんど無視できるものと考えられる.

Fig. 6 は以上の自由振動実験から得られた付加質量を, 式 (2) で与えられる平均的な質量係数  $C_M$  に換算し, この値を円柱試験体の直径で無次元化した水没深さ  $H/D$  との関係で表示したものである.  $H/D$  が低い領域では水槽底面の境界によって, 水粒子の運動が拘束されるため, 質量係数  $C_M$  の値は小さいが,  $H/D$  が 3.5 以上の領域では  $C_M=1.0$  に漸近することが明らかである. この  $C_M$  の分布は先に述べたように, 質量係数を水深方向に平均化した値であり, 各水深位置での質量係数とは異なっている. 各水深位置での質量係数を  $\bar{C}_M(h/D)$  で与えると, 平均化された質量係数  $C_M$  の間には次式で表わされる関係がある.

$$C_M = \frac{1}{H} \int_0^H \bar{C}_M(h/D) dh \dots\dots\dots (7)$$

ただしここで,  $h$  は任意の水深を与えている. そこで Fig. 6 に示す実験から得られた内挿曲線を用いて  $\bar{C}_M(h/D)$  を求めると,

$$\bar{C}_M(h/D) = 1.03 \{1 - e^{-0.497(h/D + 0.50)} \cdot (1 - 0.497 h/D)\} \dots\dots\dots (8)$$

の関係が求められる. この分布形状を Fig. 6 (b) に示した. この図によれば,  $\bar{C}_M(h/D)$  の分布はおおよそ  $h/D=2$  を越えると, ほぼポテンシャル流理論から求められる値 1.0 に漸近することが明らかである. よって, 水槽底面境界の拘束は  $h/D=2$  までの領域内にあるものと考えられる.

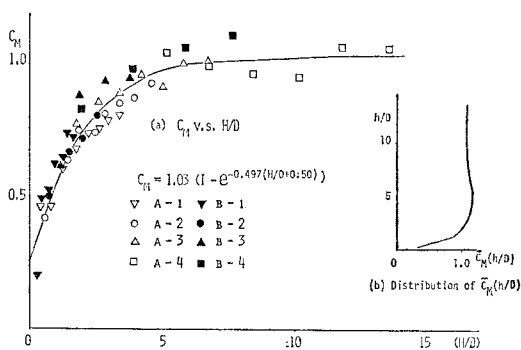


Fig. 6

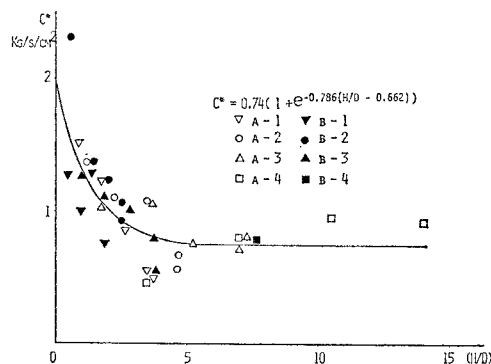


Fig. 7  $C^*$  vs.  $H/D$ .

Fig. 7 は等価減衰係数を各水深深さでの円柱試験体の水平投影面積  $DH$  で除し, 単位面積当たりの等価減衰係数  $C^*(=\bar{C}/DH)$  に変換して,  $C^*$  と  $H/D$  の関係を示したものである. 水没深さが小さい状態では, 水槽底面で流体に作用する摩擦力によって,  $C^*$  は大きな値を与えるが, 水没深さが深くなるにつれて,  $C^*$  の値は

減少している。水深方向に平均化された等価減衰係数が、質量係数の場合と同じく  $H/D > 3.5$  の範囲で一定値に漸近することを考えると、 $h/D > 2$  の領域では各水深位置での  $\bar{C}(h/D)$  は一樣になるものと考えられる。

