

大型浮揚式建造物の水平・上下免震特性について

(財)電力中央研究所 正会員 萩原豊

1. はじめに

浮揚式建造物は、水がせん断波を伝達しないため、地震動水平短周期成分に対して理想的な免震性を有しているが、一方では5~20秒の動揺の固有周期を有しており、地震動のやや長周期成分によって浮体動揺が励起される。したがって、浮揚式建造物およびその搭載建造物の合理的耐震設計のためには、免震性と動揺特性という二つの側面について評価することが必要である。しかし、従来検討例が少ないことから、評価手法が確立されているとは言い難い⁽¹⁾。

一方、浮揚式建造物においても地震動上下成分はそのまま伝達するため、上下地震荷重を低減することはできない。このため、上下免震性を有する浮体構造を適用し、搭載建造物の設計をよりいっそう合理化することが考えられる。浮揚式に固有の上下免震概念として空気室のエアクッション効果を利用した浮揚式海上立地構想⁽²⁾があるが、本概念を実際に適用するためには、上下地震動に対する免震特性の定量的評価をはじめとして、多くの課題が残されている。

本論文は、原子力発電所新立地方式のひとつとして検討が進められている、浮揚式海上立地方式の耐震性に関する一連の研究の成果を取りまとめたものである。本報告では、まず2章において、浮揚式建造物の水平免震特性と地震時の浮体動揺の評価を合理的に行うために、閉水域内の浮揚式建造物を対象として、有限要素法に基づく地震応答解析法を開発し、模型振動実験により解析法の適用性を検証した結果について述べる。次に3章において、空気室を用いた上下免震浮体の理論的免震特性と振動実験結果の比較により、現象の把握と理論解の検証を行い、さらに実規模の上下免震浮体を想定して、その免震性を理論解により検討した結果について述べる。

2. 閉水域内浮揚式建造物の地震応答解析手法の開発と検証⁽³⁾

2.1 解析手法

浮揚式建造物は、防波堤・掘込斜面によりほぼ閉じられた水域中に浮揚する箱型の浮体と、浮体の水平変位を拘束する係留装置により構成される。このため、建造物の地震応答を正確に模擬するためには、①水と建造物(浮体)の相互作用、②水の表面波、③静水圧により浮体に作用する浮力、④係留装置の非線形な復元力特性、等を解析モデルに反映させることが必要である。本研究では、浮体・建屋・係留装置と浮体を取りまく水域を有限要素法に基づく定式化によりモデル化し、上記の現象を解析モデルに取り込んだ。水は圧縮性完全流体として取り扱う。開発した解析手法によれば、浮体-係留水域連成系の運動方程式は、次式で表わされる。

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & -M_\phi & -M_{\phi f} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U} \\ \dot{\phi} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & L_{\phi s}^t \\ L_{\phi s} & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U} \\ \dot{\phi} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} K_s + gL_{sw}^t & 0 \\ 0 & -K_\phi \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U \\ \phi \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} [M_s] \{I_s\} \ddot{u}_g \\ [L_{\phi s}] \{I_s\} \dot{u}_g \end{pmatrix}$$

ここに、

- {U}: 建造物の相対変位ベクトル
- {φ}: 流体の速度ポテンシャルベクトル
- [M_s], [C_s], [K_s]: 建造物の質量, 減衰, 剛性マトリクス
- [M_φ], [K_φ]: 流体の質量, 剛性マトリクス
- [M_{φf}]: 流体の自由表面境界条件を表わすマトリクス
- [L_{φs}]: 流体と弾性体の接触条件を表わすマトリクス
- [L_{sw}]: [L_{φs}]から水平成分を除去したマトリクス
- g: 重力加速度, {I_s}: 地震加振方向ベクトル
- ü_g, u̇_g: 地震入力加速度, 速度

また、浮体係留装置としては定反力型防舷材を使用したドルフィン係留方式を想定した。本研究では小田らの研究⁽⁴⁾を参考として定反力型防舷材の復元力特性を模擬する非線形ばねモデルを開発し、浮体地震応答解析コードに組み込んだ。本非線形ばねは図1に示すように、載荷および除荷時の多直線近似した骨格曲線と、載荷-除荷反転時の歪依存型の剛性を組み合わせたものである。

