

固定式海洋構造物の耐震性に関する基礎的研究

(第2報:実験)

高橋和雄* · 岡林隆敏* · 西ノ首英之**
花井正実*** · 有馬文昭**** · 永藤正敏*****

Basic Investigation on Aseismic Properties of Fixed Ocean Structures (2nd Report: Experimental Approach)

by

Kazuo TAKAHASHI*, Takatoshi OKABAYASHI*, Hideyuki NISHINOKUBI**
Masami HANAI***, Fumiaki ARIMA**** and Masatoshi NAGAFUJI*****

Experimental studies on dynamic properties of a fixed ocean structure are presented by using vibration testing system. The purpose of the present paper is to check the accuracy of the analytical approach which neglects compressibility and internal viscosity of water. Three different experimental models are made to evaluate the effects of cross-sectional shape and mass of model. Calculated natural frequencies coincide with the experimental ones. This fact is not true for damping constant. It is necessary to consider damping effect due to surrounding water.

1. まえがき

固定式海洋構造物の耐震性を明らかにするにあつて、流体を完全に流体として取り扱ふと、流体は質量効果のみをもつ。このような取り扱い従来は橋脚などの耐震解析^{1), 2)}では一般に認められている。しかし、中空式の固定式海洋構造物のように流体の効果の大きい構造物にその仮定をそのままあてはめることは問題がある。構造一流体系の連成振動に及ぼす流体の粘性の影響などによる振動減衰も無視できないものと考えられ、実験による確認が必要である。しかし、流体中の構造物の固有振動性状についての詳しい実験的研究はあまり行われていない。そこで、本研究で理論解析³⁾と平行して、断面形状や質量の効果を変化させた模型を用いて自由および強制振動実験を行い、完

全流体としての解析の妥当性の検証および流体による減衰効果を明らかにするものである。

2. 実験装置

実験装置は、Fig. 1 に示すように、鋼製円形水槽、加振機、供試体、供試体支持台および測定装置により構成される。供試体支持台は、水槽本体と切り離され水漏れ防止用薄膜(軟質ポリ塩化ビニール)で連結されているために、支持台は加振のさいに自由に移動することができる。以下に使用機器の主要諸元を示す。

(1) 鋼製円形水槽 材質: SS-41
直径: 4,000mm
高さ: 1,530mm
板厚: 6mm

昭和61年4月30日受理

* 土木工学科 (Department of Civil Engineering)

