

# 浮力利用型人工地盤の鉛直地震動作用時 における安全性に関する検討

## STUDY ON SAFETY OF FLOATING ARTIFICIAL GROUND UNDER VERTICAL MOTION OF EARTHQUAKE

池末俊一<sup>1</sup>・石井元悦<sup>2</sup>・熊本直樹<sup>1</sup>・日下理<sup>3</sup>・大輝聡<sup>3</sup>・上田茂<sup>4</sup>

Shunichi IKESUE, Motoetu ISII, Noki KUMAMOTO, Tadasu KUSAKA,  
Satosi OTERU and Sigeru UEDA

<sup>1</sup>正会員 三菱重工業株式会社 技術本部 広島研究所 (〒730-8642 広島市中区江波沖町5番1号)

<sup>2</sup>正会員 三菱重工業株式会社 広島製作所 (〒730-8642 広島市中区江波沖町5番1号)

<sup>3</sup>正会員 中電技術コンサルタント株式会社 道路部 (〒734-8510 広島市南区出汐2丁目3番30号)

<sup>4</sup>フェロー会員 鳥取大学 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101)

In late years, in stead of existing method of construction such as land reclamation, needs for semi-floating structures are increasing. Especially, semi-floating structure are considered to be effective, because reaction of ground of seabed can be reduced by buoyancy of structure. However, response of such structures to the vertical motion of earthquake has not been understood. In this study, for the evaluation of responses of large semi-floating structures, an analysis method had been developed. This method is based on a combination of BEM with FEM. Using this method, it appeared that the response of semi-floating structure to the vertical motion of earthquake is influenced by the stiffness of structure, supports, mass and displacement. These results were examined by shaking table test in water.

**Key Words :** floating structure, interaction between fluid and structure, vertical motion of earthquake

### 1. はじめに

国内における臨海の陸上部においては、利用し易い空間は、既存施設で或る程度占有されている状況にある。国土の狭い日本では、海洋空間を有効活用することが以前からの課題であるが、埋立て工法などの従来多く採られてきた方法は、環境への負荷が大きいので、これからの海洋空間利用では、環境影響にも配慮した空間創出が求められている。

このような背景の中、浮力を利用することで地盤への負担を低減する工法すなわち軟着底工法は埋立て面積が少ない工法であるが、大規模なものの実施例はあまりなく技術的に未解決の問題も多い。その中のひとつとして、鉛直地震動作用時における浮体と軟着底式を構成する支持脚反力の関係が十分には明らかにされていない。

この問題に対する評価手法の一つとして、自由表面グリーン関数を用いた境界要素法による流体力解析により浮体の付加質量・造波減衰を求め、それを運動方程式に代入することで簡便に計算する手法が考えられる。しかし、この手法では流体を介して浮体に伝達される地震動による強制力項をどのように

考えるべきかという問題が未解決であった。

そこで、本研究では自由表面を有する流体と構造物の動的相互作用を直接的に扱うことができ、かつ比較的自由に境界条件を定めることのできる計算法の開発を行った。また、この計算法を用いて鉛直地震動作用時における浮力利用型人工地盤の挙動特性を検討した。更に、水中振動台を用いた実験を行い計算の妥当性についても検討を行った。

### 2. 自由表面を有する流体と構造物の動的相互作用を考慮した計算法

先ほど述べたように、本研究では自由表面を有する流体と構造物の動的相互作用を直接的に取り扱う計算法の開発を行った。今回は、自由水面を考慮した流体計算に境界要素法を用いる谷澤<sup>1)</sup>の手法を参考とし、以下に述べるような計算手法を用いた。

本計算法では理想流体を仮定しており、連続式は以下のようなになる。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \nabla \cdot (\nabla \phi) = \nabla^2 \phi = \nabla^2 \phi_s = 0 \quad (1)$$

ここに、 $\mathbf{u}$ は流体の速度ベクトル、 $\phi$ は流体の速度

ポテンシャル、 $\phi_t$ は速度ポテンシャルの時間偏微分値である。この式(1)は、速度ポテンシャル $\phi$ および速度ポテンシャルの時間偏微分値 $\phi_t$ のラプラス方程式によって構成される境界値問題となる。この境界値問題を解く事で、流体自由表面上の速度ポテンシャル法線方向微分値及び構造物表面上の速度ポテンシャル値が求まる。境界値問題は境界要素法により解くことができるが、境界要素方程式を構成するには境界条件が必要となる。