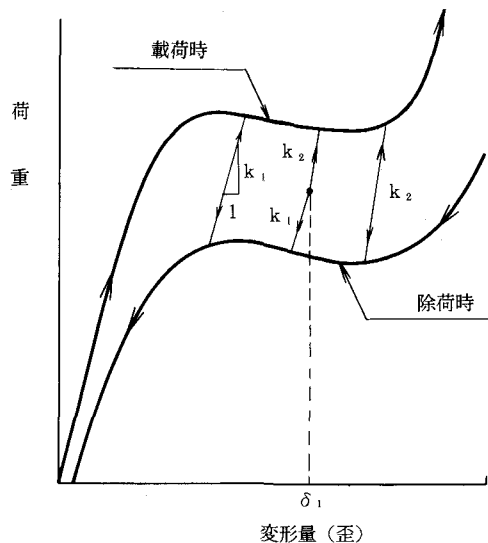


図1 防舷材非線形ばねモデルの復元力特性

解析は、2次元及び3次元領域において、線形及び非線形

時刻歴応答解析と、複素周波数応答解析が可能である。係留ばねの復元力特性を線形弾性として時刻歴応答解析を行う場合には、上記の全体系の運動方程式をNewmark- β 法を用いて直接積分により解く。係留ばねとして防舷材非線形ばねを使用する場合には、上記の運動方程式を増分形式に書き換えて線形の場合と同じくNewmark- β 法を用いて解く。収束計算にはニュートン法を用いる。

2.2 解析法検証のための振動台実験の概要

解析法の適用性を検証するために、振動台を用いた模型実験を実施した。実験模型は、110万Kw級軽水冷却型原子力発電所を搭載した浮体を想定し、1/100に縮小したものである。可能な限り大きなスケールで実験を行うため、係留水域内に1プラントのみが係留されている条件を想定した。適用される相似則はフルード則である。

(1) 模型

模型の外観を図2、主要な諸元を表1に示す。浮体・建屋は鋼板・鋼棒を溶接・ボルト接合して製作した。係留装置は「2辺係留ドルフィン・リンク式（一つのドルフィンが圧縮・引張両方向に係留力を発生する）」と「4辺係留ドルフィン・ロッド式（一つのドルフィンが圧縮方向のみに係留力を発生する）」の2形式を適用した。係留装置の復元力はコイルばねで模擬した。海底地盤・防波堤あるいは掘込斜面は剛な鋼板で製作した水槽により模擬し、形状のみ相似とした。

表1 模型浮体の諸元

項目		模型	
寸法（長さ×幅×喫水）		140×140×18（cm）	
全重量		235.2kg	
重心高さ h_v （浮体底面より）		19.1cm	
慣性モーメント（重心回り）	I_y	$5.82 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$	
	I_x	$6.64 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$	
慣動半径 r	r_y / L	0.355	
浮体長さ L	r_x / L	0.380	
建屋固有振動数	原子炉建屋	1次	31Hz
		2次	48Hz
	タービン建屋	1次	21Hz
		2次	54Hz