** 水産学部 (Fisheries)

*** 広島大学工学部 広島県広島市 (Faculty of Engineering, Hiroshima University, Hiroshima City)

**** 住友建設技術研究所 東京都新宿区 (Research Laboratory of Sumitomo Construction Co., LTD., Shinjuku, Tokyo)

***** 構造工学科 (Department of Structural Engineering)

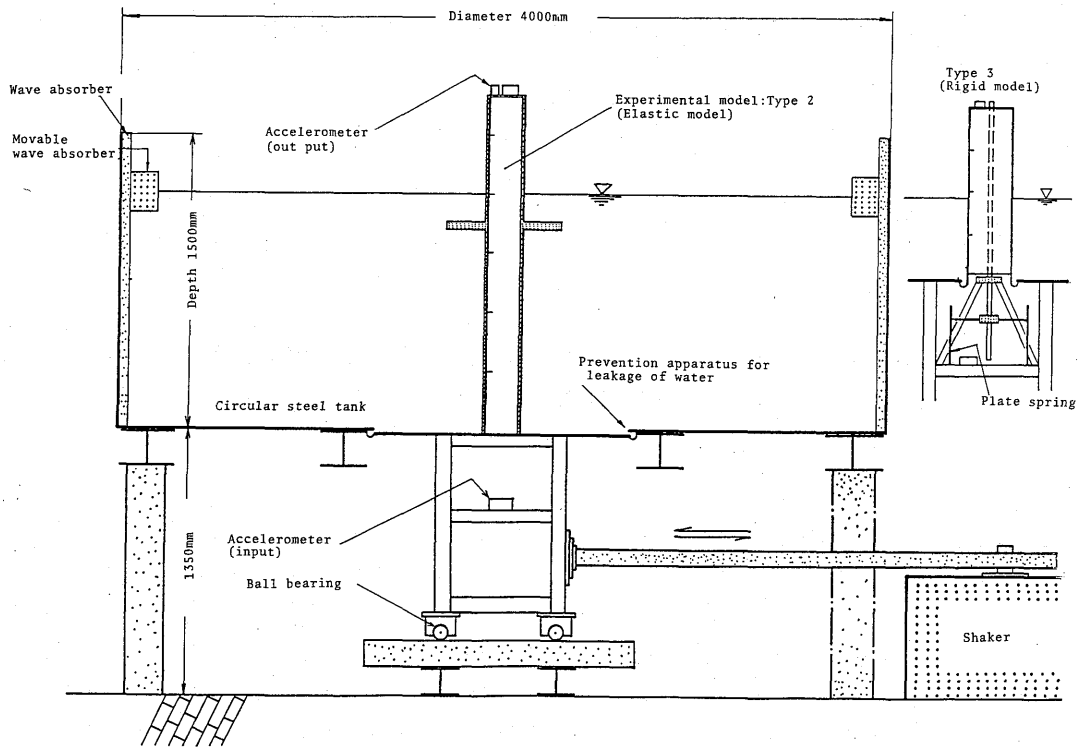


Fig. 1 Experimental apparatus

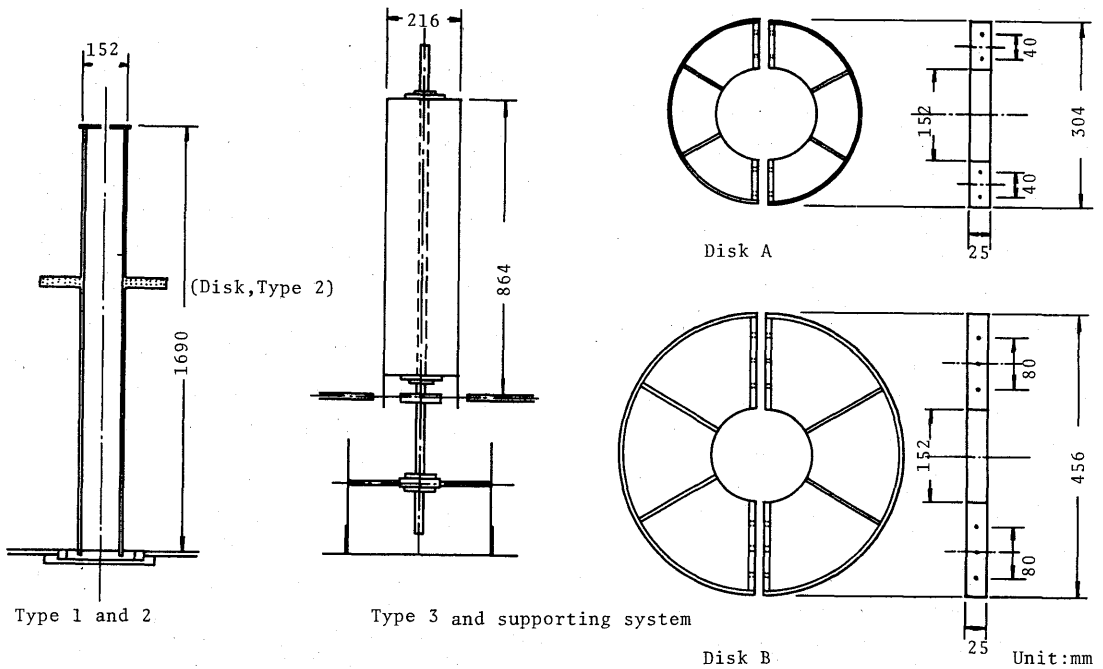


Fig. 2 Experimental models

なお、水槽の側面には反射波の干渉を防ぐために、ソフランを取り付けて水槽の内側に張った金網に固定した。さらに、水の表面周辺に移動式消波装置（MCナイロン）を取り付けて反射波の発生を押えるようにした。

(2)加振装置：正弦波，ランダム電磁式振動試験装置

最大加振力：300kg

最大加速度：100g

使用周波数範囲：2-400Hz

最大振幅：25mm P-P(peak)

本実験においては、2 Hz~20Hz程度の周波数領域で加振実験を行うために、振動台への周波数入力に加振機の発振器の代わりに、低周波発振器から行う。入力周波数の確認は、デジタルカウンターで読み取れるように配線した。

