

固定式海洋構造物の地震応答に関する基礎的研究（その4）

—— 1 質点モデルのランダム波入力について ——

中 村 嶽 竹 本 靖
武 田 寿 一 安 楽 秀 嶽

Study on Fixed Offshore Structures Subjected to Earthquake Motion (Part 4)

—— One-Mass Model Forced by Random Waves ——

Takashi Nakamura Yasushi Takemoto
Toshikazu Takeda Hidetake Anraku

Abstract

This report concerns a fundamental study on fixed offshore structures subjected to earthquake motion. A one-mass cylindrical model was adopted for experiments and subjected to random wave input.

In Fourier analyses, the natural period of the model is prolonged proportionally to the increase of the volume submerged in water. The natural period of completely submerged model at maximum depth in water becomes 1.22 times long compared with the value when it is not submerged at all.

The added mass obtained from the extension of the natural period agrees well with that calculated using the measured value of the water pressure, and the added mass coefficient becomes about 0.7 when the model is completely submerged. This is almost the same value as for harmonic wave input. In the analysis, an increase in damping due to the drag force of water was assumed and the drag coefficient value was more than 1.3 as determined by hydraulics and harmonic wave input experiments.

In designing a fixed offshore structure, it is possible to estimate its response during earthquake by the lumped-mass model method considering added mass and a drag coefficient.

概 要

固定式海洋構造物の地震時に示す挙動の基礎資料を得る目的で、柔な支持構造を有する1質点円筒モデルのランダム波入力による振動実験を行なった。

フーリエ解析によって求めた固有周期の値は、ほぼ水没体積に比例して伸び、空気中に比べると、供試体が完没した最大水深時には1.22倍の値となった。この固有同期の伸びを付加質量によるものとして求めた値と、実測動水圧から求めた付加質量の値は、ほぼ等しく最大水深時の質量係数の値は約0.7となった。これは、正弦波入力による定常振動時とほぼ同じ値である。また、水中の振動時の減衰の増大を、水の抗力によるものとして、シミュレーション解析を行なって得た抗力係数の値は、ややばらつきが見られ、水理実験や、正弦波入力定常振動時に得られている値1.3より、少し大きな値となった。

以上のことより、水中構造物の設計に際して、構造物を質点系に置換し、適当な質量係数、抗力係数を採用することによって、地震時の応答を推定することが可能であると思われる。

1. 序

前報¹⁾²⁾³⁾において、固定式海洋構造物の地震応答に関する基礎的資料を得る目的で、海洋構造物によく用いられる円筒形の1質点および2質点モデルを対象として、

水槽の大きさと形状、水深、入力をパラメーターとした、正弦波入力による振動実験を行ない、水中構造物の減衰や付加質量、抗力係数等について、一部解析的な考察も加えて、検討を行ってきた。

本報では、主に、1質点モデルについて、ランダム波

入力の変動実験および解析を行ない、本実験とほぼ同一な寸法、形状の正弦波入力モデルと比較し、検討した結果を報告する。

2. 振動実験

2.1. 実験装置

実験装置は、図-1に示すように、供試体、水槽、大型振動台で構成されている(写真-1参照)。

供試体は、図-2に示すような、鋼製円筒(直径190.7mm、高さ265mm、重さ9.62kg)を、2枚の板ばね(材質SM50、引張試験によるヤング係数 $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、弾性限界約 $2,000 \mu$)で支持した1質点モデルである。

水槽は、直径4.0m、深さ1.5mの鋼製の円形水槽で、水槽には入力が行なわれないようにした。また、その内壁には、消波装置を施した。

大型振動台⁴⁾上に、鋼管、鋼板で作製した支持台を据え付け、その上に供試体を取り付けた。

振動台と水槽との間には、漏水を防ぎ、かつ、フレキシブルに動けるように、ゴムシートでシールを行ない、その周りを金網で囲んで、水圧に耐えるようにした。また、入力の際に、振動台と水槽間の変位によって生じる水の移動の影響を減少させるために、支持台の上に、鋼板製の円形プレートのつばを取り付けた。