まず流体の自由表面上における境界条件を考えることとする。まず、流体中の圧力 $p$ はベルヌーイ式より、

$$p = -\rho \left\{ \phi_t + \frac{1}{2} (\nabla \phi)^2 + gy \right\} \quad (2)$$

となる。ここに、 $\rho$ は流体密度、 $g$ は重力加速度、 $y$ は静水面を基点とし上方向を正とする鉛直方向座標である。ここで、自由表面上では圧力が大気圧と釣り合うことを考慮し、大気圧を $0 \text{ kN/m}^2$ と仮定すると自由表面上では次式が成立する。

$$\phi_t = -\frac{1}{2} (\nabla \phi)^2 - gy \quad (3)$$

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{1}{2} (\nabla \phi)^2 - gy \quad (4)$$

$$\frac{D\mathbf{x}}{Dt} = \nabla \phi \quad (5)$$

自由表面上では、速度ポテンシャル及び位置ベクトルが、式(4)、(5)によって次タイムステップの流体表面上における速度ポテンシャル $\phi$ が求まる。自由表面上の $\phi_t$ は各タイムステップにおいて式(3)により計算される。

次に構造物表面上の境界条件について考える。構造物を剛体とすると、その表面上で流体の不透過性から以下の境界条件を満たす必要がある。

$$\frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{n}} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{n} \cdot (\mathbf{v}_0 + \dot{\mathbf{r}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) = \mathbf{n} \cdot (\mathbf{v}_0 + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi_t}{\partial \mathbf{n}} = -k_n (\nabla \phi - \mathbf{v}_0 - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 + \mathbf{n} \cdot (\dot{\mathbf{v}}_0 + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r}) + \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \quad (7)$$

$$+ \mathbf{n} \cdot 2\boldsymbol{\omega} \times (\nabla \phi - \mathbf{v}_0 - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) - \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \left( \frac{1}{2} (\nabla \phi)^2 \right)$$

ここに、 $k_n$ は構造物表面の法曲率、 $\mathbf{v}_0$ 、 $\boldsymbol{\omega}$ は構造物重心の速度ベクトル、及び構造物の重心周り回転角速度ベクトルである。また、 $\dot{\mathbf{v}}_0$ 、 $\dot{\boldsymbol{\omega}}$ は構造物重心の加速度ベクトル、及び重心周り回転角加速度ベクトルである。 $\mathbf{v}_0$ 、 $\boldsymbol{\omega}$ 及び $\dot{\mathbf{v}}_0$ 、 $\dot{\boldsymbol{\omega}}$ は、構造物表面に作用する流体の圧力を積分した外力を用いて、剛体の運動方程式を解くことにより時刻歴計算される。この式(6)、(7)が、式(1)の境界値問題における構造物表面上の境界条件となる。ちなみに、固定壁での境界条件は、

$$\frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{n}} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \phi_t}{\partial \mathbf{n}} = 0 \quad (9)$$

のようになる。

谷澤<sup>1)</sup>は、境界要素法に基づいた定式化により、流体・浮体運動を連成させた境界値問題を解くことで速度場・加速度場を計算している。しかし、著者らは既往の構造計算プログラムの取り込みを容易にするために、敢えて流体部・構造計算部を独立して解き、収束計算で互いの連成を考慮する手法を選択している。この収束計算のフローを図-1に示す。