(3)供試体および供試体支持台

本実験では、次の3種類の供試体模型を用いる。

Type 1：等断面円形中空構造（アクリル製）

Type 2：変断面円形中空構造（アクリル製）

Type 3：等断面円形中空構造（ブリキ板製）

Type 1 と Type 2 は弾性変形を生ずる模型で、Type 3 は剛体模型である。したがって、剛体模型には固有振動数を調整する支持バネが必要である。

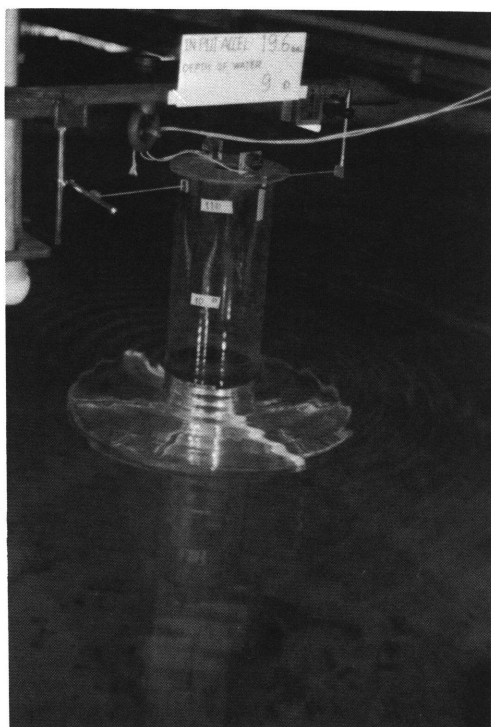


Photo. 1 Experimental model (Type 2)

(a)弾性変形模型（Type 1, 2）および支持台

Fig. 2-(a)に Type 2 (Type 1) の形状を示す。

これらの諸元は文献3)の Table 1 に示すとおりである。アクリル(PMMA)からなる円柱をPMMA円板226φ×25mmに固定し、さらに、316φ×13mmの鋼製の円形可動板に取り付けて用いる。なお、Type 2にはType 1の模型に下端から7割の高さに円盤が取り付けられている。円盤の内部は8枚のアクリル板を用いて補強されており、円盤は剛体とみなしてよい。Photo. 1に模型の全景を示す。

Fig. 1に示すように、Type 1 (Type 2)の供試体の支持台はそのまま水槽底面の可動底板（直径：1,200 mm，厚さ：6 mm，材質：SS-41）をも支持できる構造となっている。加振機からの入力、連結棒をかいしてこの支持台に伝えられる。支持台は弾性変形しないように剛性を高めており、そのベースに8個の自動調心玉軸受を取り付け、これを支える水中に据え付けられたH型钢（150×150×10mm）との摩擦抵抗を微小にしている。また、自動調心玉軸受と支持台の4本の支柱に付けられたコイルバネによって偏心入力とならないように工夫している。

(b)剛体模型および支持台

Type 3は剛体模型で Fig. 2-(b)に示すとおりである。模型の諸元は Table 1のとおりで、供試体の重量および剛性の確保の点からブリキ板（SPG-2C）

Table 1 Dimensions of rigid model (Type 3)

Material	SPG-2G
Length L (mm)	864
Outer diameter D (mm)	216
Thickness t(mm)	4
Weight (kg)	3.015

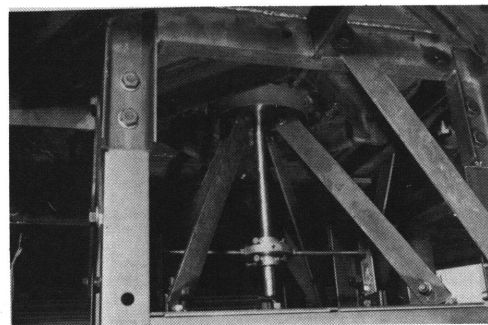


Photo. 2 Supports of the experimental model (Type 3)