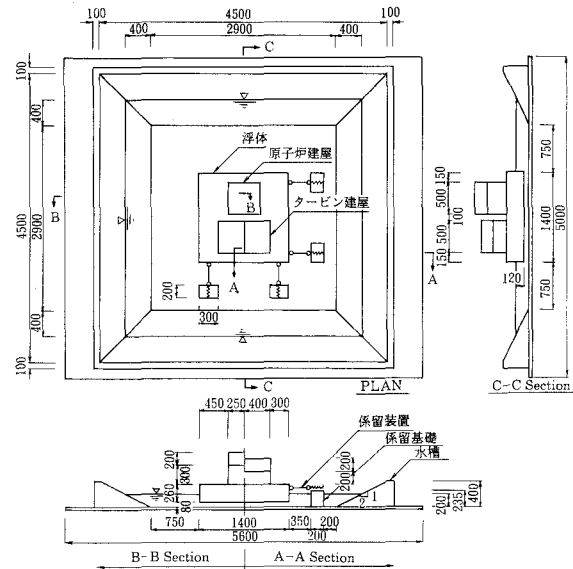


図2 浮揚式原子力発電所の1/100模型（2辺係留）

(2) 加振方法及計測方法

実験は、浮体・建屋・係留装置を、係留水域を模擬する水槽ごと（財）電力中央研究所の大型振動台（テーブル寸法6m×6.5m、最大積載重量100ton）上に固定して、加振することにより実施した。加振は全て水平一方向であり、正弦波スイープ加振、地震波加振を行った。地震波加振においては、図3に示す長周期模擬地震動を用いた。計測は、浮体・建屋の加速度・変位応答、動水圧、波高、および振動台の入力加速度・変位、について実施した。

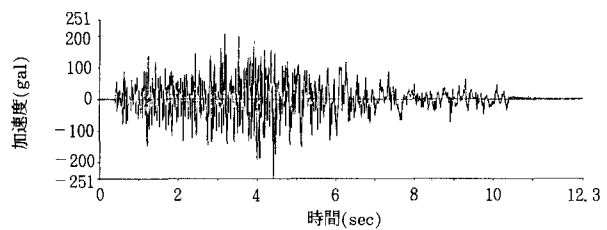


図3 長周期模擬地震動

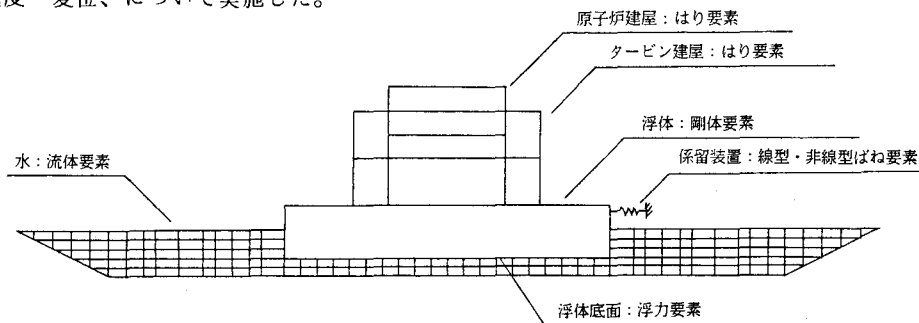


図4 有限要素解析モデル（2次元時刻歴応答解析）

2.3 実験との比較による解析法の適用性検証

2.2の振動台実験を対象として、2.1の解析法を適用して行った検証解析の結果を以下に示す。

(1) 解析モデル

解析モデルの一例として、2次元時刻歴応答解析に適用した解析モデルを図4に示す。

(2) 2次元周波数応答解析と正弦波スイープ加振実験との比較

正弦波スイープ加振実験（2辺係留）と2次元周波数応答解析の比較の一例として、係留装置ばね定数による、スウェイ、ロール、および浮体・水槽斜面間水域の1次のスロッシングの共振振動数の変化を、図5に示す。図5より、共振振動数の係留ばね定数による変化に関して、解析は実験とよく一致していることが判る。また、図5には伊藤・千葉の近似理論⁽⁵⁾による、有限水深の場合の浮体のスウェイ、ロールの固有振動数の概算値 f_s 、 f_R を併せて示した。図5によれば、スウェイについては概算値 f_s は実験・解析の共振振動数とよく一致しているが、ロールについては概算値 f_R は実験値・解析値を大きく上回った。これは、本実験および解析では、閉水域であるため浮体動揺とスロッシングの連成により付加慣性モーメントが変化し、伊藤・千葉の理論値よりも大きくなったためと考えられる。これは閉水域内における浮体の動揺に関わる最も重要な特性のひとつである。

(3) 3次元周波数応答解析と正弦波スイープ加振実験との比較

正弦波スイープ加振実験（4辺係留、係留ばね定数0.200kg/mm）について、主要な共振振動数における波高のモード形を、3次元周波数応答解析と比較した結果を図6に示す。なお波高の評価は、実験体系の対称性を考慮して係留水域の1/4について実施した。図6によれば、波高（スロッシング）の3次元的なモード形状に関して、解析は実験とよく一致している。特に、横断方向のモードについても実験結果が再現されており、本解析手法は水面波の3次元的な特性を正確にシミュレートできることが確認された。また、水面波との連成が浮体動揺に大きく影響するロールの共振振動数（0.46Hz）における水面形状は、浮体の近傍では2次元的なモードとなっている。したがって、浮体動揺に関しては2次元解析でも十分な精度でシミュレートが可能と考えられる。

