

海震に対する浮体構造物の動的応答特性に関する実験的研究

米 山 治 男*・野 津 厚**

1. 緒 言

浮体構造物は一般に水平地震動に対しては免震性を有しているが、鉛直地震動に関しては海震という現象のためその免震性が得られないと言われている。海震とは、海底地盤の上下震動により海水中に疎密波が引き起こされ、これによって海上に浮かんだ船舶や浮体構造物に強い衝撃力が加わる現象をいう。浮体の海震応答特性は、地震波の振動数特性と水深との関係に大きく依存している。水深が十分に小さい場合には、海震による浮体の動揺は海底面の鉛直地盤変動に追従する。ところが、水深が深くなる、あるいは地震波の振動数が高くなると、水の圧縮性に関係して浮体構造物の海震応答性状は変化してくる。これまで、海震に関するいくつかの解析的研究（例えば、岡本ら、1987；馬場、1988；松岡、1988；清川、1992）あるいは実験的研究（例えば、萩原ら、1986；新宮ら、1989；遠藤ら、1994）が発表されている。しかしながら、深い水深における浮体構造物の海震応答に関する実験は、今までほとんど行われていない。そこで本研究では、水中振動台を使用することで実験室レベルで可能な限りの大水深を実現し、模型振動実験により海震に対する浮体の動的応答特性を調べた。また係留索および浮体の構成材料の浮体の海震応答に与える影響についても考察を行った。さらに有限要素法により簡易的に海震現象をシミュレートし、実験結果との比較も実施した。

2. 浮体の海震応答実験

本研究では水中振動台を模型振動実験における海底面とし、上下加振を行うことにより水中に疎密波を発生させ海震現象を再現する。図-1は本実験におけるテンションレグ係留による浮体模型のセットアップ状況を示している。水中振動台は3.4m×3.4mの正方形上載板を有する振動台であり、大水深での実験を可能とするためにその上載板を取り外し、最大水深3.5mまでの浮体の海震応答実験を行った。係留においては係留索として4本のワイヤーを浮体底板の4隅のバックルに接続し、

アンカーにより振動箱底面に緊張係留した。また浮体の無係留状態時の実験も実施しているが、この場合は弛緩状態のワイヤーを取り付けており、浮体模型が横方向に移動しない程度の係留を行った。係留索の剛性はスプリングにより模擬し、係留索張力を測定するために張力計を取り付けた。また振動箱上の3点に加速度計を設置し、入力加速度を測定した。図-2は本実験で使用した浮体模型の平面図および立面図を示している。浮体はアクリル板製の箱形模型であり、重量は浮体内部に重錘を付加して調節した。浮体模型の上部4隅の4点に加速度計を

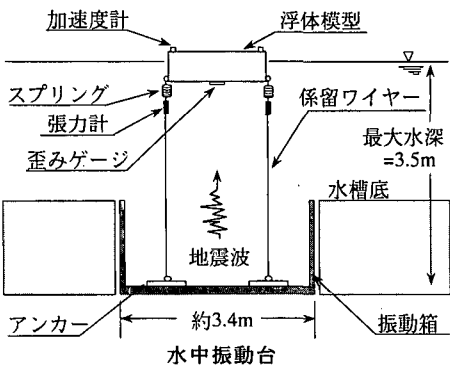


図-1 実験概要図（テンションレグ係留）

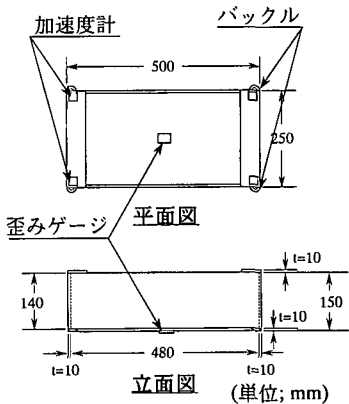


図-2 浮体模型

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 構造部海洋構造研究室
 ** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 構造部地震防災研究室

