

浅海域浮体構造物における剛性と鉛直地震応答について

RELATIONS BETWEEN STIFFNESS AND SEISMIC RESPONSE OF FLOATING STRUCTURE IN SHALLOW WATER

日下理¹・上田茂²・池末俊一³・大輝聡⁴

Tadasu KUSAKA, Shigeru UEDA, Shun-ichi IKESUE and Satoshi OHTERU

¹ フェロー会員 工修 中電技術コンサルタント(株) 道路・臨海本部(〒734-8501 広島市南区出汐二丁目 3-30)

² フェロー会員 工博 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)

³ 正会員 工博 三菱重工業(株) 長崎研究所(〒851-0392 長崎市深堀町五丁目 717-1)

⁴ 正会員 中電技術コンサルタント(株) 道路部(〒734-8501 広島市南区出汐二丁目 3-30)

Former types of the reclamation system and the pier system for ground held a problem that it is difficult on improvement of the load reduction to the circumference environment in case of bigger water depth. From a viewpoint of the load reduction, a floating structure of the buoyancy use type effectively is proposed.

Because a floating structure as the artificial ground is used on a large scale, there is the thing that a seismic response depends on stiffness and the leg spring. This research investigates the relation between float stiffness and a vertical seismic response by a tank test and numerical analysis. As a result, when float stiffness is enlarged and the leg spring constant is set up small, the action load to a supporting leg turns out that it is advantageous.

Key Words : *Floating structure, seismic response, vertical motion, semi-submersible*

1. はじめに

海洋上に人工的に築いた従来型の地盤は、関西国際空港に代表される埋立地盤や東京国際空港 D 滑走路に代表される栈橋方式の地盤のものであった。しかし、これらの方式では、水深がさらに大きくなった場合や周辺環境への負荷低減という観点からは、対応が難しいという課題を抱えていた。これらの課題に対応するひとつとして、浮力を有効に活用した浮力利用型の人工地盤¹⁾が提案されている。

大型の浮体構造物を浅海域に設置して人工地盤として利用する場合、浮体構造物の曲げ剛性(以下、浮体剛性)やその支持形式によっては、地震時の鉛直方向の応答(以下、鉛直地震応答)が、剛体の場合より大きくなることもある。

そこで、本研究では、浮体剛性や支持形式の違いが鉛直地震応答にどのように影響を及ぼすかを検討するため、①支持脚のばね定数と鉛直地震応答について、1/80 縮尺模型による水槽実験と数値解析の比較を行った上で、②数値解析により、実機規模での応答特性の把握を行った。なお、水平方向の地震に対しては、減衰装置や変位吸収機構

で対応できることが多いので、今回は鉛直地震に対する応答を検討対象とした。

2. 検討対象の浮体構造物

対象とする浮体構造物は、図-1 に示すセミサブ方式で、浮力を活用することにより、長軸方向:2点、短軸方向:3点、合計6点で支持させるものである。表-1 に構造諸元を示す。図中の支持脚には、テンションレグ式または重力式が考えられる。排水重量を構造物の空中重量(自重とバラストの合計)より大きくすればテンションレグ式になり、排水重量を小さくすれば低接地圧型の重力式となる。なお、セミサブ方式は潮位変動の影響が小さいという特長を有しており、上下変動が少ないために護岸側との連絡が容易である。

3. 実験による鉛直地震応答の現象把握

この節では、実験結果と数値解析結果の比較により、鉛直地震応答の基本的な現象把握と数値解析の適用性について確認する。

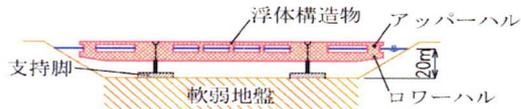
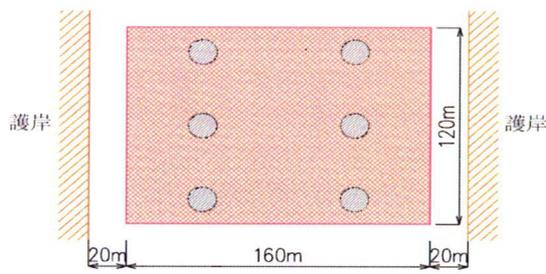


図-1 浮体構造物の概念図

表-1 浮体構造物の構造諸元

項目	構造諸元
浮体構造物	160m×120m, 鋼製 (ローワーハル高 5.5m)
全体質量	9.67×10^7 kg
浮体構造物の剛性	8.232×10^9 kN・m ²
支持脚	構造物長手方向 2 点支持
水深	20m
護岸	鉛直護岸(固定境界)