緩やかに減衰する振動波形からは、減衰力に対する振動速度や振幅  $A_z$  の依存性が判然としな。そこで比較的水没深さの影響が少ないと考えられる  $H/D > 3.5$  の領域に着目し、自由振動の初期振幅 (4 mm~1 mm) を変化させて自由振動実験を行った。得られた振動波形の記録から、各試験体について最初の 6 波の平均的な振幅  $A_z$  と対数減衰率  $\delta$  を読み取り、振幅については K.C. 数 ( $=2\pi A_z/D$ )、対数減衰率については等価減衰係数  $\bar{C}$  に変換して、振幅の減衰依存性を調べた。A-1 試験体の一例を Fig. 8 に示す。いずれの試験体についても等価減衰係数  $\bar{C}$  は K.C. 数の増加につれて緩やかに増加する傾向がみられる。そこで振動速度の影響をみるために、異なる固有振動数をもつ各試験体について  $H/D > 3.5$  の範囲内で同様の実験を行った。得られた記録は振動速度の無次元化量 Reynolds 数 ( $=\omega A_z D/\nu$ ) と振動振幅の無次元化量 K.C. 数 ( $=2\pi A_z/D$ ) について異なった値をもっている。そこでこれらの記録について、式 (5) を用いて等価減衰係数  $\bar{C}$  を抗力係数  $C_D$  に変換し、Reynolds 数と K.C. 数の積、 $R_e \times K.C. (=2\pi \omega A_z^2/\nu)$  の関係で図示したものが Fig. 9 である。

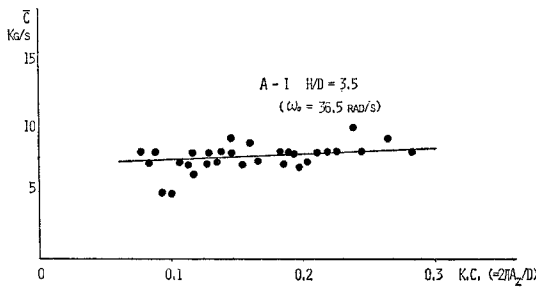


Fig. 8  $\bar{C}$  vs. K.C. (Free Vibration).

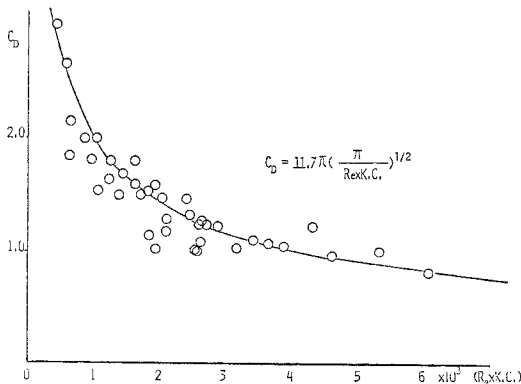


Fig. 9 Drag Coefficient vs.  $R_e \times K.C.$

Batchelor<sup>7)</sup> によれば、振動振幅  $A_z$  が円柱の直径  $D$  の  $1/3$  以内 ( $K.C. < 2\pi/3$ ) にあるときには、剥離は発生せず、振動する円柱に作用する減衰力は円柱境界に作用する流体の摩擦力によるものと考え、このときの抗力係数  $C_D$  は

$$C_D = 4\pi \left( \frac{\nu}{2\omega A_z^2} \right)^{1/2} = 4\pi \left( \frac{\pi}{K.C. \times R_e} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (9)$$

で与えられるとしている。ただし、 $\nu$  は流体の動粘性係数である。Fig. 9 において実線で示す内挿曲線は式 (9) の関係に比例する抗力係数が生じるものと仮定して求めた値であり、剥離が生じない領域における抗力係数が Batchelor の指摘した考え方に一致していることを示している。

#### 4. 正弦加振実験から得られる流体力

自由振動実験に引き続いて、振動台より一定振幅の正弦波を入力することにより、強制振動実験を行った。強制振動実験の目的は、より広い振動周期と振幅に対する流体力を解明するためのものである。水槽内の円柱に作用する流体力は、強制振動実験においても円柱の形状、振動数、振幅によってのみ支配されることを考えると、固有振動数や構造物の減衰係数に關係することはなく、流体力学の見地からは強制振動実験は自由振動実験と異なることはない。

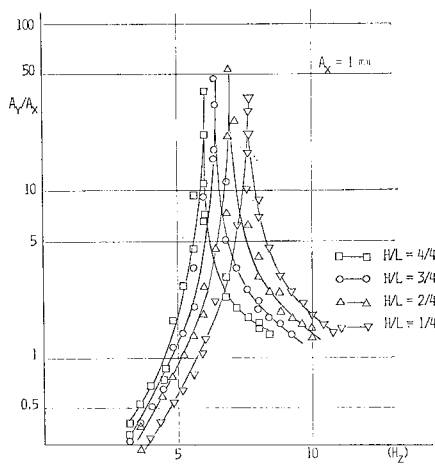
いま、入力振幅を  $x(t) = A_x \sin \omega t$ 、入力振幅に対する円柱試験体の相対変位を  $y(t) = z(t) - x(t) = A_y \sin(\omega t + \phi)$  で与えるものとすれば、付加質量  $\bar{M}$ 、および等価減衰係数  $\bar{C}$  は線形化された式 (1) より、それぞれ

$$\bar{M} = \frac{k\eta(\eta + \cos \phi) - c\omega\eta \sin \phi}{(1 + 2\eta \cos \phi + \eta^2)\omega^2} - M \dots\dots\dots (10)$$