表-1 模型の種類

模型種類	浮体長 (cm)	浮体幅 (cm)	浮体高 (cm)	質量 (kg)	底板の材質
TYPE-A	50	25	15	6.25	アクリル
TYPE-B	50	25	15	6.25	ネオプレン ゴム

表-2 実験ケース

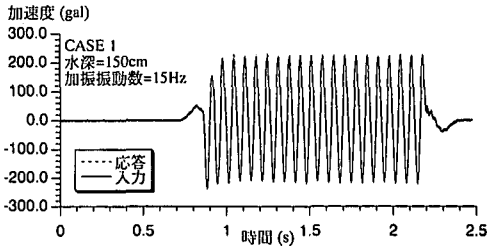
実験ケース	模型種類	係留方法	喫水 (cm)	スプリング 剛性 (kN/m)
CASE 1	TYPE-A	無係留	5	—
CASE 2	TYPE-A	テンションレグ 係留	10	0.98
CASE 3	TYPE-B	無係留	5	—
CASE 4	TYPE-B	テンションレグ 係留	10	0.98

置き、浮体底板中央部に歪みゲージを取り付けて海震応答中の底板の変形量を計測した。実験においては、表-1に示すように浮体模型として寸法および重量が同一で模型の底板の材料が異なるもの（剛なアクリル製のもの、柔なネオプレンゴム製のもの）の2種類を用意した。表-2は本実験における実験ケースを示している。本実験では浮体模型の底板の材料が異なる場合2種類と、無係留とテンションレグ係留の場合2種類を組み合わせる4ケースを実施した。実験においては正弦波加振を行い、加振振動数および水深が浮体の海震応答へ及ぼす影響を調べるためにこの2つのパラメータを変化させた。なお、加振振動数は5, 15, 25および35 Hz, また水深は0.5, 1.5, 2.5および3.5 mとした。

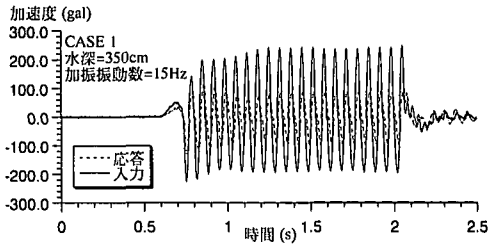
3. 実験結果と考察

(1) 浮体の応答加速度の時刻歴

図-3(a)~(b)はCASE1の浮体の応答加速度と入力加速度の時刻歴であり、加振振動数15 Hzで水深150 cmおよび350 cmの場合を示している。振動箱上の3点で測定された入力加速度波形のうち1つが実線で、浮体模型上で測定された4つの応答加速度波形のうち1つが点線で描かれている。水深150 cmでは浮体の応答加速度と入力加速度の振幅はほぼ等しく、同位相で動揺していることが分かる。また水深が350 cmの場合では、入力加速度に比較して浮体の応答加速度は小さいことが分かる。これは本実験で使用した実験施設の形状に主な原因があると考えられる。すなわち、水深150 cm以下の場合には振動台の振動箱内に水が入っている状態となり、閉水域状態で実験を実施したことになる。一方、水深150 cm以上の場合には水が広い水槽全体に広がった状態となり、



(a) CASE 1, 水深=150 cm, 加振振動数=15 Hz



(b) CASE 1, 水深=350 cm, 加振振動数=15 Hz

図-3 浮体の応答加速度と入力加速度の時刻歴

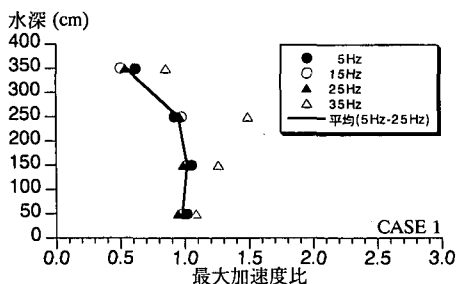
開水域状態で実験を実施したことになる。開水域では入力地震波のエネルギーが散逸し、閉水域の場合よりも浮体が受けるエネルギーが小さくなるため、このような現象が起これと考えられる。