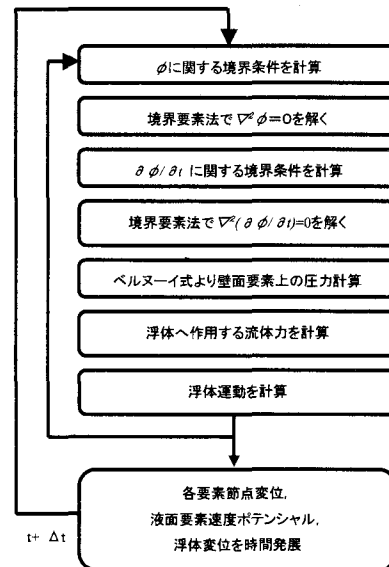


図-1 計算フロー

本計算法の精度を検証するため、移動壁による造波問題および単純矩形浮体の動揺問題に関する試計算を行ったので以下に示す。

まず、ピストン型の移動壁による造波問題に関する試計算の概要を図-2に示す。ここでは、水槽長さを造波する波の波長 $L$ の4倍とし水槽端の壁を強制的に片振幅 $e$ で正弦加振する境界条件を与えた。計算では、水槽端から $1.9 \times L$ 、 $2.0 \times L$ の位置の波形を出力し、その波形より造波された波高を求めた。また、正弦加振される壁の逆側には波減衰領域を設けて消波を行った。波減衰領域ではTanizawa<sup>2)</sup>の手法を用いて次式のように波の消波を行った。

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{1}{2} (\nabla \phi)^2 - gy - \nu(X_e)(\phi - \phi_e) \quad (10)$$

$$\frac{D\eta}{Dt} = \frac{\partial \phi}{\partial y} - \nu(X_e)(\eta - \eta_e) \quad (11)$$

この式中で $\eta$ は自由表面節点の鉛直方向座標、 $\phi_e$ 、 $\eta_e$ は目標とする自由表面状の速度ポテンシャル、鉛直方向座標値であり、この値のズレが大きいほど減衰が働く仕組みとなっている。ここでは、減衰領域内で消波を行うため $\phi_e$ 、 $\eta_e$ には $0.0$ の値を用いた。減衰係数 $\nu(X_e)$ は減衰領域

$$X_0 \leq X_e \leq X_1 = X_0 + \beta L \quad (12)$$

内で定義される次式の関数である。

$$\nu(X_e) = \alpha \left( \frac{X_e - X_0}{L} \right)^2 \quad (13)$$

式(13)の $\alpha$ は減衰強さ、式(12)の $\beta$ は減衰領域長さを調節するパラメータである。今回は、 $\alpha$ 及び $\beta$ の値として1.0を用いることとした。

計算結果を図-3に示す。図には次式で示されるピストン型造波機の造波特性関数による理論値も併記した。

$$\frac{H}{2e} = \frac{4 \sinh^2(2\pi/L)}{4\pi/L + \sinh(4\pi/L)} \quad (14)$$

ここで、 $H$ は造波波高、 $e$ は造波板の片振幅、 $L$ は波長である。図より、計算結果は概ね理論値と一致していることが分かる。

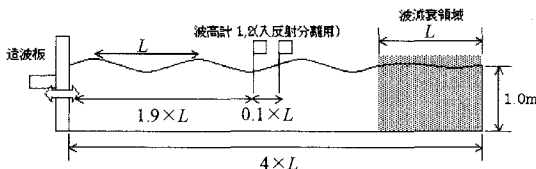


図-2 移動壁による造波問題の試計算モデル

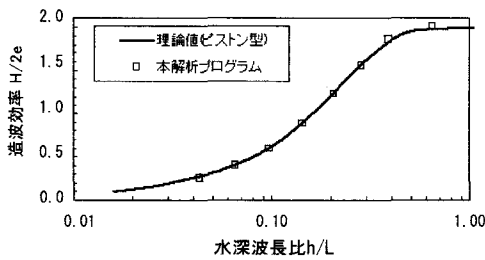


図-3 移動壁による造波問題の計算結果

次に、矩形浮体の動揺問題に関する試計算の概要を図-4に示す。この計算では、計算領域を波長の6倍とし計算領域の両端1波長分に式(10)、(11)で示した減衰領域を設けた。ただし、造波側では $\phi_e$ 及び $\eta_e$ に、あらかじめ浮体無しで計算した速度ポテンシャル、自由表面鉛直変位の値を代入した。こうすることで、目標とする波を起こしながら浮体により反射される波の水槽端での再反射を防ぐこと