2.2. 実験方法

図-2に示すように、水深をパラメーターにして、供試体の水没体積を変化させ、大型振動台より、変位step波(振動台を瞬間的に動かして衝撃を与え、供試体に自由振動を生ぜしめる。これにより、その水深での固有同期、減衰が簡単に求められる。)およびランダム波(EI-Centro, Taft, 八戸の地震波)を入力した。入力の大きさは、供試体支持ばねの歪が、弾性限内に収まるようにした。

2.3. 測点および測定計器

図-1に測点の位置と測定計器を示す。実験測定データは、全てデータレコーダーに記録し、A~D変換を行なって、計算機で処理した。

なお、上述のランダム波入力モデルと比較するために、同じ材質で作製した、ほぼ同一寸法、形状の1質点モデルを用いて、正弦波入力(小型振動台使用、実験装置および方法は、前報(その1)¹⁾と同じ)の実験および解析を行なった。以下、これを正弦波モデルと呼ぶ。

3. 実験結果および解析

3.1. 実験結果

前報¹⁾と同じ手法により、正弦波モデルの解析を行ない、ランダム波モデルについては、スペクトル解析によって、実験データ処理および解析を行なった。

- ①加速度
- ②速度
- ③変位
- ④供試体加速度計(東京測器AMS-5型)
- ⑤供試体支持ばね歪(東京測器歪ゲージWFLA-6)
- ⑥および供試体変位
- ⑦供試体水圧計(ST研究所PM10-02型)
- ⑧波高計(計測技研SW-201型)

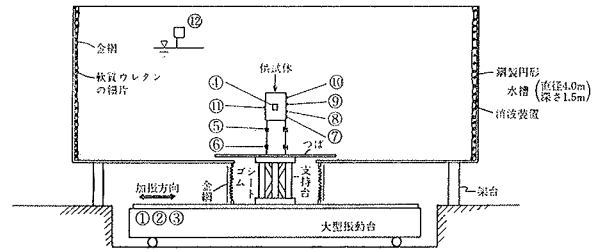


図-1 実験装置および測点概略図

C-1-7 (最大水深時) W.L. 58.5cm

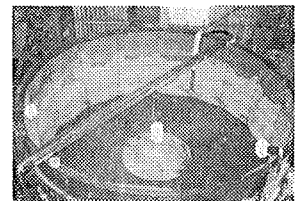
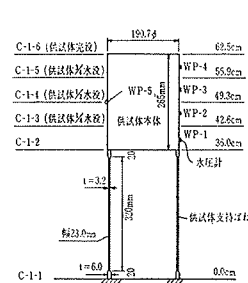


図-2 供試体および水深 パラメーター 写真-1 実験装置全体

実験名	水深 (m)	水没体積 A (cm ³)	水没体積 V (cm ³)	固有同期 T (sec)	ばね定数 K (kg/cm)	総質量 (kg) M+M ₀	総質量 W+We (kg)	付加質量 (kg) M ₀	付加質量 W ₀ (kg)	減衰係数 C _d
C-1-1	0.0	-	-	0.212	8.696	0.009816	9.62	-	-	-
C-1-2	36.0	-	-	0.212	8.696	0.009816	9.62	-	-	-
C-1-3	42.6	129.0	1892.0	0.214	8.755	0.01019	9.99	0.000378	0.37	0.159
C-1-4	49.3	253.0	3765.0	0.224	8.814	0.01118	10.99	0.001565	1.34	0.274
C-1-5	55.9	379.0	5677.0	0.233	8.873	0.01215	12.20	0.002538	2.59	0.425
C-1-6	62.5	505.0	7509.0	0.248	8.933	0.01324	13.66	0.004123	4.01	0.574
C-1-7	58.5	505.0	7509.0	0.258	8.993	0.01504	14.74	0.005222	5.12	0.676