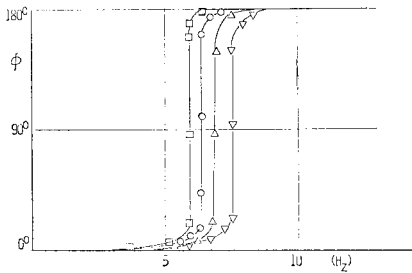
$$\bar{C} = \frac{c\omega(1 + \eta \cos \phi) - k\eta \sin \phi}{(1 + 2\eta \cos \phi + \eta^2)\omega} - c \dots\dots\dots (11)$$

で与えられる。ただし、上式において  $\eta$  は入力振幅  $A_x$  と相対振幅  $A_y$  との比  $\eta = A_y/A_x$  であり  $\phi$  は位相差である。そこで強制振動から得られる記録を用いて、振幅比  $\eta$  および位相差  $\phi$  を読み取って、式 (10)、(11) に代入することにより付加質量  $\bar{M}$ 、等価減衰係数  $\bar{C}$  を求めた。 $\eta$  および  $\phi$  の読み取りは十分な精度を必要とするため、記録波形のうちから同一実験条件において定常的な区間を抜き出し、スペクトルアナライザーによってそれぞれの平均値を求めた。共振曲線、位相曲線の一例を Fig. 10 (a), (b) に示す。

得られた付加質量をもとに、式 (2) から質量係数  $C_M$  を求め、 $C_M$  に対する出力振幅および振動数の依存性を検討した。Fig. 11 は質量係数  $C_M$  と出力振幅  $A_z$  の無次元化量である K.C. 数 ( $=2\pi A_z/D$ ) の関係を、試



(a) Resonance Curve (A-1)



(b) Phase Curve

Fig. 10

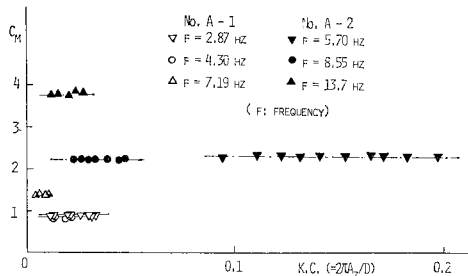


Fig. 11  $C_M$  vs. K.C. ( $H/L=4/4$ ) Forced Vibration.

験体 A-1 および A-2 について示したものである。水没深さは完全水没状態 ( $H/L=4/4$ ) になっている。図からも明らかなように、質量係数  $C_M$  は出力振幅  $A_2$  に無関係に一定の値を示している。しかし、振動数によって  $C_M$  は影響され、振動数が増加するにつれて、質量係数が増加する傾向が認められる。

振動数のこのような傾向をさらに明確にするために、水槽底面の境界の影響を比較的受けないと考えられる  $H/D > 3.5$  の範囲について、すべての試験体の質量係数  $C_M$  と入力振動数  $f$  の間の関係を調べ、結果を Fig. 12 に示した。入力振

幅は 0.5 mm, 1 mm の 2 種類にとっている。この図からも明らかなように、質量係数  $C_M$  は振動数が増加するにつれて、ポテンシャル流理論から求められる値  $C_M = 1.0$  からしだいに増加していくことが明らかである。 $C_M = 1.0$  が成り立つ振動数範囲はおおよそ 8 Hz 以下の領域に限られている。すべての試験体の質量係数が入力振動数のみに支配されることを考えると、ばねおよび質量からなるおのおのの試験体の固有振動数が質量係数に影響を与えていないことも明らかである。

自由振動実験から求められた質量係数は、 $H/D > 3.5$  の領域では  $C_M = 0.8 \sim 1.0$  の範囲内にあったが、このような自由振動実験と強制振動実験の結果の相違は明白ではない。自由振動実験と強制振動実験に相違があるとすれば強制振動実験では常に振動台下部からエネルギーが補給される点にあるものと考えられる。自由振動実験との相違については今後の検討を待たなければならない。