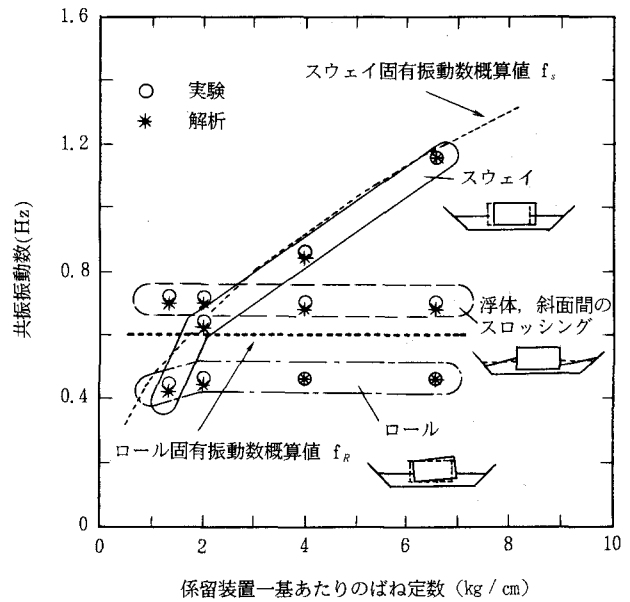


図5 係留装置ばね定数による共振振動数の変化

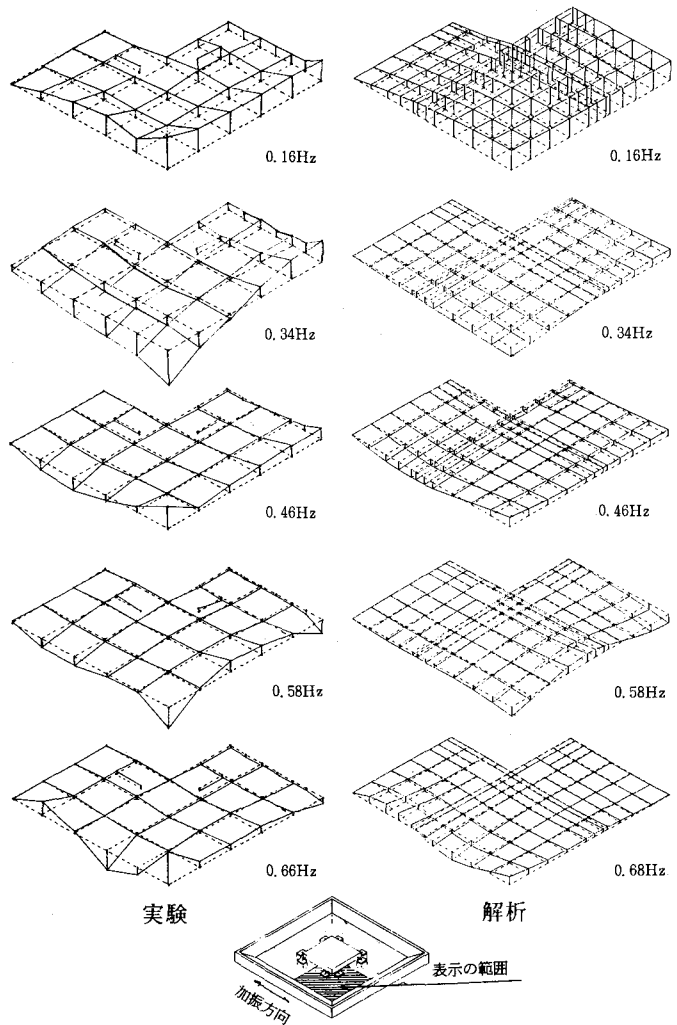


図6 係留水域水面上下変位の共振モード

(4) 線形時刻歴応答解析と地震波加振実験との比較

図7に代表ケース（2辺係留、係留ばね定数0.200kg/mm）の実験結果と、対応する2次元線形時刻歴応答解析について、地震波加振時の浮体変位と係留水域波高の時刻歴の比較を示す。図7より、地震波加振時の浮体変位の応答時刻歴に関して解析値は実験値とよく一致していることが判る。また、浮体の変位応答においては、実験で1.5～2.5秒（実機で15～25秒）の成分が卓越しており、浮揚式構造物の耐震性評価における地震動やや長周期成分の重要性が指摘された。係留水域の波高のうち周期1秒以下の成分に関しては解析と実験に相違が現われているが、これは水域全体の3次元性の影響があるためと考えられる。ただし、浮体動揺の周期が比較的長く周期の短い波との連成効果は小さいため、浮体動揺への影響は認められない。