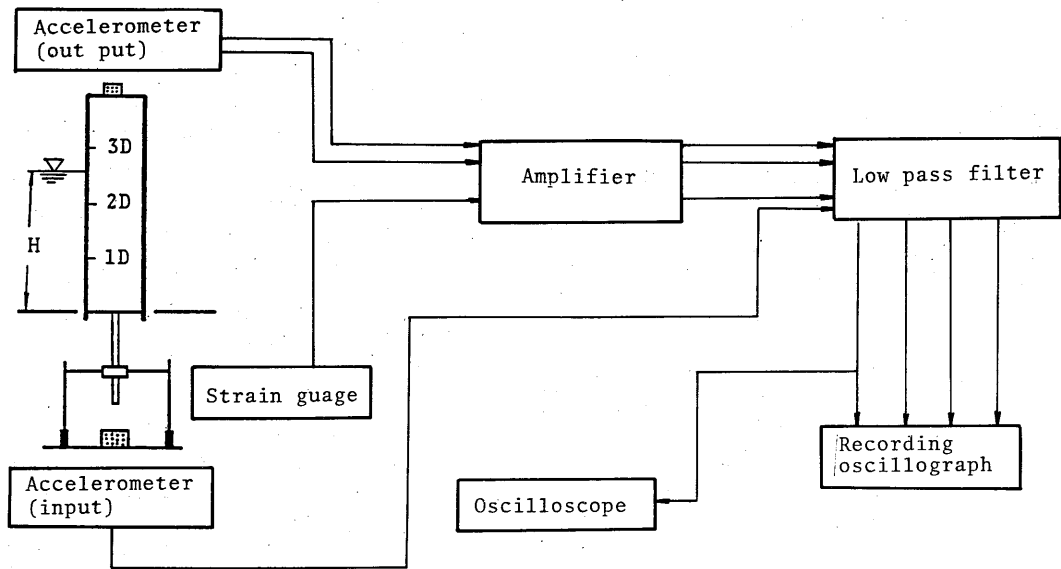


Fig. 3 Block diagram of measuring system

を使用した。模型の内部中央にはステンレス鋼管 (SUS 304 HTP, 長さ 144×0.5 mm, 外径 27.2 mm, 板厚 5.5 mm) を貫通させ、模型の頂部および下部をストッパーにて接合した。また、鋼管を円形可動板の中央の自動調心玉軸受に通し模型を支持する。さらに、ステンレス鋼管と板バネとバランススイート (0.92 kg) と連結棒 (13 ϕ mm) にて結合し、板バネによる復元力を供試模型に伝達する (Photo. 2)。

(c) 横振れ制御装置

入力加速度と直角方向に模型が振動するのを防ぐ目的から、模型の頂部に横振れ制御装置を取り付けた。この装置の取り付けにあたってはあらかじめこの装置が模型の基本振動特性に大きな影響を与えないことを確認した。

(4) 計測装置

Fig. 1 に示すように、供試体の頂部に加振方向とそれと直角方向に加速度計を取り付けて、供試体の振動加速度を計測する。また、供試体の支持台には入力加速度を検出するための加速度計を取り付けた。加速度計の定格は加速度 5 g である。実験の計測システムのブロックダイアグラムは Fig. 3 に示すとおりである。

3. 強制振動実験

(1) 弾性変形模型 (Type 1, 2)

空気中および各水深において、入力周波数を 3 Hz \sim 20 Hz の領域で変化させて、一定入力加速度の強制振動させる。入力加速度の決定に際して、供試体模

型が弾性変形内の振動振幅で行い、かつ、流体中で造波の乱れが生じない範囲の入力加速度を設定した。その結果、本実験では 0.01g (9.8 gal), 0.02g (19.6 gal) および 0.03g (29.4 gal) の加速度で強制振動実験を行った。また、入力周波数の設定にあたっては、共振振動

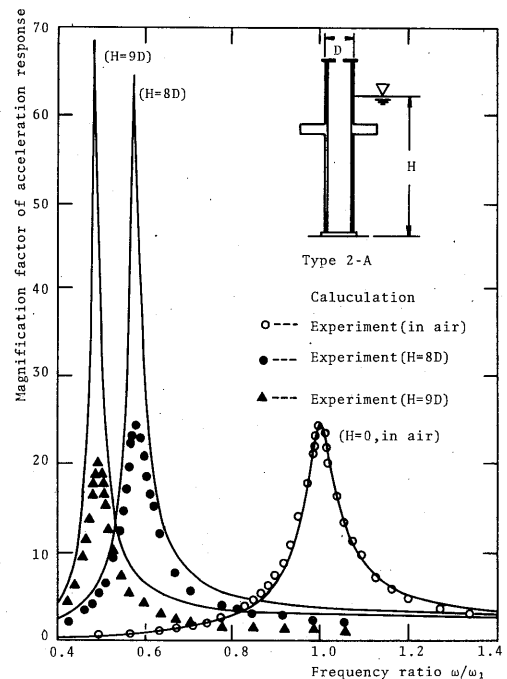


Fig. 4 Relative acceleration responses of the elastic cylindrical tower with various water levels (Type 2-A)

数近傍では0.005Hzの周波数きざみで正確な共振振動数を追跡した。他の振動数領域では0.5Hz~1.0Hzきざみで応答加速度を計測した。Fig. 4 は Type 2-A の模型の各水深における応答倍率をプロットしたものである。このアクリルモデルでは構造物（模型）自体の減衰が支配的であるために、流体による減衰効果の評価がし難い。このために、29.4gal以下の入力レベルでも同じ結果が得られ入力レベルによる加速度の応答倍率の変化は取り出すことはできなかった。Table 2, 3にType 1 と Type 2 の共振振動数と加速度の応答倍率を示す。表における共振振動数は1次の固有振動数とみなすことができる。この実験によって得られた固有振動数と理論値との比較は文献3)に示したとおりで、両者がいずれの場合にもよく合致することが確認されている。しかし、Fig. 4に示したように、加速度の応答倍率については実験値と理論値との間には大きな差がある。この不一致は振動減衰に関係するので、減衰が小さいブリキ板からなるType 3について検討する。

(2)剛性模型 (Type 3)