続いて強制振動に対する減衰力を検討した。Fig. 13 は B-4 試験体について、等価減衰係数  $\bar{C}$  と K.C. 数 ( $= 2\pi A_2/D$ ) の関係を示したものである。この場合についても自由振動実験と同様に、等価減衰係数は円柱試験体の絶対振幅によってあまり変化しないことが明らかであり、むしろ、振動数によって等価減衰係数が変化する傾向が認められる。そこで入力振幅  $A_x$  をそれぞれ

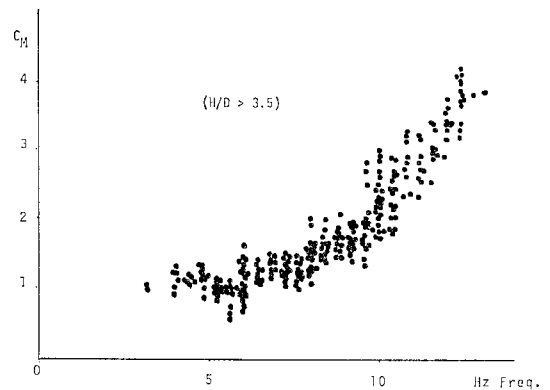


Fig. 12  $C_M$  vs. Frequency.

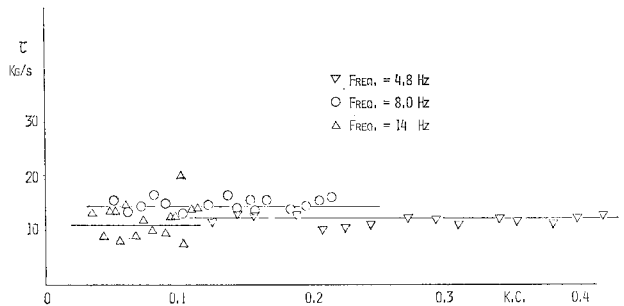
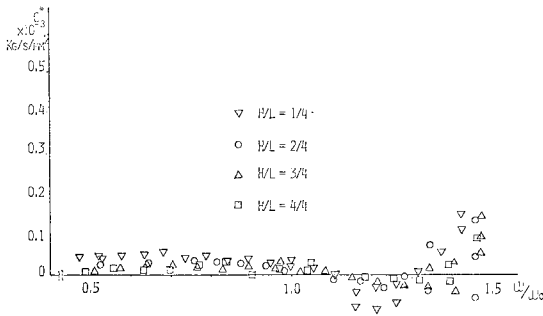
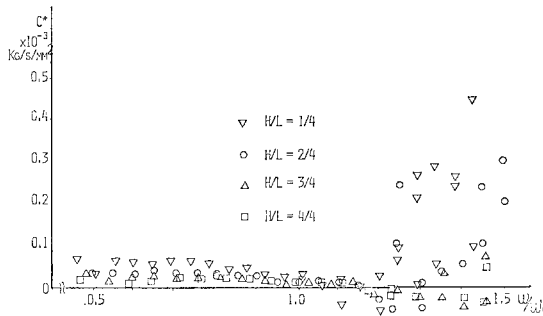


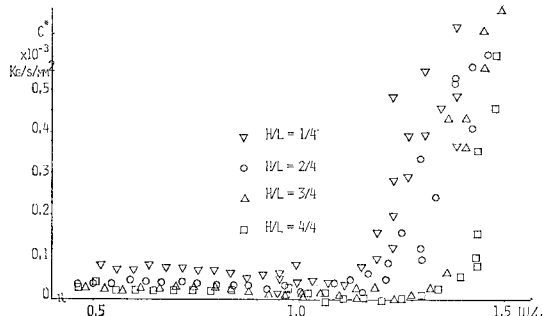
Fig. 13 (No. B-4,  $H/L=4/4$  Forced Vibration).



(a)  $C^*$  vs.  $\omega/\omega_0$  A-1



(b)  $C^*$  vs.  $\omega/\omega_0$  A-2



(c)  $C^*$  vs.  $\omega/\omega_0$  A-3

Fig. 14

0.5 mm, 1 mm の場合について、各試験体の単位面積当たりの等価減衰係数  $C^*$  が振動数の変化につれてどのように変化するかを調べた。

Fig. 14 (a)~(c) は A-1, A-2, A-3 試験体について、単位面積当たりの等価減衰係数の変化を、固有振動数で無次元化した強制振動数の関係で表示したものである。同図から、いずれの場合も強制振動数が固有振動数のほぼ 1.25 倍までは、単位面積当たりの等価減衰係数は一定値をとるのに対し、1.25 倍以上の振動数領域にあっては急激に増加している。また、水没深さの影響は自由振動実験の場合と同様に、 $H/L$  が低い場合ほど  $C^*$  の値は大きな値を示している。