図8には図7と同じケースにおける浮体応答加速度時刻歴の比較を示す。図8より加速度応答についても解析は実験をほぼ模擬できていることが判る。また、解析・実験ともに浮体上での最大加速度は、入力地震動の最大加速度251galに対して大幅に低減し、20gal程度となっており、浮体・建屋の顕著な免震性が確認された。

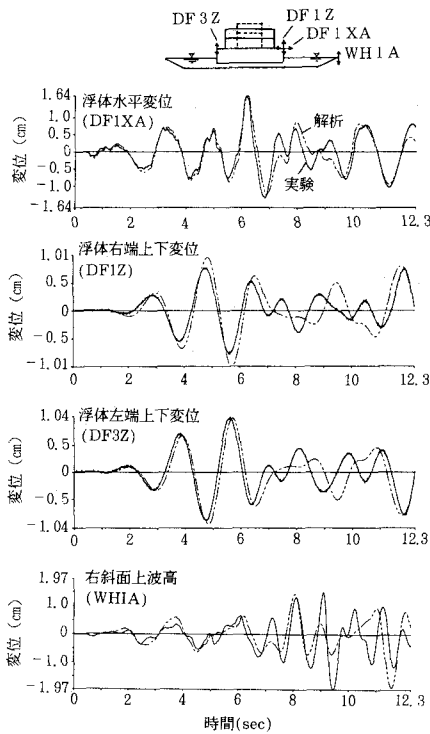


図7 浮体・水面の応答変位時刻歴

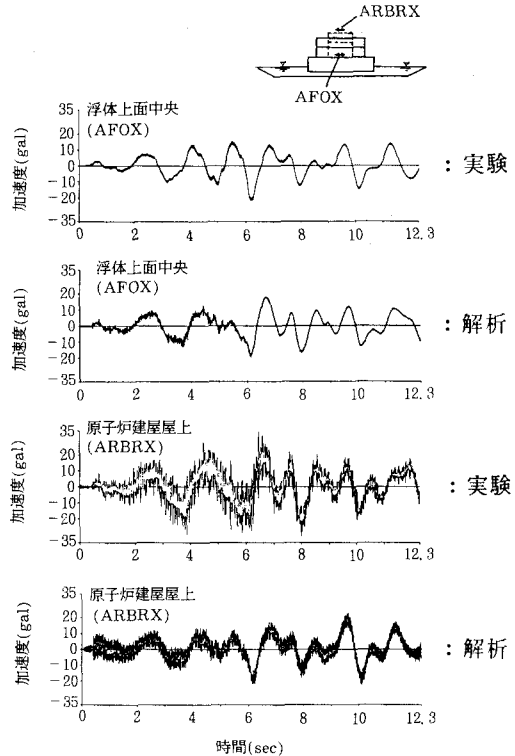


図8 浮体の応答加速度時刻歴

3. 底部に空気室を有する浮体の上下免震特性⁽⁶⁾

3.1 解析方法

対象とする浮体は、図9のように平面的に空気室部、側壁部、隔壁部に分割されているものとする。浮体周辺の水域は、外海から完全に閉鎖されており、水の出入りは生じないものとする。