表-1 ランダム波モデル実験結果

実験名	固有同期 T (sec)	ばね定数 K (kg/cm)	総質量 (kg) M+M ₀	総質量 (kg) W+We	付加質量 (kg) M ₀	付加質量 (kg) W ₀	減衰係数 C _d	ミレージン解析			
								入力振幅 (g)	入力振幅 (μ)	減衰係数 C _d	
C-1-3(正弦波)	0.207	8.753	0.009838	9.70	-	-	0.354	17.27	4.828	-	
C-1-31 *	0.209	-	-	-	-	-	0.7111	19.25	4.753	-	
C-1-3(ランダム波)	0.212	8.757	0.01044	10.00	0.00512	0.53	0.281	0.5048	13.33	4.715	3.5
C-1-4(正弦波)	0.221	8.755	0.01042	11.19	0.01512	1.49	0.314	1.039	19.37	4.523	3.8
C-1-5(正弦波)	0.233	8.753	0.01097	12.52	0.02072	2.87	0.458	1.224	19.25	4.291	3.8
C-1-6(正弦波)	0.245	8.743	0.01171	14.03	0.02472	4.23	0.573	1.193	19.28	4.055	3.6
C-1-7(正弦波)	0.253	8.743	0.01221	14.91	0.02912	5.21	0.658	1.059	19.25	3.815	3.3

表-2 正弦波モデル実験および解析結果

表-1にランダム波モデルの実験結果、表-2に正弦波モ

デルの実験および解析結果を示す。

同じ材質、寸法、形状であるにもかかわらず、両モデルの固有周期、減衰定数等に若干の差が見られるのは、ランダム波モデルは大型振動台、正弦波モデルは小型振動台を用いた等の実験条件が異なるために生じたと思われる。

以下、各項目について、ランダム波と正弦波モデルとを比較し、検討を行なって見た。

(1) 固有周期および質量係数

ランダム波モデルについては、図-3に示すような、実験の入力および応答加速度より求めたレスポンスパワースペクトルがピークを示すときの振動数より固有周期を求めた。また、図-4に示すような、実験の応答加速度記録の自己相関係数の周期的な時間ずれからも求めたが、両者は良く一致していた。この方法で求めたランダム波モデルの固有周期は、入力(変位step波、El-Centro, Taft および八戸地震波)による差は、ほとんど見られなかった。

正弦波モデルについては、前報¹⁾と同様に、最大加速度応答倍率を示す振動数より求めた。

図-5に、その結果をまとめたが、両モデル共、水没体積に比例して固有周期は伸びている。全体的にランダム波モデルの方が固有周期の値は、やや大きめであるが、空気中の固有周期に対する最大水深時の固有周期の比は、ランダム波モデルは、 $\frac{0.258 \text{ sec}}{0.211 \text{ sec}} = 1.223$ 倍、正弦波モデルが $\frac{0.253 \text{ sec}}{0.207 \text{ sec}} = 1.222$ 倍とほとんど等しい。

次に、水中での固有周期とばね定数より、前報¹⁾と同じ方法で求めた質量係数 C_M の値を図-6に示す。供試体が水面に出ている状態では、ランダム波モデルの方が小さな値をしめしているが、最大水深時には、ランダム波モデルは $C_M = 0.676$ 、正弦波モデルは $C_M = 0.688$ とほぼ等しくなっている。これは、供試体が水面に出ている状態での空気中と水中との固有周期の比が正弦波モデルの方が大きいため、最大水深時の固有周期の比は、両者ほぼ同じになるため、質量係数の値も、ほぼ等しくなっている。

(2) 減衰定数

減衰定数については、次項の解析で詳しく述べるが、図-7は、ランダム波モデルの変位step波入力による自由振動の変位振幅減衰比より求めた減衰定数と、正弦波モデルの最大応答倍率から求めた減衰定数を示したものである。前項で述べた様に、実験条件が異なるため、両者の減衰定数の値は異なるが、良く似た傾向を示す。両者共、空気中より水中の方が減衰が大きく、供試体が水面に出る波の発生が見られる状態での減衰の値は、とりわけ大きくなっている。