そこで自由振動実験の結果に従って、等価減衰係数  $\bar{C}$  の値を式 (5) を用いて抗力係数  $C_D$  に換算し、 $H/D > 3.5$  の範囲内について、Reynolds 数と K.C. 数の積  $R_e \times K.C. (= 2\pi\omega A_z^2/\nu)$  との関係を探った。Fig. 15 はその関係を両対数グラフで示したものである。図中に自由振動実験の結果も合わせて示した。強制振動実験の結果は、自由振動実験の結果と比較してばらつきが大きいが、自由振動実験と同様に抗力係数  $C_D$  が Reynolds 数と K.C. 数の積、 $2\pi\omega A_z^2/\nu$  と関係をもつことがうかがえる。図中の実線は自由振動実験に対する内挿曲線

$$C_D = 11.7 \pi (\pi/R_e \times K.C.)^{1/2} \dots\dots\dots (12)$$

を与えている。強制振動実験は式 (12) で与えられる曲線よりもやや高めの値を示しているが、Fig. 15 から明らかなように、強制振動実験についても、Batchelor<sup>7)</sup> の指摘するように、抗力係数  $C_D$  は  $R_e \times K.C.$  数の  $1/2$  乗に反比例するものとみなすことができる。

従来海洋構造物の地震時の応答計算では、Morison の公式を用いて流体力を算定し<sup>8)</sup>、質量係数  $C_M = 1.0$ 、抗力係数  $C_D = 1.2 \sim 1.4$  の値を用いている。しかし、本実験から得られた結果によれば、 $C_M$  や  $C_D$  の値は一樣流や波浪外力に対する値とは異なり、 $C_M$  については振動数に対する依存性、 $C_D$  に対しては  $\omega A_z^2$  に対する依存性を示している。

### 5. 地震外力に対する流体力

自由振動実験、正弦加振実験の結果得られた知見が、構造物の地震応答にそのまま適用できるかどうかを確認する意味から、二、三の強震計記録を入力とする過渡振動実験を行った。使用した試験体は A-1 試験体で、完没状態 ( $H/L = 4/4$ )、半没状態 ( $H/L = 2/4$ ) および空気中 ( $H/L = 0/4$ ) に対し、おのおの実験を行った。強震計記録としては、円柱試験体の固有振動数の関係から El Centro 1940 (NS)、八戸 1968

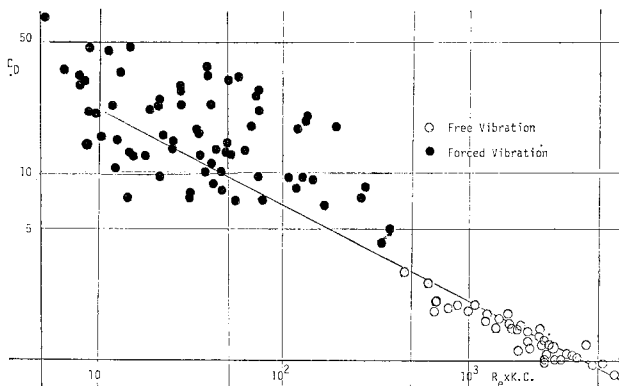


Fig. 15  $C_D$  vs.  $R_e \times K.C.$

(EW), 東北大学 1978 (EW) の時間軸を 1/2 に縮めたものを使用し, 振動台と試験体の加速度, 振動台の変位をトランスデューサーにより測定した. 観測された八戸の加速度記録を Fig. 16 (a)~(c) に示す. 図の上から

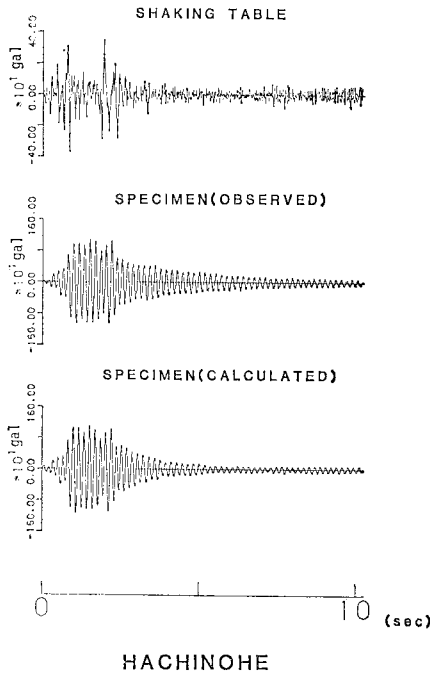
順に入力波形, 実測による応答波形, 計算による応答波形を示している. 振動台のランダム波加振にあたっては, 低域エコライザーを介して 1~50 Hz の範囲で出力補償を施したが, 入力と振動台の出力の間にはかなりの差異が生じている.