空気室を有する浮体の上下地震動に対する運動方程式を立てるにあたり、水は非圧縮性完全流体、浮体は剛体、運動は微小とし、表面波は考慮しないものとした。また、慣性力は、浮体の質量のほか、水の上下動による慣性力も近似的に考慮する。すなわち、側壁部、隔壁部直下の水は浮体と同じ加速度で運動し、周辺水域及び空気室直下の水は各々の水面と同じ加速度で運動するものとする。復元力に関しては、空気室を断熱圧縮される線型な空気ばねとして算出される反力と、静水圧による復元力を考慮する。

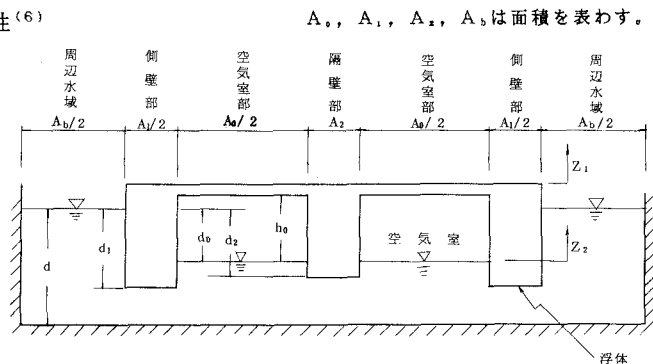


図9 空気室を有する浮体

図9の系を、浮体の上下変位 z_1 、空気室内の水面の上下変位 z_2 を未知変位とする2自由度系と考える。 z_1 、 z_2 ともに上方を正とする。減衰力は後で別途考慮するものとするれば、地震上下加速度 \ddot{z}_0 によって浮体に作用する力のつりあいと、空気室下面の水面に作用する力のつりあいより、対象とする系の運動方程式が次のように導かれ、これをモード解析することにより振動特性が得られる。

$$M \begin{pmatrix} \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \end{pmatrix} + K \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} m_0 \ddot{z}_0$$

ここに、

$$M = \begin{bmatrix} m + m_{a1} & 0 \\ 0 & m_{a2} \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k + k_1 & -k \\ -k & k + k_2 \end{bmatrix}$$

$m_0 = \rho d_0 A_0$, m : 浮体の質量

k : 空気ばねのばね定数

$k_1 = \rho g (A_1 + A_2) \{ 1 + (A_1 + A_2) / A_b \}$

$k_2 = \rho g A_0 (1 + A_0 / A_b)$

$m_{a1} = \rho \{ A_1 (2d - d_1) + A_2 (2d - d_2) \}$

$m_{a2} = \rho A_0 (2d - d_0)$

3.2 空気室を有する浮体の振動台加振実験

本実験は、空気室を有する浮体模型への上下地震動伝達特性を振動台加振により計測し、上下動に対する免震性を確認するとともに、3.1に示した近似解析手法を検証するものである。

(1) 実験の方法

実験の対象とした浮体模型は、平面寸法 40cm × 40cm、高さ 9 cm の直方体形状であり、浮体は内法 66cm 角の矩形水槽の中央に無係留で浮揚させた(図10)。浮体への付加重量および空気室の内圧を変えることにより、表2に示す6ケースの実験を実施した。

(2) 加振・計測の方法

加振は、小型電磁振動台上に水槽を設置して行った。加振方式は加速度一定の正弦波スイープ上下加振である。計測は、図10の様に、水槽底面と浮体上の上下加速度、水槽底面の動水圧、浮体空気室内の動的空気圧、空気室の空気圧と大気圧の差圧について行った。

3.3 実験と解析の比較

図11に、浮体上下加速度の共振曲線に関する実験値と解析値の比較を示す。解析値の算出にあたり、減衰定数は実験の平均的値を参照して全て1.0%とした。図11によれば、解析は実験結果に見られる浮体上下加速度の基本的伝達特性をほぼ再現している。固有値解析結果によれば、実験で見られる共振は2次モードに対応し、1次モードは刺激係数がきわめて小さく殆ど刺激されない。また、ここで特に注目されるのは空気室水面深さ d_0 が大きいほど、高振動数域における応答倍率が低下し、上下免震効果が向上する事である。これは d_0 が大きいほど2次モードの刺激係数が大きくなることに起因する(ただし、この時共振応答倍率も増加することに注意する必要がある)。なお、この結果からは読み取れないが、浮体の底面積に対する空気室の面積を増やすほど、当然のことながら上下免震効果は向上する。