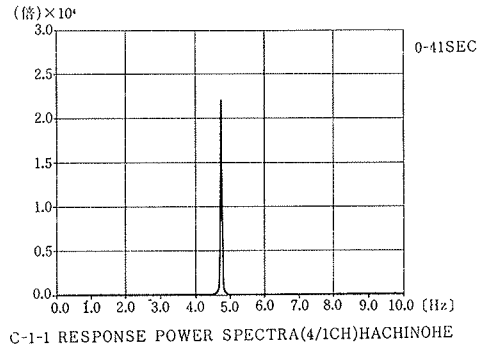


図-3 レスポンスパワースペクトル(空气中, 八戸波入力)

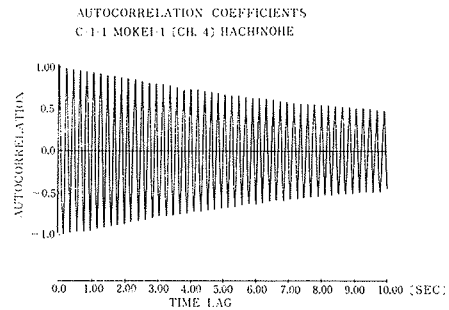


図-4 自己相関係数(空气中, 八戸波入力時の応答加速度)

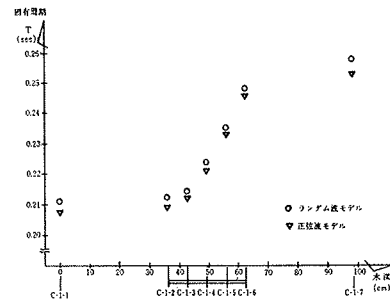


図-5 固有周期と水深との関係

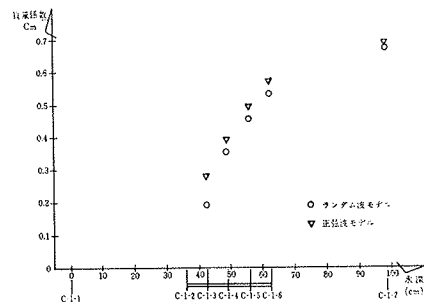


図-6 質量係数と水深との関係

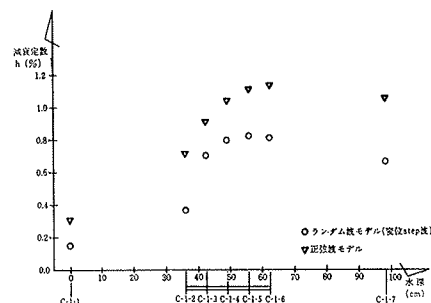


図-7 減衰定数と水深との関係

(3) 動水圧

図-8に、最大水深時の正弦波モデルおよび、ランダム波モデルの実測動水圧と FEM より求めた動水圧分布²⁾を示す。各測点でややばらつきはあるが、高さ方向に関し中央部が最大で、上下ほぼ対称となる動水圧分布をしており、動水圧の値は、モデルの応答加速度に、ほぼ比例している。

また、図-8に、水圧計 WP-1~4 による供試体の実測動水圧を、高さ方向に均一な圧力分布に平均化して、円周方向に積分し、その時の供試体の応答加速度で除して求めた付加質量の値も示す。この方法で求めた付加質量の値は、ややばらつきが、ランダム波モデルでは、0.0051~0.0054 kgsec²/cm、正弦波モデルでは 0.0055 kgsec²/cm となり、それぞれ、固有周期の伸びよりもとめた値、0.005223 kgsec²/cm (表-1)、0.005312 kgsec²/cm (表-2) と、ほぼ同じ値となっている。

図-9は、最大水深時の El-Centro 波入力時の実測波形を示したもので、動水圧は応答加速度と同じ波形で、その作用方向も、応答加速度と同位相であることが分る。