流体による減衰効果を調べるために、構造物自体の減衰効果が小さいType 3模型による強制振動実験を

Table 2 Dynamic properties of forced vibration (Type 1, Input acceleration 29.4gal)

Water level	Resonant frequency	Acceleration response
0	15.49 (Hz)	31.25
7.0 D	10.30	28.93
8.0 D	8.65	24.04
9.0 D	7.30	23.01

Table 3 Dynamic properties of forced vibration (Type 2, Input acceleration 29.4gal)

Disk	Water level	Resonant frequency	Acceleration response
A	0	14.02	25.00
	7.5 D	8.95	25.73
	8.0 D	8.30	25.22
	8.5 D	7.60	23.77
	9.0 D	7.00	20.59
B	0	12.94	27.00
	7.5 D	8.18	23.22
	8.0 D	7.73	22.92
	8.5 D	7.20	22.47
	9.0 D	6.68	21.18

行った。入力加速度を0.003g(2.94gal), 0.005g(4.9gal), 0.006g(5.88gal), 0.008g(7.8gal)および0.01g(9.8gal)とし、そのときの表面波の状況を観察しながら流体力の影響を評価する。Photo. 3, 4は共振時の表面波の状況を示したものである。入力加速度が比較的小さい場合には供試体の共振振動数と同じ振動数で波が発生する (Photo. 3)。しかし、入力加速度が大きい場合には表面波の造波に乱れが生じている

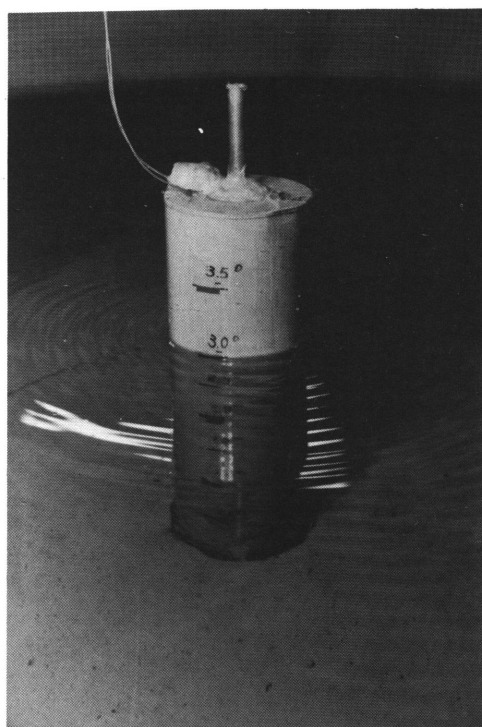


Photo. 3 Wave form at input acceleration level 4.9 gal



Photo. 4 Wave form at input acceleration level 9.8 gal

(Photo. 4)。この場合、応答加速度が入力加速度の小さいときの値に比較して急激に低下する。水深 $H = 0, 2D, 3D$ の応答曲線を Fig. 5 に示した。また、各水深における固有振動数、加速度の応答倍率および減衰定数を Table 4 に示した。表に空気中の構造物の減衰力を用いて計算された加速度の応答倍率と減衰定数が併記されている。

理論解析結果では、構造物の水没体積の増加とともに

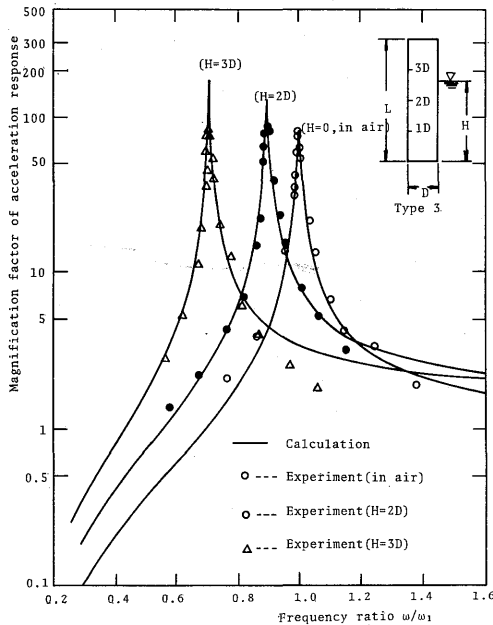


Fig. 5 Relative acceleration responses of the rigid cylindrical tower with water levels (Type 3)

Table 4 Dynamic properties of the tower obtained by damped free vibration (Type 3)

Water level H	Initial displacement	Natural frequency	Damping constant
0	1 mm	10.52(Hz)	0.780%
	3	10.48	0.744
	5	10.45	0.711
1D	1	10.48	0.920
	3	10.45	0.921
	5	10.37	0.895
2D	1	9.51	0.974
	3	9.40	0.982
	5	9.37	0.952
3D	1	7.54	1.020
	3	7.46	1.050
	5	7.42	1.050