(2) 浮体の最大加速度応答

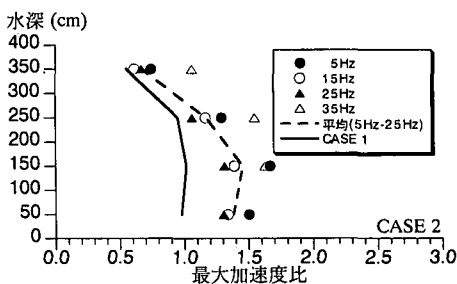
図-4(a)~(d)はそれぞれCASE 1~CASE 4の浮体の最大加速度比（浮体の応答加速度の最大値を入力加速度の最大値で除した無次元量）を示している。ここでは、振動箱上の3点で測定された入力加速度波形の平均を実際に入力加速度波形として用いている。また浮体の応答加速度に関しては、浮体上4点での計測値のうち1つを用いた。図中の実線および破線はそれぞれCASE 1およびCASE 2の加振振動数5 Hz~25 Hzの範囲の最大加速度比の平均値を示している。

図-4(a)では、水深が150 cm以下のとき最大加速度比はおおむね1に近く、水深が150 cmを越えると最大加速度比は急激に減少していく傾向がみられる。すなわち図-3で示したように、浮体の応答加速度は閉水域では入力加速度にほぼ等しく、開水域では入力加速度よりも小さくなる。また振動数35 Hzの高振動加振に対しては、最大加速度比が大きいことが分かる。これは浮体のアクリル製底板の強度不足が原因と推察される。

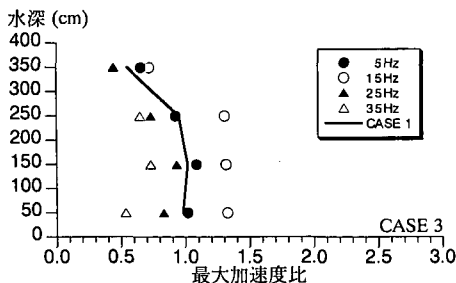
図-4(b)でCASE 1とCASE 2を比較すると、すべての加振条件に対してテンションレグ係留された浮体の加速度応答は無係留のものに比べて大きくなっている。このことから、テンションレグ係留が海震に対する浮体の免震性を低下させることが理解できる。



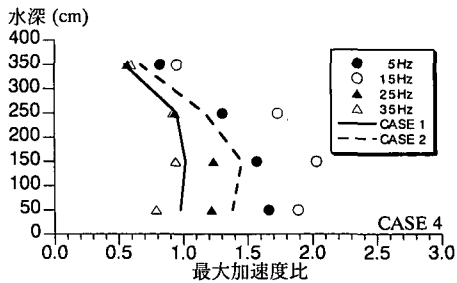
(a) CASE 1



(b) CASE 2



(c) CASE 3



(d) CASE 4

図-4 浮体の最大加速度応答

図-4(c)において加振振動数 25 Hz および 35 Hz の高振動加振に対して CASE 1 と CASE 3 を比較すると、CASE 3 ではネオブレインゴムの底板が海震による浮体の応答を低減していることが分かる。加振振動数 15 Hz に対しては CASE 1 より CASE 3 の最大加速度比が大きい、ネオブレインゴム製底板の固有振動数が 15 Hz 付近にあるためだと考えられる。

図-4(d)を見ると、CASE 2 に比較して CASE 4 では、高振動加振 (25 Hz および 35 Hz) に対する浮体の加速度応答の低減がみられる。その一方で、テンションレグ係留による浮体の加速度応答の増大も認められる。