また同一の入力波に対しても, 試験体の状態 (全没, 半没, 空気中) によって, 必ずしも同一の出力波形が得られていないが, ここでは振動台で観測された加速度波形をそのまま試験体に対する入力地震動とみなして議論することとする. 一方試験体の応答加速度は比較的単純な正弦振動を示しており, これを複数の自由振動の重ね合せとみなすことができる. すなわち, この実験では, 入力地震動が衝撃的な作用を及ぼしていることが理解される.

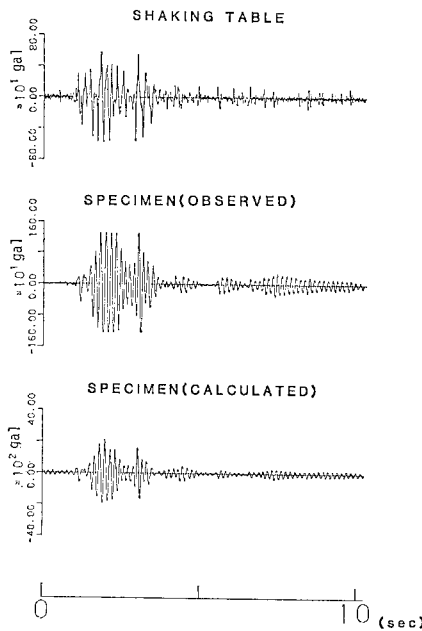
次に, 3., 4. で明らかにされた質量係数  $C_M$  および流体抵抗による等価減衰係数  $\bar{C}$  の振動数依存性を考慮して, シミュレーション解析を行った. 解析は実験をモデル化して, 1 自由度系の絶対加速度に関する伝達関数を用いて周波数領域で行った. 水没状況に応じた試験体の固有振動数  $f_0^*$  に対する加振振動数  $f$  の比率  $\beta$  を用いると, 伝達関数  $H(\beta)$  は式 (13) で与えられる.

$$H(\beta) = \frac{1}{(1-\beta^2)^2 + (2h\beta)^2} \{ (1-\beta^2 + 4h^2\beta^2) - i(2h\beta^3) \} \dots\dots\dots (13)$$

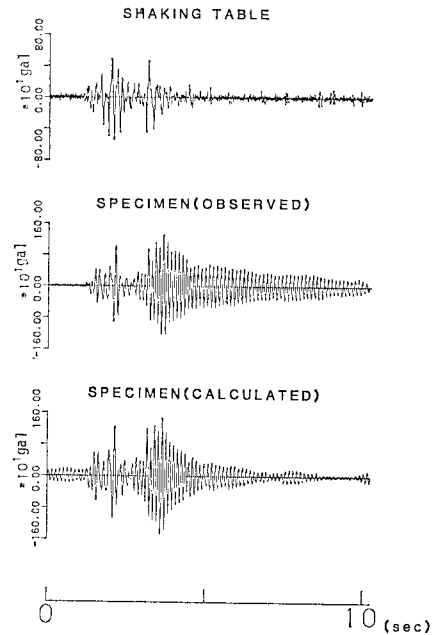
ただし,  $i = \sqrt{-1}$ : 虚数単位



(a) Wave Form of Response ( $H/L=0$ )



(b) Wave Form of Response ( $H/L=2/4$ )



(c) Wave Form of Response ( $H/L=4/4$ )

Fig. 16



$$h = \frac{c + \bar{C}}{\sqrt{M(1 + C_M)k}} : \text{等価減衰定数}$$

3., 4. の実験結果に基づき, 各パラメーターの値を以下のように定めた.

$$M = 17.0/980 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^2$$

$$k = 59.1 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-1}, c = 26.2 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}$$

$\bar{M}$  および  $\bar{C}$  については Table 2 参照

固有振動数  $f_0^*$  は, 自由振動実験の結果から次のように推定した.