以上の様に、3.1で導いた近似理論は、空気室を有する浮体の上下免震特性を概ね模擬できることが確認された。ただし、定量的には水の付加質量効果についてより厳密な評価が必要と考えられる。

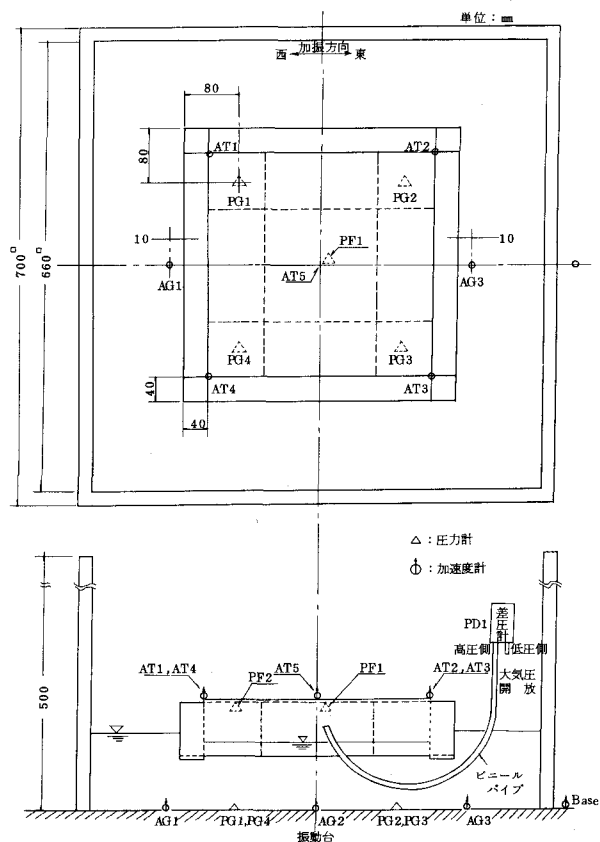


図10 空気室を有する浮体の模型

表2 実験ケース

ケース No.	水深 d (cm)	空気室の水面深さ d_0 (cm)	側壁部の底面の水深 d_1 (cm)	隔壁部の底面の水深 d_2 (cm)	空気室の高さ h_0 (cm)	浮体の全重量 (g)
1	5.0	2.5	4.0	3.5	7.0	5,432
2	5.0	1.5	4.0	3.5	6.0	4,216
3	5.3	0.8	4.3	3.8	5.0	3,400
4	7.0	1.5	6.0	5.5	4.0	5,280
5	7.0	0.5	6.0	5.5	3.0	4,216
6	7.0	0.0	6.0	5.5	2.5	3,856

3.4 実規模構造物の上下免震特性の評価例

空気室を有する浮体の上下免震に関する基本的特性を実規模レベルで把握するため、3.1の方法で数値計算による評価を行った。解析モデルは、重量276,250tonの浮揚式原子力発電所をイメージしたものであり、水深20m、平面寸法300m×300mの水域の中央に、150m×150mの正方形浮体を浮かべたものである。浮体は空気室部と側壁部にくぎられ、空気室は142m×142mの面積を有する。空気室の水面は周辺水域より12m低く、空気室の高さは2.0mとする。側壁部底面の水深は15mとする。隔壁部は簡単のため省略する。減衰は質量比例型のレイリー減衰とし、減衰比が2次固有振動数に対して5%になるように比例定数を設定した。解析によって得た浮体上下加速度の伝達関数を図12に示す。同図によれば伝達関数にはひとつのピークのみが認められ、共振振動数(0.611Hz)は2次固有振動数($f_2=0.616\text{Hz}$)に対応している。2次固有振動数より高い振動数では応答倍率は1よりも小さい一定値に漸近する。計算例では、5Hzにおいて浮体の応答倍率は、0.259、20Hzでは0.270であり、上下地震動の短周期成分(1Hz以上程度)の加速度レベルは、浮体上では1/4程度に低減されることになる。したがって、本計算例の様に2次固有振動数を上下地震動の卓越振動数範囲より十分低く設定し、かつ空気室の底面積等に配慮すれば、空気室を有する浮体は上下地震動に対して免震性を発揮するものと考えられる。