以上のことより、動水圧を付加質量に換算し、これが構造物と一緒に振動すると考える本解析法の妥当性が、実験的に確かめられている。

3.2. 解析結果

(1) 減衰定数

水中構造物の応答解析を行なうには、まず空気中の減衰定数を求めておく必要がある。前項の実験結果で、若干述べたが、ランダム波入力の場合には、減衰定数 h の求め方として以下のものが考えられる。

a) レスポンスパワースペクトルから求める方法⁵⁾

パワースペクトル (図-3) は、種々の振動数成分をもつ外力に対する構造物の応答の自乗を表わすので共振振動数 f_0 の両側で、共振時のパワーの 1/2 のパワーを示す振動数を f_1, f_2 ($f_2 > f_1$) とすれば、 $h \doteq \frac{A}{2} (1 - \frac{3}{8} A^2)$ 、かつ、 $A = \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 + f_1^2}$ で求まる。

b) 自己相関係数 (図-4) を求め、その振幅減衰比から求める方法⁵⁾

c) 記録した入力加速度の実験データを用いて、h をパラメータにして応答計算を行ない、実験値の最大加速度応答倍率に一致する h を決める (図-10)。

d) 上述の c) と同じであるが、次式で表わす実験値の応答加速度の平均パワー S に合うように、応答計算を行ない、h を求める (図-11)。

$$\text{平均パワー: } S = \sum_{i=1}^N (\alpha_i)^2 / N$$

ここに、 α_i : 絶対応答加速度

N: データサンプリング数

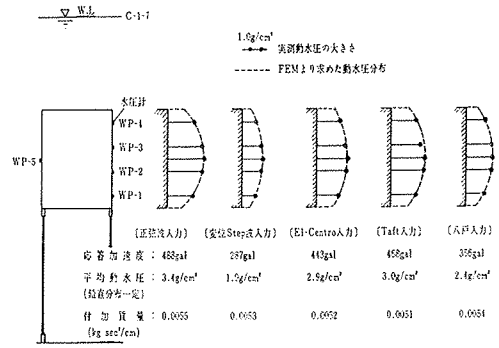


図-8 動水圧分布と付加質量 (最大水深時)

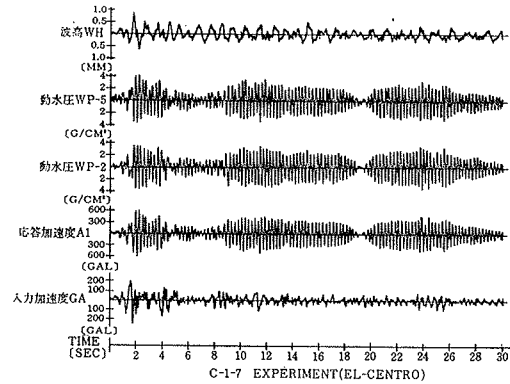


図-9 動水圧と応答加速度との関係 (最大水深時 El-Centro 波入力)

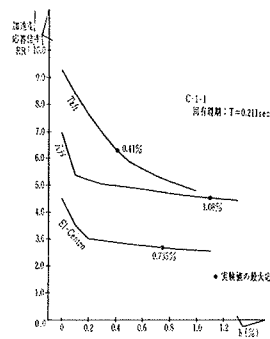


図-10 減衰定数と応答倍率との関係 (空気中)

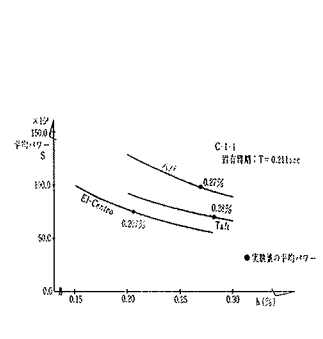


図-11 減衰定数と平均パワーとの関係 (空気中)

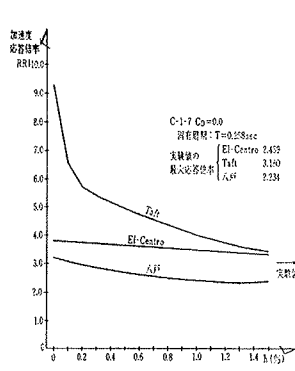


図-12 h をパラメータとした応答倍率 (最大水深時 $C_D=0.0$)