(3) 浮体底板の最大応力・係留索の最大張力

図-5 は、CASE 3 の浮体の底板の最大応力を示してい

る。最大応力は式 $E\epsilon BL/(Ma)$ を用いて、無次元値として表示した。ここで、 E ：底板材料のヤング率 (N/m^2)、 ϵ ：底板中央部の最大歪み量、 B ：浮体幅 (m)、 L ：浮体長 (m)、 M ：浮体の質量 (kg)、 a ：入力加速度の最大値 (m/s^2)、である。本研究ではネオブレインゴムのヤング率を $4.9 \times 10^7 N/m^2$ (岡田ら, 1987) として計算した。また図-6 は、CASE 2 の係留索の最大張力を示している。最大張力は式 $T/(Ma)$ により無次元化した。ここで、 T ：係留索の最大張力 (N)、である。

図-5 を見ると、加振振動数が 15 Hz のとき最大応力が大きくなっており、ネオブレインゴム製底板の共振が発生していることが分かる。図-4(c)で、加振振動数 15 Hz の場合に浮体の加速度応答が増大しているのは、こ

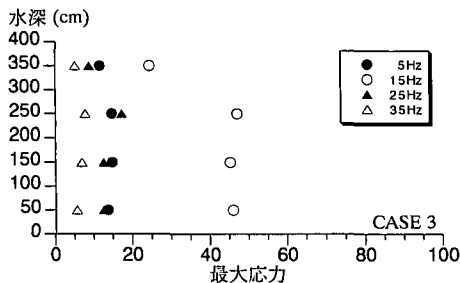


図-5 浮体底板の無次元最大応力 (CASE 3)

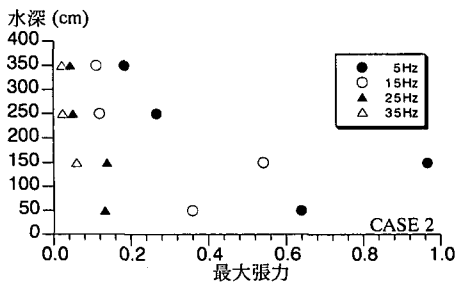


図-6 係留索の無次元最大張力 (CASE 2)

の共振が原因と考えられる。

図-6においては、加振振動数5 Hzのとき最大張力が大きい。これは図-4(b)で加振振動数5 Hzのとき最大加速度比が大きくなることと一致する。テンションレグ係留された浮体の固有振動数は5 Hz付近に存在すると考えられ、実際に浮体の排水質量と係留索のばね定数から浮体-テンションレグ係留系の固有振動数を計算すると、その値は2.82 Hzであった。浮体-係留系の固有振動数が海震の振動数に近ければ浮体の免震性が低下することが理解できる。

4. 海震現象の数値計算手法

海震は海水中を伝播する疎密波であるとする、流体場はヘルムホルツ方程式を用いた境界値問題として表現できる(清川ら, 1989)。図-7に示すように波源 S_w が鉛直方向に角振動数 ω で振動し、海水中に疎密波が引き起こされているとする。流体は非粘性の圧縮性流体で流体運動は非回転と仮定すると、速度ポテンシャル $\phi(x, z, t)$ により海震による海水の流体運動が記述される。ここで $\phi(x, z, t) = \phi(x, z)e^{-i\omega t}$ とすると、空間部分 $\phi(x, z)$ は以下の方程式および条件式から求めることができる。

$$\partial^2 \phi / \partial x^2 + \partial^2 \phi / \partial z^2 + (\omega/c)^2 \phi = 0 \quad (\text{in } \Omega) \quad \cdots \cdots (1)$$

$$\phi = 0 \quad (\text{on } S_f) \quad \cdots \cdots (2)$$

$$\partial \phi / \partial z = 0 \quad (\text{on } S_b) \quad \cdots \cdots (3)$$

$$\partial \phi / \partial n = v \quad (\text{on } S_w) \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで、 c ：水中音速、 n ：波源の法線方向単位ベクトル、 v ：波源表面の速度振幅の法線方向成分、である。