$$f_0^* = 5.75, 6.87, 8.33 \text{ Hz (完没, 半没, 空中)}$$

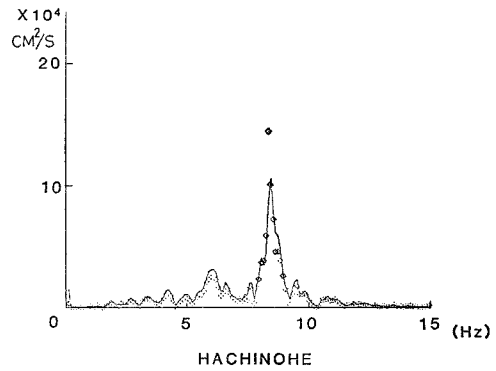
解析結果のうち八戸の場合を Fig. 16 (a)~(c) の下段に示す. いずれも正弦振動に近い応答を示し, 実測応答波形と似た傾向にある. 実測波形と計算波形は, 最大振幅, 振幅の時間的変動, 周期および位相関係が大略似た傾向を示しており, 3., 4. で得られた実験結果を水中構造物の地震応答解析に適用しても実用上ほとんど問題はないものと思われる.

八戸の実測による応答波形および計算による応答波形のフーリエ振幅スペクトルを Fig. 17 (a)~(c) に示す. 図中の  $\diamond$  印が実測波形, 実線が計算波形に対応している. いずれも, 正弦的な応答を反映して, 鋭い単一ピークをもつ狭帯域フィルターに似た形状をしている. ピークの位置および高さ, スペクトルの全体的な形状は実測波形と計算波形でよく似ており, スペクトル解析の面からも解析に用いた仮定がほぼ妥当なものであることを示している.

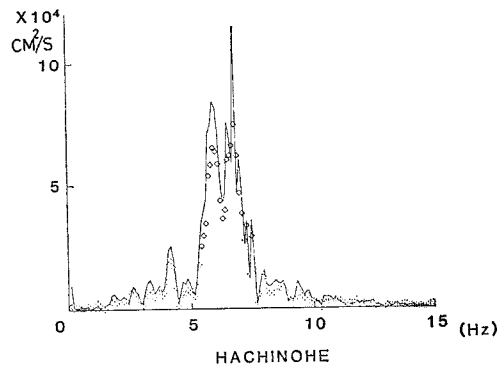
なお, Table 2 から得られる  $C_M, \bar{C}$  の表現を振動数に依存しない形に書き換えて同様の解析を行ったところ, 解析結果に顕著な差異は認められなかった. このことは, 地震応答解析における固有振動数  $f_0^*$  の影響が大きいことを示しており, 付加質量  $\bar{M}$  の算定方法が基本的には重要であると考えられる. また応答波形をさらに詳細にみると, たとえば Fig. 16 で, 計算波形の減衰が実測波形の減衰よりも多少大きいように思われる. これは他の波形についてもみられる共通した傾向となっている.

## 6. 結 論

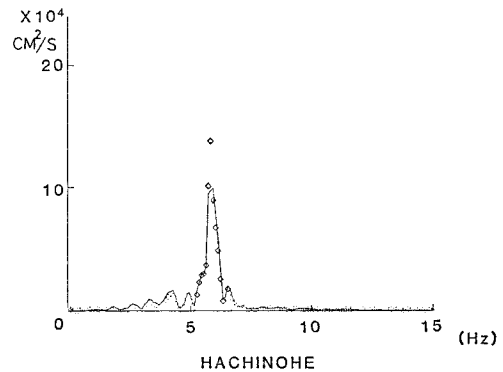
地震時に海洋構造物に作用する流体力は, 従来一様流や波浪に対する Morison の公式に基づいて算定されてきた. しかし, 地震時の海洋構造物の応答から推測される K.C. 数は比較的低い領域にあって, Morison の公式がそのままではまるとは限らない. 本研究はこのような領域で, 円柱体に作用する流体力を自由振動実験, 正弦加振実験, 地震波入力実験を通じて解明したものである. 本研究の結果得られた結論は以下のようにまとめら



(a) Fourier Spectrum ( $H/L=0$ )



(b) Fourier Spectrum ( $H/L=2/4$ )



(c) Fourier Spectrum ( $H/L=4/4$ )

Fig. 17

れる.

(1) 質量係数  $C_M$  については, 円柱体が自由振動している状態ではポテンシャル流理論から得られる  $C_M = 1.0$  の値を示す. しかし, 強制的に円柱が振動させられている状態では, 質量係数  $C_M$  は強制振動数によって変化し, 一般に振動数が高い領域では  $C_M$  の値は大きい.