に応答加速度が増大して、構造物の減衰定数があたかも減少したような挙動を示す。これは文献(3)の式(12)に示したように流体中にある構造物の見掛けの減衰定数 h は $h_1 / \sqrt{1 + B_1 / M^*}$ によって評価されるために小さくなることによるものである。一方、実験結果によれば水没体積の増加とともに応答振幅が減少して行く。すなわち、流体中であたかも構造物の減衰特性が増大したかの挙動を示す。これは理論に含まれていない流体の減衰によるものである。そこで、構造物の粘性減衰の他に流体の粘性抵抗による減衰力を考慮する。粘性減衰による減衰力として速度の自乗に比例した抗力を運動方程式に採用することにする。流体中で振動中に物体に作用する抗力は次式で表わすことができる。

$$P_{CD} = \frac{1}{2} C_D \rho A |V| V \quad (1)$$

ここに、 ρ : 水の単位体積重量、 A : 水没投影断面積、 V : 物体の運動速度、 C_D : 抗力係数

円柱断面の抗力係数 C_D はレイノルズ (Reynolds) 数の影響を顕著に受けるが、この他に円柱の表面粗度、形状比、流体の流動状態、流体の速度によって異なる。レイノルズ数⁴⁾は流体の慣性力 ($\rho V^2 D^2$) と粘性力 ($\mu V D$) との比として定義される。

$$\text{すなわち、} R_e = VD / \nu \quad (2)$$

ここに、 $\nu = \mu / \rho$: 動粘性係数、 μ : 粘性係数、 ρ : 流体の密度、 D : 物体の代表寸法 (直径)

構造物が流体中で弾性変形する場合、レイノルズ数は固有振動形によって高さ (水深) 方向に変化する。したがって、抗力係数も高さ方向に変化するはずである。しかしながら、運動方程式を簡略化するために高さ方向に一樣と仮定する。

本実験に用いた供試模型のレイノルズ数は

$$R_e = 2.5 \times 10^3 (2D) \sim 14 \times 10^3 (4D)$$

程度と考えられる。

Fig. 6 は静止流体中における円柱状構造物の振動時の抗力係数 C_D と速度の関係をレイノルズ数 R_e を

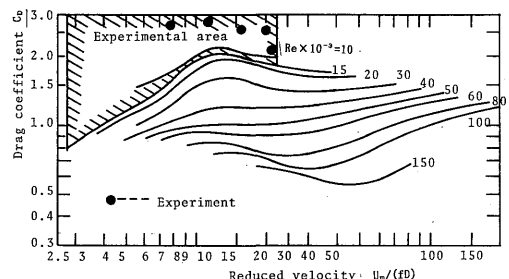


Fig. 6 Drag coefficients vs reduced velocity for right circular cylinder

パラメーターに示したものである。本実験における領域は図の斜線部のとおりである。

速度の自乗に比例した抗力を加えたときの1自由度系構造物の運動方程式は次のように書き改められる。

$$[M_1^* + B_1] \ddot{Y}_1(t) + 2M_1^* h_1 \omega_1 \dot{Y}_1(t) + \omega_1^2 M_1^* Y_1(t) = -[A_1 + B_0] \ddot{U}_g(t) - P_{CD}^* \quad (3)$$

ここに、

$$P_{CD}^* = \int_0^{H_s} C_D \rho D | \dot{Y}_1(t) \phi_1(z) + \dot{U}_g(t) | (\dot{Y}_1(t) \phi_1(z) + \dot{U}_g(t)) dz$$

P_{CD}^* : 抗力に関する一般化荷重, $\phi_1(z) = z/H_s$: 1次固有振動形(剛体変形), H_s : 模型の高さ
式(3)の運動方程式を Runge-Kutta-Gill法を用いて時間応答解析を行う。十分時間が経過したのちの定

常解を求めれば、これより加速度の応答倍率が明らかになる。

Table 5に水没体積の変化に伴う推定抗力係数 C_D の変化を示す。入力レベルおよび水深によって抗力係数 C_D は変化する。これらの値は通常用いられる一様流体中の $C_D = 1.2$ よりもかなり大きな値となった。入力加速度が大きいほど水没体積が大きくなるほど、抗力係数は減少する傾向を示す。

4. 自由振動実験

強制振動実験で把握が困難な流体中の構造物に作用する減衰の大きさを、自由振動実験によって評価する。自由振動実験は供試体の頂部に弾性域内の初期変位

Table 5 Dynamic properties obtained by forced vibration (Type 3)