(1)式は流体領域 Ω で満足すべき速度ポテンシャルの支配方程式、(2)式は表面波が発生しないと仮定した自由表面 S_f における境界条件、(3)式は海底面 S_b における不透過条件、(4)式は波源表面 S_w における波源運動速度と流体の連続条件、である。さらに、速度ポテンシャル ϕ はSommerfeldの発散条件を満足する必要がある。また、浮体に作用する動水圧 p は、浮体底面位置

での速度ポテンシャル ϕ と海水密度 ρ を用いて次式の様に表せる。

$$p = i\rho\omega\phi \quad \cdots \cdots (5)$$

この動水圧 p を外力として浮体の運動方程式を解くと、海震による浮体の動的応答を求めることができる。

本研究では、浮体の海震応答を簡易的にシミュレートするために、既存の2次元有限要素法プログラム(通常は防波堤に作用する動水圧および地震時の防波堤の加速度応答を解析するためのもの)を採用した。ここではこの有限要素法プログラムを用いて、上記(1)~(4)式の境界値問題を速度ポテンシャル ϕ ではなく動水圧 p に関して解く。そして、浮体底面位置での動水圧を p_d 、また、その位置における鉛直方向水粒子加速度振幅 A を浮体の応答加速度振幅と仮定すれば、次式により浮体の応答加速度を計算することができる。

$$\partial p_d / \partial n_d = -\rho A \quad \cdots \cdots (6)$$

ここで、 n_d ：浮体底面法線方向単位ベクトル、である。この方法は、海震による動水圧を外力とした浮体の運動方程式を解かないので、簡便に浮体の加速度応答を推定できる。ただし、浮体の動揺による造波や浮力の変化の影響等を考慮していないなどの問題点があるため、浮体の海震応答解析を正確に行うには、実際に浮体の運動方程式を解く必要がある。

5. 数値計算結果と考察

(1) 実験結果と計算結果の比較

CASE 1について前章で示した2次元有限要素法により数値計算を行った。図-8はCASE 1の浮体の最大加速度比に関して実験値と計算値を比較したものである。●、○および▲は実験値、実線、破線および点線は計算値を示している。この図から計算値は実験値の傾向を良く表していることが分かる。ところが、深い水深(水深350 cm)においては、計算値は実験値に比較して最大加速度比が大きく、やや差異を生じている。これは、実験における海震のエネルギーの散逸が数値計算の場合よりも大きいことを示している。有限要素法によるシミュレーションは2次元計算であるため、実験の3次元性を再現できていないことが原因であると考えられる。また、実験値はどの加振振動数の場合もほぼ等しい値を示しているが、計算値は加振振動数が増加するにつれて大きくなっている。この相違は、運動方程式から海震に対する浮体の加速度応答を計算していないことが理由ではないかと考えられる。本解析手法はシンプルな方法ではあるが、本実験で実施した加振振動数および水深の範囲内に関しては、この手法で浮体の海震応答現象を評価できる