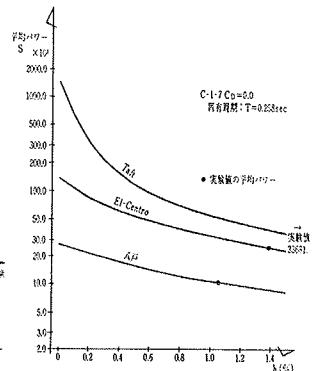


図-13 h をパラメータとした平均パワー (最大水深時 $C_D=0.0$)

実際に空気中の h を求めた結果では、a) の場合は、パワースペクトルのピークが非常に鋭くて精度が悪く、b) の場合には、入力波によって異なり、 $h=0.223\sim 0.419\%$ (変化 Step 波 0.223% , El-Centro 0.253% , Taft 0.419% , 八戸 0.255%) となった。c) の結果を図-10 に、d) の結果を図-11 に示す。

図-10によれば、応答倍率に合わせ方法では、 $h=0.41\sim 1.08\%$ と全体的に減衰定数が大きく、入力波によるばらつきも大きい。しかし、図-11によれば、平均パワーに合わせ方法では、 $h=0.207\sim 0.28\%$ と、溶接鋼構造物では妥当な値と思われ、ばらつきも小さい。

以上の事実をふまえ、また、図-10に示すように、空気中のランダム波入力の減衰定数が 0.2% 以上では、Taft 波入力の場合を除いて、減衰定数の変化が、加速度最大応答倍率にそう大きな影響を与えないことや、応答解析の波形と実測波形との比較によって、空気中のランダム波入力の減衰定数の値を、 $h=0.28\%$ とした。この減衰定数の値を用いて、応答解析によって最大加速度応答倍率を求めると、El-Centro では 2.947 倍(実験値 2.694 倍)、Taft では 7.046 倍(実験値 6.290 倍)、八戸では 5.031 倍(実験値 4.516 倍)の値になった。

なお、ランダム波モデルの変位 Step 波入力による自由振動解析では、実験の変位振幅減衰比から求めた減衰定数 $h=0.152\%$ を用いた。

(2) 抗力係数

前報¹⁾で述べたように、水中構造物の振動特性である固有周期の伸びは付加質量によるものとし、減衰の増大は水の抗力によるものとして、次式で表わす運動方程式をたて、シミュレーション解析により抗力係数 C_D を求めた。

$$(M+M_C)\ddot{X}+C\dot{X}+KwX = -\{(M+M_C)\ddot{y}(t)+D|\dot{y}(t)+\dot{X}|\dot{y}(t)+\dot{X}\}$$

ここに、 M : 構造物の質量、 X, \dot{X}, \ddot{X} : 構造物の変位、速度、加速度、 C : 減衰係数、 Kw : 水中のばね定数、付加質量: $M_C=C_M\cdot\rho\cdot V$ 、 C_M : 質量係数、 ρ : 水の密度、 V : 構造物の水没体積、 $\ddot{y}(t), \dot{y}(t)$: 地動加速度、速度、 $D=\frac{1}{2}C_D\cdot\rho\cdot A$ 、 C_D : 抗力係数、 A : 構造物の水没投影面積

図-12, 13 は、上式の水の抗力項を無視し ($C_D=0.0$) 全て減衰 h の増大で、水中構造物の地震応答を表現できるかどうかを調べたもので、図-12 は、 h をパラメータとした応答倍率、図-13 は、平均パワーを示す。図-12 で明らかなように、相当大きな h でなければ、実験値の応答倍率に合わないし、また、図-13 のように、平均パワーの場合には、八戸入力の場合でも、 $h=1.05\%$ と、空気中の $h=0.28\%$ の3倍以上の減衰定数に相当し、他

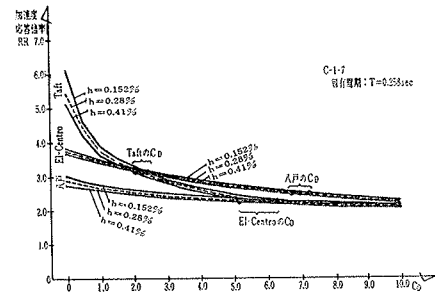


図-14 抗力係数と応答倍率との関係 (最大水深時、 $h=0.152\%, 0.28\%, 0.41\%$)