Water level	Exp.			Analyt.		
	Resonant frequency	Acc. response	Damping constant	Resonant frequency	Acc. response	Damping constant
0	10.43 (Hz)	77.30	0.74%	10.43 (Hz)	76.47	0.67%
1D	10.36	76.26	0.92	10.32	87.99	0.66
2D	9.36	88.67	0.98	9.33	128.23	0.60
3D	7.39	83.71	1.05	7.39	174.42	0.48
4D	5.53	58.01	1.14	5.52	210.82	0.35

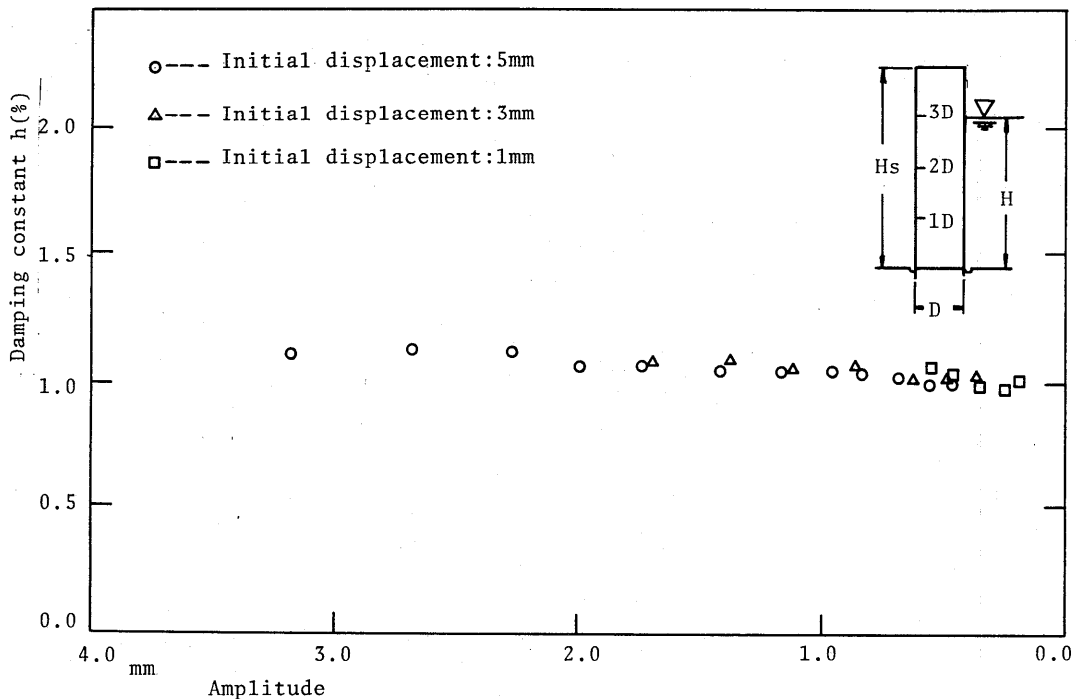


Fig. 7 Damping constants from damped free vibration(Type 3)

(0.1mm, 0.3mm, 0.5mm) を与えて、瞬時に除荷して減衰自由振動を生じさせる。水深をパラメータに、供試体頭部にある加速度計によって振動履歴を記録する。各水深とも5回づつの減衰自由振動の記録をとり、対数減衰率から減衰定数と振幅との関係を次式から求める。

$$h = \ln|y_m / y_{m+1}|$$

: 対数減衰率, y_m : m番目の振幅, y_{m+1} : m+1番目の振幅

Fig. 7 に水深 3 D の場合の見掛けの減衰定数 h と振幅 y_i (mm) との関係を示した。図のように本実験で

用いた初期変位の範囲内では減衰の振幅依存性は見受けられず、一定値を保つ。水深に伴う減衰定数の変化を Table 6 に示す。水没体積が増加すると見掛けの減衰定数はわずかに大きくなる。なお、空気中および流体中とも固有振動数は初期振幅が増大するとわずかに減少する傾向にある。

次に流体の状態が減衰作用に及ぼす効果を調べるために定常振動状態すなわち流体に乱れがある場合の減衰作用を調べる。加振機の入力スイッチを瞬時に切つて、自由減衰振動の振幅から減衰の大きさを評価する。

Table 6 Comparisons of relative acceleration responses

() : drag coefficient

▲ : with disturbance of wave generation

Water level	2.94gal		4.90gal		5.88gal		7.48gal	
	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.
0	77.0	74.8	71.8	72.8	72.9	74.8	81.3	74.8
2D	87.0	87.9 (7.25)	88.9	88.6 (4.33)	88.7	87.2 (3.88)	86.7	88.8 (2.68)
3D	81.6	85.5 (4.35)	82.7	82.0 (2.96)	83.7	80.9 (2.56)	▲54.7	60.9 (2.10)
4D			▲56.9	56.5 (3.30)	▲58.0	57.4 (2.65)	▲60.0	56.1 2.10