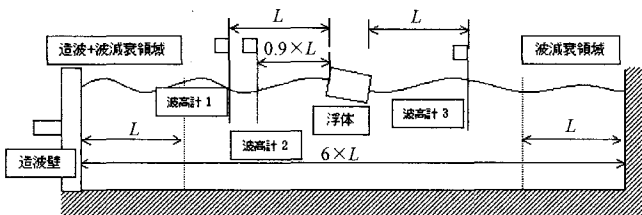


図-4 単純矩形浮体の動揺問題の試計算モデル

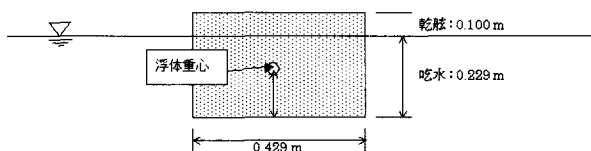


図-5 試計算に用いた浮体断面

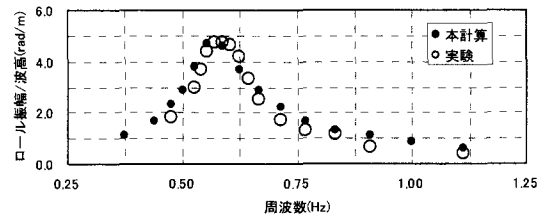
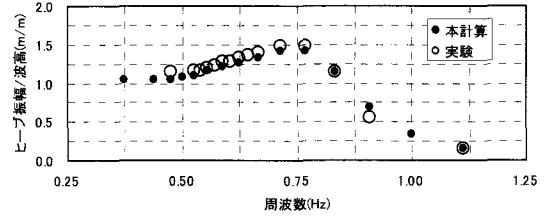
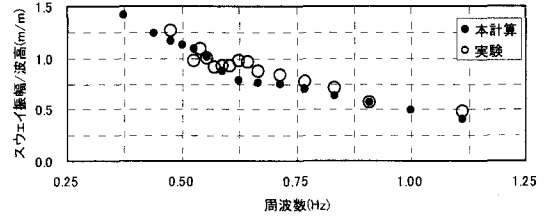


図-6 単純矩形浮体の動揺問題の計算結果

ができる。浮体の詳細を図-5に示すが、今回計算対象とした矩形浮体は、吃水に対して浮体幅が小さいためロール応答値が大きくなる。

浮体の動揺計算結果を図-6に示す。図には同様の条件にて実施した実験結果も併記する。図より、計算結果と実験結果は概ね良好な一致を示していることが分かる。

### 3. 浮力利用型人工地盤の鉛直地震時応答に関する検討

#### (1) 検討対象とする人工地盤の概要

図-7に今回検討対象とした浮力利用型人工地盤の概要を示す。今回の検討では、人工地盤が水深20m、幅200mの水路状海域に設置されることを想定してい

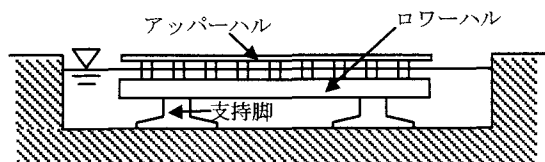
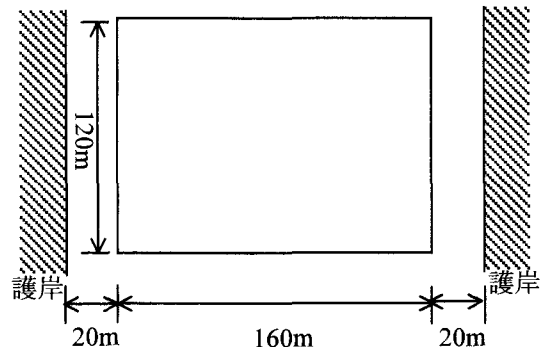


図-7 今回想定した浮力利用型人工地盤の概要図

る。人工地盤本体の大きさは160m×120mで、構造形式は、潮位変動による支持脚部反力の変動を極力小さくするためセミサブ式とし、浮力を得るローハル部と上部工となるアッパーハル部を水線面積の小さなカラムによって分離している。また、支持脚部については、地盤面への接地圧を低減するように接地面積が大きい構造である。異常時対策として、支持脚下の地盤の深層混合処理によるブロック式改良、さらには本体が単独で浮揚できる構造・機構などが考えられている。

## (2) 人工地盤の付加質量特性について

今回検討対象とした浮力利用型人工地盤の付加質量特性について、今回開発した計算法を用いて検討した。水路の幅方向の断面2次元モデルとし、構造部にはローハル部分のみをモデル化し剛体と仮定して計算した。付加質量の計算は以下に行った。