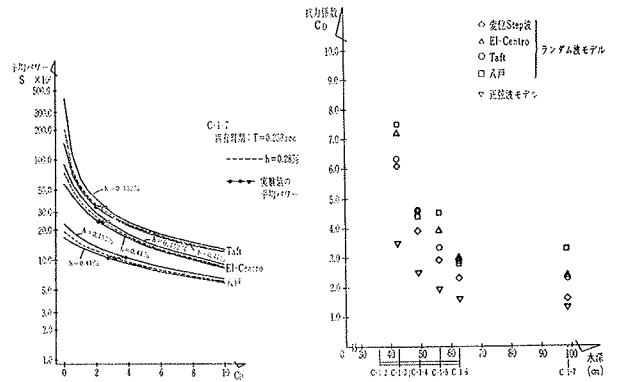


図-15 抗力係数 C_D と平均パワーとの関係 (最大水深時、 $h=0.152\%, 0.28\%, 0.41\%$)

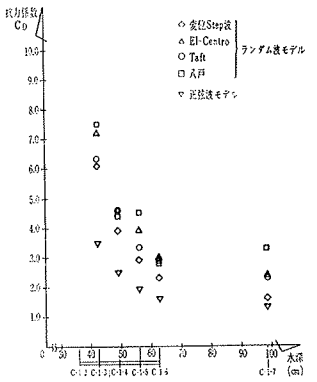


図-16 抗力係数と水深との関係 ($h=0.28\%$)

の入力波の場合には、更に大きな減衰を仮定しなければならない。

図-14, 15 は、減衰定数の変化に対する抗力係数のばらつきを調べる目的で、減衰定数 $h=0.152\%, 0.28\%, 0.41\%$ について、それぞれ実験値の応答倍率、平均パワーと比較したものである。両図共、 h に対する C_D のばらつきは無視し得る程度であるが、入力地震波によるばらつきは、図-14 の $C_D=2.1\sim 7.5$ 、図-15 で $C_D=2.0\sim 3.8$ と、やはり、平均パワーに合わせ方が、そのばらつきが小さくなっている。

以上のことにより、ランダム波入力に対する応答性状を検討する尺度として、応答加速度の平均パワーを用いることは、かなり有効であると思われる。

図-16 は、正弦波モデルおよび、ランダム波モデルについて、実測値の応答加速度平均パワーに合うように、シミュレーション解析を行なって求めた抗力係数 C_D を、水深をパラメータとして示したものである。これによると、供試体が水面に出ている、波の発生が見られる領域の C_D の値は大きく、供試体が完没した領域での C_D の値は小さくなる。正弦波モデルの C_D の値は全体的にランダム波モデルより小さい。また、ランダム波モデルの供試体が完没した場合の C_D の値は約 $2\sim 3$ となっている。

図-17は、最大水深時での Taft 波入力の場合の実測波形を示したもので、これと、図-18に示す $h=0.28\%$ 、 $C_D=2.3$ で解析した波形とは、良く一致していることが分る。

図-19は、解析によって求めた力のつりあいを示したものである。これによると、慣性力とせん断力は大きさはほぼ等しく位相は逆で、他の力よりもその値はかなり大きい。減衰力と水の抗力の位相は同じであるが、水の抗力の方が1桁大きく、また地動速度の影響で、減衰力の波形とはかなり異なっている。このことより、水中の地震応答を正確に求めるには、水の抗力項を考慮する必要があることが分る。

4. むすび

主に、円筒の1質点ランダム波入力モデルの振動実験および解析結果について述べ、ほぼ同じ正弦波入力モデルと比較して、検討を加えた結果を要約する。

(1) 固有周期、質量係数、動水圧について

寸法、形状や空気中の固有周期がほぼ同じモデルでは、入力(ランダム波入力非定常振動、正弦波入力定常振動)に関係せず、その水没体積の増大につれて、固有周期が伸び、最大水深時の固有周期は、空気中の1.22倍になった。この固有周期の伸びを、付加質量によるものとして、求めた付加質量と、実測動水圧より求めた付加質量は、ほぼ同じ値となり、この時の質量係数の値は、 $C_M \approx 0.7$ となる。水中でモデルに作用する動水圧は、モデルの応答加速度と同じ向きに働き、動水圧の大きさも、応答加速度に比例することを実験で確かめ、水中での振動特性である固有周期の伸びを、付加質量で表わせることを確認した。