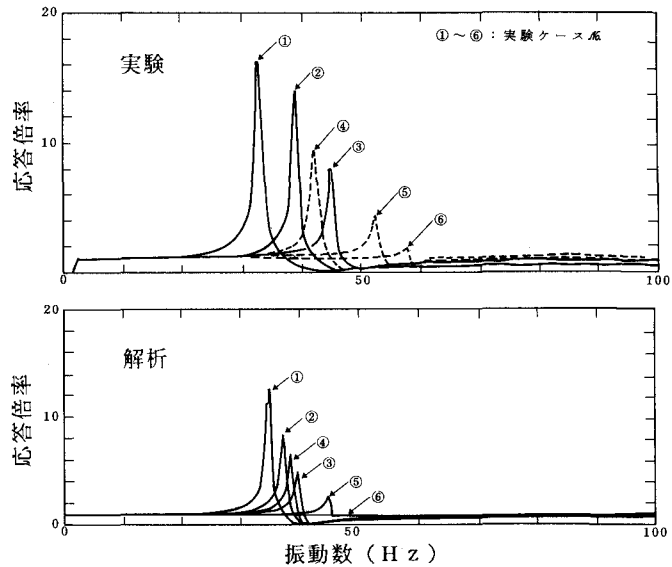


図11 浮体への上下加速度の伝達特性

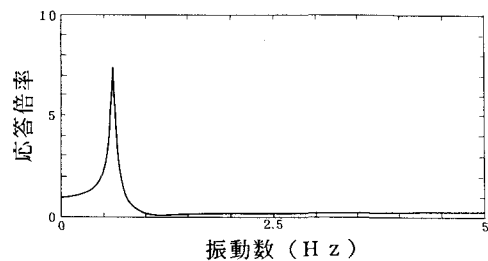


図12 実規模モデルの上下免震特性

4. 結論

本研究により、閉水域内浮揚式構造物の地震動水平短周期成分に対する免震特性・長周期地震動による揺動特性を十分な精度で評価できる手法が整備された。(財)電力中央研究所では、すでに本解析手法を用いて浮揚式原子力発電所の地震応答の評価を実施しており、本論文でも示したように、浮体の水平免震性が著しく、浮体搭載機器については事実上水平地震荷重を無視しうること、及び非常に強い長周期地震動に対しても浮体-係留システムの健全性を確保しうること、等を明らかにしている。実機評価の結果については機会を改めて紹介したい。

また、空気室を有する浮体の上下免震についても、簡易な近似理論を用いた解析により免震特性を評価できる見通しが得られた。解析手法に関しては、水の付加質量の評価等改良すべき点があるが、基本的な応答特性は本研究により把握できたものと考えられる。ただし、実際の構造物に空気室による上下免震を適用するためには、長周期上下地震動によるヒービングの抑制方法、浮体動揺の評価法、動揺時にも空気もれを生じない構造等、数多くの問題が残されており、今後の検討を待つ必要がある。

参考文献

- (1) 萩原豊他: "浮揚式原子力発電所浮体構造物の地震応答特性(その1)", 電中研報告NO. 385028(1986)
- (2) Daniel, et, al: "The Floating Earthquake-Resistant Nuclear Station", ORNL, NRC
- (3) 萩原豊他: "浮揚式原子力発電所浮体・建屋の地震応答解析-解析手法の開発と実験による検証-", 電中研報告No. U88050(1988)
- (4) 小田一紀他: "ハイブリッド型シミュレーション法による荒天時船体動揺解析", 第32回海岸工学講演会論文集(1985)
- (5) 伊藤喜行, 千葉繁: "浮防波堤の水理に関する近似理論と応用", 港湾技研報告, 第11巻第2号(1972)
- (6) 萩原豊他: "浮揚式原子力発電所浮体構造物の地震応答特性(その2)-底部に空気室を有する浮体の上下免震特性-", 電中研報告, NO. U87011(1987)