まず、浮体-地盤間のばねが無いものとして、没水浮体が絶対座標系で固定されている図-8のようなモデルを考える。このとき、浮体の絶対座標系における運動方程式は浮体を空間に固定する支持力 $F_E$ を付加した形となる。

$$m\ddot{Z} + k(Z - Z_g) = F + F_E \quad (15)$$

ここで、 $m$ は浮体の質量、 $k$ はヒープばね定数、 $F$ は浮体を受ける流体力、 $Z_g$ は地盤の絶対変位である。モデルでは、浮体の絶対加速度はゼロかつ地盤-浮体間のばねも存在しないので、(15)式の左辺はゼロとなる。よって、以下の関係が成り立つ。

$$F_E = -F \quad (16)$$

また、浮体の絶対変位 $Z$ は常にゼロであるため浮体の地盤に対する相対変位は

$$z = -Z_g \quad (17)$$

となる。ここで、 $z$ は地盤を基準面とした場合の浮体の相対変位である。浮体の地盤に対する相対運動方程式を考える場合、相対運動の強制力は浮体を空間に固定するための支持力 $F_E$ である。よって、相対運動方程式は、相対運動による付加質量 $\Delta m$ 、造波減衰 $N$ 、および(16)式を用いて以下のように表される。

$$-\Delta m \ddot{Z}_g - N \dot{Z}_g = F = -F_E \quad (18)$$

ここで、海底地盤が正弦加振動する場合を考え、地盤変位 $Z_g$ を以下のように表すこととする。

$$Z_g = A_g \sin \omega t \quad (19)$$

$\omega$ は地盤の加振角周波数、 $A_g$ は地盤振幅である。この(19)式により、浮体の地盤に対する相対運動方程式(18)式は以下のように表される。

$$-\Delta m \cdot A_g \omega^2 \sin \omega t - N \cdot A_g \omega \cos \omega t = F = -F_E \quad (20)$$

(20)式中では、地盤の加振角周波数 $\omega$ 、地盤振幅 $A_g$ が既知である。また、右辺の $F_E$ 、 $F$ については、支持力もしくは浮体表面の動水圧分布の時刻歴値が計算により求まるため既知の値である。これら既知の値を用いれば付加質量 $\Delta m$ は以下のように算出可能

である。

$$\Delta m = \frac{2.0}{A_g \omega^2 T} \int F_E(t) \cdot \sin \omega t dt \quad (21)$$

ここに、 $T$ は加振周期である。

付加質量の計算結果を図-9に示す。水深20m、ローハル-護岸間の距離 $B$ が20mの場合には、付加質量がローハル排水質量の約40倍となっている。図-9には水深100mの場合と更に $B=120m$ となるほぼ開境界に近い場合の計算結果も併記している。この場合には、水深20mの条件に比べ付加質量が1/2~1/3程度に低減することが分かる。これより、今回対象とするような閉鎖水域に人工地盤を設置する場合、浮体全体の上下応答が長周期化するものと考えられる。ただし、周波数が0.05Hz以下となるような長周期域では付加質量が減少していく傾向にあるため、長周期成分を含むような地震波ではそこまで上下応答の長周期化が見込めないものと思われる。またこの結果より、剛体としての上下応答よりも入力地震波の主要周期に近い弾性応答の方が、鉛直地震動作用時には支配的となることが分かる。

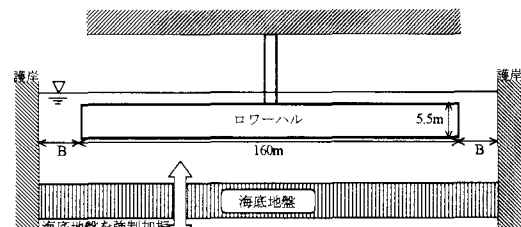


図-8 付加質量計算に用いたモデル

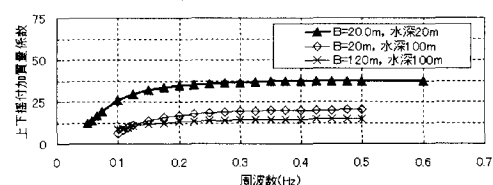


図-9 付加質量計算結果

## (3) 弾性影響を考慮した場合の人工地盤の応答特性について

先に述べた剛体ベースの計算結果より、鉛直地震動時の応答特性に関しては弾性変形の影響を考慮する必要があることが分かった。そこで、今回開発した計算法の構造運動計算部分について次式に示す運動方程式の導入を行った。

$$M\ddot{Z} + C(\dot{Z} - \dot{Z}_g) + K(Z - Z_g) = F \quad (22)$$

ここで、 $M$ は気中における構造体の質量マトリクス、 $C$ は構造体の気中における減衰係数マトリクスである。また、 $K$ は構造体の剛性マトリクス、 $F$ は構造側の各節点での流体圧積分値と加振力を合成したべ