(2) 減衰定数、抗力係数、解析結果について

ランダム波モデルの減衰定数や抗力係数を求めるため、いろんな手法を検討して、平均パワー(応答加速度の自乗平均)を用いた。

両モデル共、水中で減衰が増大し、モデルが水面に出た状態で、波の発生が見られる場合には、とりわけ減衰は大きくなる。この減衰の増大を水の抗力によるものとして、シミュレーション解析によって求めた抗力係数 C_D の値は、ランダム波モデルの最大水深時で、 $C_D \approx 2 \sim 3$ となり、正弦波モデルより大きな値を得た。

ランダム波モデルの水中での応答解析を行なって、水の抗力と減衰力を比較したが、水の抗力は、はるかに減衰力より大きく、水中の地震応答における減衰の増大を、すべて減衰定数で表わすには、かなり大きな減衰定数を仮定する必要があることが分った。

以上のことより、水中構造物の設計に際し、構造物を

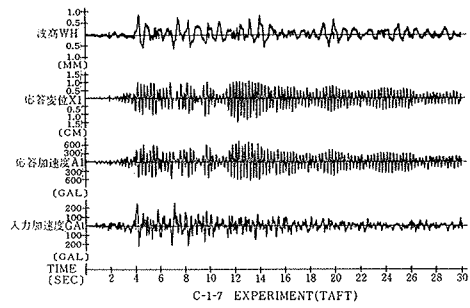


図-17 最大水深時のTaft波入力の実測値

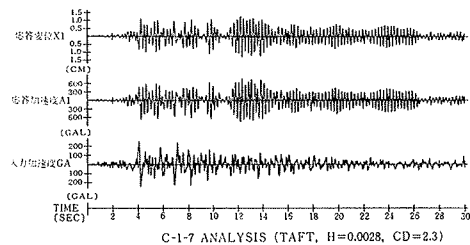


図-18 最大水深時のTaft波入力の解析値 ($h=0.28\%$ 、 $C_D=2.3$)

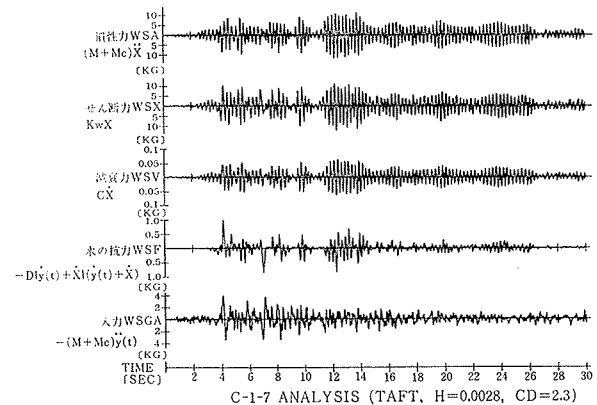


図-19 解析による最大水深時、Taft波入力の力のつりあい ($h=0.28\%$ 、 $C_D=2.3$)

簡単な質点系に置換し、適当な質量係数、抗力係数を採用することによって、地震時の応答を推定することが可能と思われる。

参考文献

- 1) 中村, 武田, 竹本, 安楽: 固定式海洋構造物の地震応答に関する基礎的研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 14, (1977)
- 2) 同(その2), No. 14, (1977)
- 3) 同(その3), No. 16, (1978)
- 4) 角田, 島口, 此上: 大型振動台について, 大林組技術研究所報, No. 11, (1975)
- 5) 田中, 吉沢, 大沢, 森下: 地震時における実在建物の周期と減衰, Bulletin of the earthquake research institute, Vol. 47, (1969), pp. 1073~1092