(2) 等価減衰係数  $\bar{C}$  については自由振動, 強制振動にかかわらず, 振動振幅の影響は小さく, むしろ一定

値をとる。振動数の影響については、入力振動数が構造体の固有振動数の 1.25 倍までは一定とみなすことができる。以上の結果を抗力係数  $C_D$  に変換すると、自由振動、強制振動ともに、 $C_D$  は Reynolds 数と K.C. 数の積 ( $=2\pi\omega A_z^2/\nu$ ) の 1/2 乗に反比例する。この結果は剝離のない円柱体に作用する流体力について求めた Batchelor<sup>7)</sup> の説と一致している。

(3) 強震計記録による過渡振動実験に対し、 $C_M, \bar{C}$  の振動数依存性を考慮したシミュレーション解析を行った結果、応答波形、フーリエスペクトルともに、実測値と計算値でおよそ同様の結果を得た。したがって、2., 3. で述べた流体抵抗機構を水中構造物の地震応答に適用しても実用上問題は無いものと考えられる。

## 7. あとがき

本研究を遂行するにあたって、筑波大学構造工学系元教授 田宮 真先生、同教授 白山和久先生、元講師 藤野陽三先生から有益な教示をいただいた。ここに記して謝意を表す次第である。本研究は文部省科学研究費(00542045)の助成を得て行ったものである。

### 参 考 文 献

- 1) Keulegan, G.H. and L.H. Carpenter : Forces on Cylinders and Plates in an Oscillating Fluid, J. Res. Nat. Bur. Standard, LX No. 5, 1958.
- 2) Sarpkaya, T. : Periodic Flow about Bluff Bodies Part. 1. Forces on Cylinders and Spheres in a Sinusoidally Oscillating Fluid, Naval Postgraduate School, Calif., Rep. No. NPS-59, SL. 74091, 1974.
- 3) Sarpkaya, T. : In-line and Transverse Forces on Cylinders in Oscillating Flow at High Reynolds Numbers, Jour. of Ship Research, Vol. 21, No. 4, Dec. 1977.
- 4) Shin, C.C. and H.J. Buchanan : The Drag on Oscillating Flat Plates in Liquids at Low Reynolds Numbers, Jour. of Fluid Mechanics, Vol. 48, Part 2, 1971.
- 5) Ramberg, S.E. and J.M. Niedzwecki : Horizontal and Vertical Cylinders in Wave, Ocean Eng. Vol. 9, 1982.
- 6) 田中紀男・池田良徳・姫野洋司・富田 廉 : 振動する二次元柱体に働く粘性流体力の計測, 関西造船協会誌, 第 179 号.
- 7) Batchelor, G.K. : An Introduction to Fluid Dynamics, Cambridge University Press, 1970.
- 8) Malhotra, A.K. and J. Penzien : Response of Offshore Towers to Earthquake Excitation, Civil Engineering in the Ocean-II, pp. 65~77, 1971.
- 9) Okumura, T. and T. Nishioka : Response of Off-shore Structures by Random Waves and Estimation of Wave Force, 19th National Sym. on Bridge and Structural Eng. JSCE & AIJ, 1974.
- 10) Shinozuka, M., C. Yun and R. Vaicaitis : Dynamic Analysis of Fixed Offshore Structures Subjected to Wind Generated Waves, J. Struct. Mech., 5(2), 1977.
- 11) Malhotra, A.K. and J. Penzien : Nondeterministic Analysis of Offshore Structures, J. Eng. Mech. Div., ASCE, EM 6, Dec. 1970.
- 12) Ozaki, M. and S. Hayashi : Earthquake Resistant Design of Offshore Building Structures, IEEE Jr. of Oceanic Engineering, Vol. OE-3, No. 4, Oct. 1978.
- 13) 桜井彰雄 : 水中に立てられた柱状構造物の振動, 土木技術 16 巻, 6 号, 1961.
- 14) 後藤尚男・土岐憲三 : 水中構造物の振動と耐震設計に関する基礎的研究, 土木学会論文集 100 号, 1963.
- 15) 岩崎敏男・三枝 翹 : 水中にある柱状構造物の振動時仮想質量の実験, 土木技術資料, 1968-2.
- 16) Sugiyama, T. and M. Ito : Dynamic Characteristics of Structures in Water, Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 30, 1981.

(1983.3.26・受付)