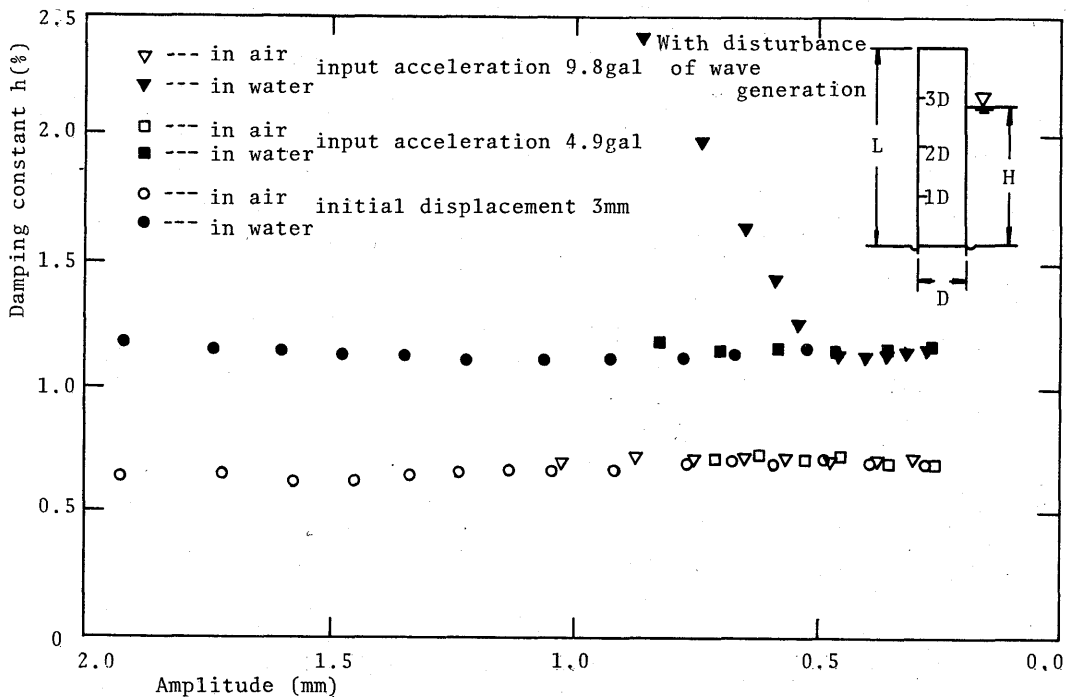


Fig. 8 Damping constants from damped free vibration after forced vibration(Type 3)

この結果、流体が微動の状態であっても静止中と同じ結果が得られた。しかし、Fig. 8に示すように流体の表面に造波の乱れが生じている場合には、見掛けの減衰定数は大きくなる。したがって、自由表面において造波に乱れがある場合には、造波抵抗によるエネルギー散逸を考慮しなければならない。

5. まとめ

本研究は流体中の構造物の振動実験を行い、実験結果を解析結果と比較したものである。得られた結果をまとめると、

- (1) 流体中の構造物の固有振動数は、水没体積が増加するに伴って減少する。動水圧を波動方程式から求めた固有振動数は実験値とよく一致する。
- (2) 流体中の構造物の減衰力は、空気中のそれよりも大きくなる。この傾向は水没体積の増加に伴って増大する。一方、理論解析より得られた見掛けの減衰定数は水没体積の増加に伴って減少する。すなわち、流体による減衰項を考慮しなければ、応答を推定することができない。
- (3) 運動方程式に速度の自乗に比例する抗力を考慮したところその抗力係数は、一様流体中の値よりも大きい。

また、この値は一定ではなくレイノルズ数および構造物の速度によって変化する。

(4) 流体による減衰効果は、かかる微小振動においては振動への依存性は微小であり速度に比例した減衰力が卓越する。

(5) 自由表面における造波の乱れは、構造物の減衰効果を増大させる。したがって、造波の乱れを生じる振幅では、造波抵抗によるエネルギー散逸をも考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 後藤・土岐：水中橋脚の振動と耐震設計に関する基礎的研究，土木学会論文集，No. 100，昭和38年，pp. 1～8
- 2) 小坪：だ円形水中橋脚に働く地震動とその弾性振動，土木学会論文集，No. 120，昭和40年，pp. 14～24
- 3) 高橋・岡林・西ノ首・花井・有馬：固定式海洋構造物の耐震性に関する基礎的研究（第1報：理論解析），長崎大学工学部研究報告，Vol. 16，No. 27，昭和61年7月，pp. 143～150
- 4) 岡内・伊藤・宮田：耐風構造，丸善，1977