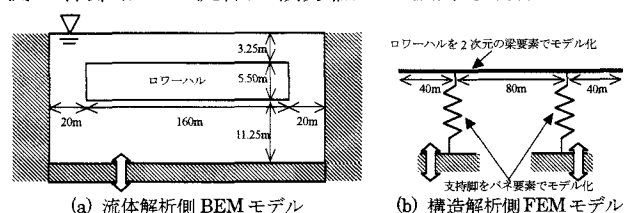


図-10 弾性変形を考慮した計算モデル

クトルである。計算では、図-10のように構造計算側を有限要素、流体計算側を境界要素にてモデル化した。流体計算側における構造物表面の境界要素節点は構造計算側の有限要素節点と対応付けられ、有限要素節点の速度・加速度と境界要素側の流体圧を互いにやり取りすることで連成計算を行った。計算では、構造体の上下運動が卓越するため流体計算での境界条件は次式のように簡略化した。

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \dot{z} \quad (23)$$

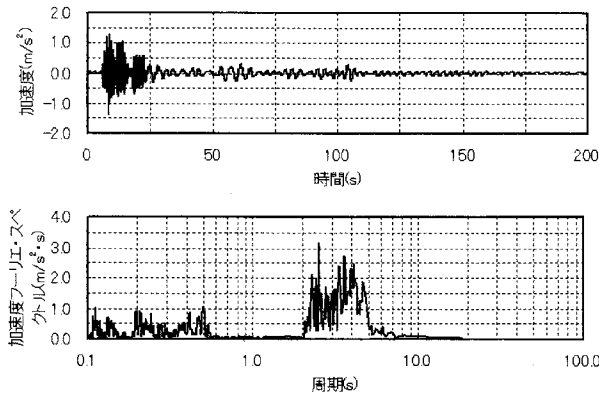


図-11 入力地震波

表-1 構造諸元 (基本条件)

項目	構造諸元
構造物寸法・材質	160×120m, 鋼製 ローハル高さ: 5.5m
断面2次モーメント (水路幅方向)	40 m <sup>4</sup>
支持脚ばね定数	5.88×10 <sup>7</sup> kN/m

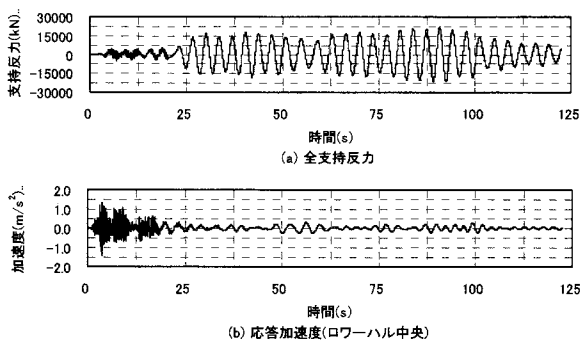


図-12 計算結果 (基本条件)