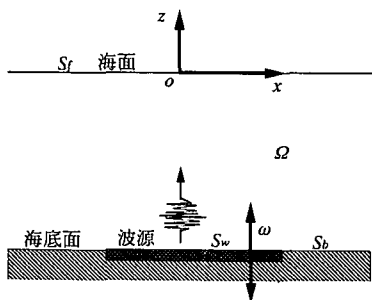
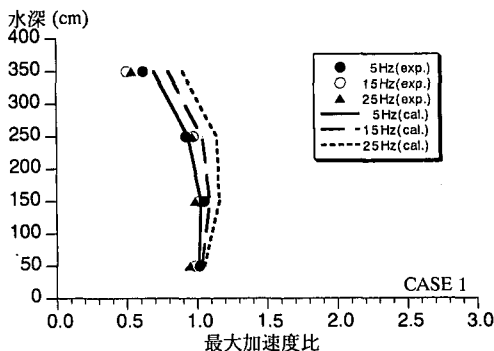
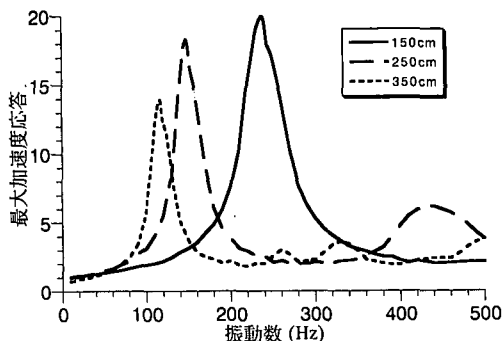


図-7 解析モデルと座標系



図—8 実験値と計算値の比較 (CASE 1)



図—9 浮体の加速度の振動数応答曲線

と言える。

(2) 海震による浮体応答の共振現象

2次元有限要素法を用いて、今回実験を行った各水深において、CASE 1の浮体の最大応答加速度の加振振動数に対する変化を計算してみた。図—9にその計算結果を示す。例えば水深350 cmの場合には、加振振動数が約110 Hzのとき1次共振点が現れている。これは海水中を伝播する疎密波が、海底面と海水面の間で共振していることを表している。本実験では使用した水中振動台の性能に限界があり、海震による浮体応答の共振現象まで再現することはできなかったが、この共振現象は浮体構造物の設計において非常に重要と考えられるため、今後の模型実験により確認することが課題である。

6. 結 論

本研究で得られた主要な結論を以下にとりまとめる。

(1) 無係留で剛な浮体の場合、本実験で実施した加振振動数および水深の範囲内では、閉水域では浮体の海震応答は水深に関係なくおおむね一定であるが、開水域では水深が深くなるにつれて浮体の海震応答は小さくなる。

(2) 柔らかい材質の底板を用いれば浮体の固有振動数を変化させることができ、高周波地震動に対する浮体の海震応答を低減できる可能性がある。

(3) 係留に関しては、テンションレグ係留の方が無係留の場合よりも浮体の海震応答が大きくなる。つまり浮体の緊張係留は海震に対する浮体の免震性を低下させる。

(4) 有限要素法で求めた浮体の海震応答の計算値と実験値はおおむね良い一致を示しており、本解析手法の適用性が検証された。

参 考 文 献

- 遠藤龍司・濱本卓司・安藤正博・加藤武彦・登坂直好 (1994): 海震を受ける浮遊式海洋構造物の実験方法について、第12回海洋工学シンポジウム論文集, pp. 371-378.
- 岡田 清・明石外世樹・小柳 治 (1987): 新編土木材料学, 国民科学社, pp. 274-293.
- 岡本強一・増田光一・本間健一 (1987): 浮体における海震の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp. 939-940.
- 清川哲志・稲田 裕 (1989): Seaquakesの発生メカニズムについて, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 734-738.
- 清川哲志 (1992): 海震による浮体の高振動数動揺について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 816-820.
- 新宮清志・赤津 剛・関川賢一・服部克久・船本大蔵 (1989): 浮体の海震による動的応答に関する実験的研究, 平成元年度日本大学理工学部学術講演会論文集, pp. 265-266.
- 萩原 豊・増子芳夫・中村秀治・松浦真一・塩尻弘雄 (1986): 浮揚式原子力発電所浮体構造物の地震応答特性(その1), 電力中央研究所報告, 研究報告 385028, 40 p.
- 馬場栄一 (1988): 海震に対する浮体の加速度応答について, 第8回海洋工学シンポジウム論文集, pp. 305-311.
- 松岡一祥 (1988): 浮遊式構造物の免震性, 日本造船学会誌, 第706号, pp. 12-18.