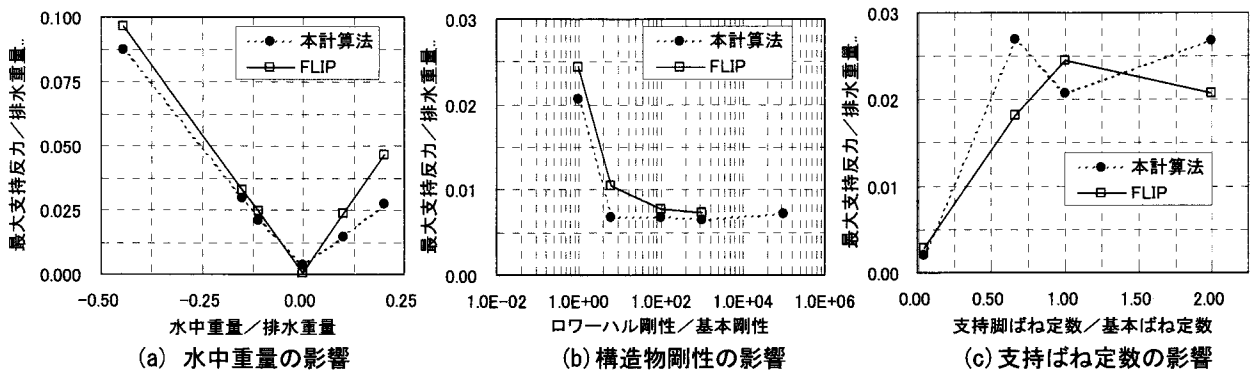


図-13 最大支持脚反力の計算結果

$$\frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) = \ddot{z} - \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{1}{2} (\nabla \phi)^2 \right) \quad (24)$$

ここに、Zは構造側節点の絶対変位である。計算に用いた地震波の波形を図-11に示す。この地震波形はプレート境界型の大地震相当のものを想定した波形で、最大加速度が1.4m/s<sup>2</sup>、2~4sの周期成分が卓越している。表-1に構造の基本条件を示す。

まず、基本条件の場合の鉛直地震応答結果を図-12に示す。短周期成分が大きい地震波初期の部分ではほとんど支持脚反力が生じず、2~4sの周期成分が卓越する地震波中・後期で反力が最大となる傾向がわかる。応答加速度については入力地震波と同様の波形となり、相対変位についてはローハル端部で最大0.9mm程度と非常に小さいレベルであった。

支持脚に生じる反力最大値の、水中重量、構造物剛性及び支持脚ばね定数による影響を整理したものが図-13である。図には汎用解析コードFLIP<sup>3)</sup>の結果も併記している。FLIP<sup>3)</sup>は自由表面運動を考慮しない計算法であるが、その結果は本計算結果と概ね一致しており、水中重量の絶対値が小さく、構造の剛性が高いほど支持脚反力が小さくなることが分かる。支持脚ばね定数については、その値が小さいほど支持脚反力が小さくなる傾向にある。ただし、排水重量が85%~115%の範囲では支持脚に作用する反力が排水重量の3%以下となっている。

#### (4) 縮尺1/80模型による水中加振実験

浮力利用型人工地盤の鉛直地震応答に関して、図-14に示すような水中加振実験を実施した。本実験では、実験設備の制約から護岸に囲まれた閉鎖海域を再現できなかったため、模型直下の3m幅のみを加振し、側方は開境界とした。実験ケースは、ローハルを模したアクリル板の板厚と、支持脚ばねの硬さをパラメータとして表-2のように設定した。地震波には、図-10に示したものを扱い、相似則にはフルード則を用いた。

実験と比較するための計算モデルを図-15に示す。ここで、実験の前段階として、アクリル板模型に対し静的載荷および気中振動実験を実施した。これを解析モデルの固有値解析結果と比較することで表-3のように等価な弾性係数を設定した。ただし、水中では弾性係数を7500MPaと高めにしなければ実験と

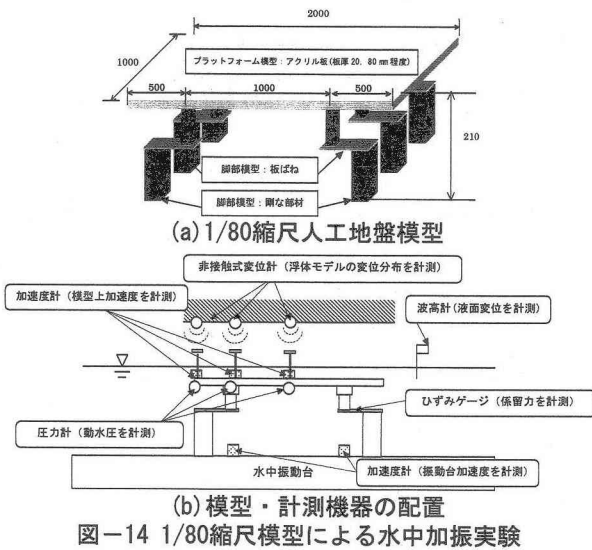


図-14 1/80縮尺模型による水中加振実験

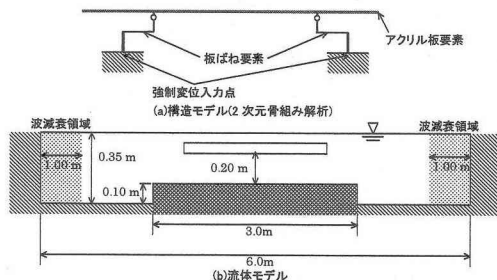


図-15 比較用計算モデル

表-2 実験ケース

ケース名	模型板厚	支持脚ばね定数
CASE-1	小	大
CASE-2	小	小
CASE-3	大	大

※模型板厚 大:板厚 80mm相当 小:板厚 20mm相当  
 支持脚ばね定数 大:ばね定数 12960 kN/m 小:ばね定数 730 kN/m

表-3 計算モデルで使用した弾性係数

静的載荷試験	解析モデル(気中)	解析モデル(水中)
3870MPa	5500MPa	7500MPa

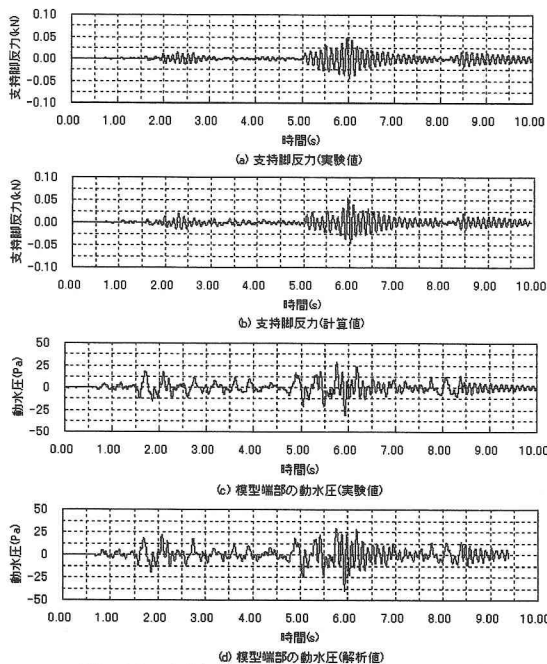


図-16 実験と解析の比較 (CASE-1)

の整合が悪いことが判明した。これは、今回のモデルが2次元の梁であるのに対し模型は板として3次元の挙動をすることや、アクリルの吸水特性・温度依存性による影響等が原因と考えられる。

図-16にCASE-1の時刻歴波形を示す。図より計算結果と実験結果は概ね一致していることが分かる。

次に、模型剛性と支持脚ばね定数の支持脚反力への影響を図-17に示す。まず、模型剛性の影響については、実験と計算の両方で剛性が高いほど支持脚反力が小さくなる傾向となった。また支持脚ばね定数については、実験と計算の両方でばね定数が小さいほど支持脚反力が小さくなる傾向となった。

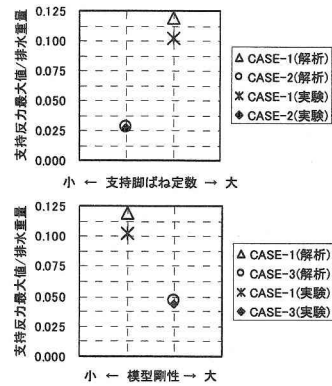


図-17 模型剛性、支持脚ばね定数の支持脚反力への影響

#### 4. まとめ

本研究の成果を以下に述べる。

- (1)流体と構造物の動的相互作用を直接的に取り扱う計算法を開発し、実験等で妥当性を確認した。
- (2)鉛直地震動作用時、浮力利用型人工地盤の支持脚反力は水中重量、支持脚ばね定数、構造物の剛性の影響を受ける。鉛直方向の地震動に対する耐震性という観点からみると、構造物の水中重量を小さくし柔らかいばねで支持することにより、支持脚反力を小さくすることが可能である。

今後の実用化に向けては、地震に対する地盤挙動や3次元の効果なども考慮する必要がある、これが今後の課題である。

#### 参考文献

- 1) 谷澤克治：加速度ポテンシャルによる波浪中浮体運動の非線形理論と数値解法の研究，学位論文，大阪大学，127p, 1997.
- 2) Tanizawa, K : Long time fully nonlinear simulation of floating body motions with artificial damping zone, 日本造船学会論文集, d第180号, pp.311-319, 1996.
- 3) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1990.