(1) 実験の方法

- ・実験施設：実験は、三菱重工業（株）広島研究所の水中振動台を使用して行った。この振動台の概略仕様は、長さ 3m×幅 3m×高さ 1m、加振力：X 方向 500kN、Y 方向 100kN、Z 方向 160kN である。
- ・模型：実験水槽の大きさ、振動台の性能、計測器の精度などを考慮して、縮尺を図-1 の 1/80 とした。模型の材質には、表-1 の剛性に合わせやすいものとしてアクリルを用いた。
- ・支持方式：想定した実機はテンションレグ式であるが、アクリル単位体積重量の関係で実験では重力式となっている。しかし、後述の 4. (3) において示すように、水中重量/空中重量の絶対値を同じにすれば、テンションレグ式と重力式とはほぼ同じ現象になる。図-2 に実験模型の状況を示す。
- ・計測：図-3 に計測器の取り付け位置を示す。

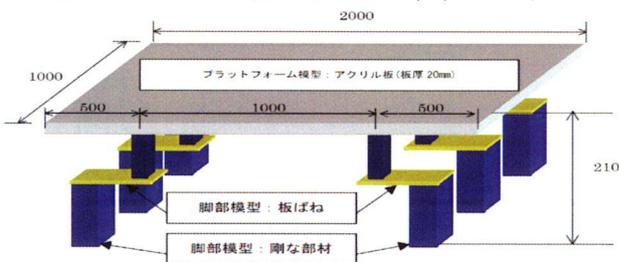


図-2 水槽実験の模式図

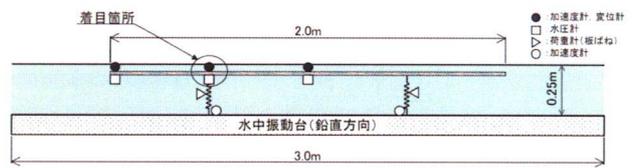


図-3 計測器の配置

(2) 実験の条件

- ・実験に用いた地震波：実験には、直下型の地震を想定した地震波を用いた。図-4 に時刻歴波形、図-5 にフーリエスペクトルを示す。ここで、 a_v ：入力地震の加速度 (m/s²)、 f ：周波数 (Hz)、 S_{av} ：スペクトル (m/s²・s)、 t ：時間である。
- ・実験ケース：表-2 に実験ケースを示す。実験は、剛性影響が出やすくするために浮体剛性 (EI , kN・m²) を小さくし、支持脚ばね定数 (k , kN/m) を 2 種類とした。ここで、 E ：浮体構造物材質の弾性係数 (kN/m²)、 I ：断面 2 次モーメント (m⁴) である。

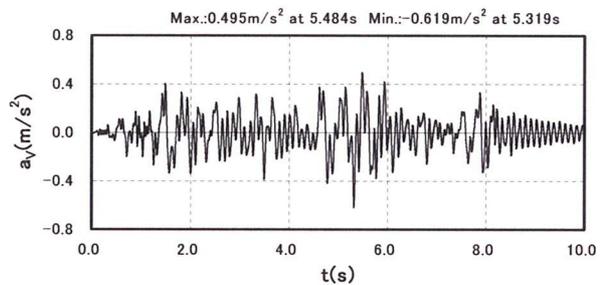


図-4 実験の入力地震波加速度の時刻歴波形

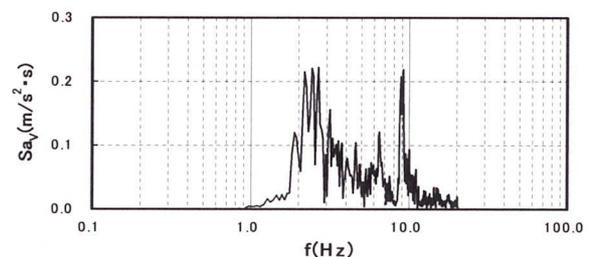


図-5 実験の入力地震波加速度のフーリエスペクトル

表-2 実験ケース

項目	幅 (奥行き) m	弾性係 数 E (kN/m ²)	断面 2 次モ ーメント I (m ⁴)	単位幅当りの 浮体剛性 EI (kN・m ²)	単位幅当りの 支持脚ばね k (kN/m)	備考
ケース 1	1.0	7.5×10^8	6.67×10^{-7}	5.0	365.0	テンショ ンレグ式
ケース 2	1.0	7.5×10^8	6.67×10^{-7}	5.0	6,480.0	重力式相 当

(3) 解析

構造物の鉛直方向変位を u 、流体の圧力を p 、自由表面の鉛直方向変位を η としたとき、構造と流体の連成方程式は式 (1)～式 (3) で表すことができる。

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u + [Q]P + \{f_0\} = 0 \quad (1)$$

$$[T]\{\ddot{u}\} + [K]\{P\} - [Q]\{\ddot{u}\} = 0 \quad (2)$$

$$[K]\{\eta\} - [T]\{P\} = 0 \quad (3)$$

ここで、 f_0 : 外力, $[K]$: 剛性マトリックス, $[M]$: 質量マトリックス, $[Q]$: 連成マトリックス, $[T]$: 自由表面要素のマトリックスである. 具体的な計算には, 汎用応力解析コード (FLIP)²⁾ を使用した.

解析では, 2次元, 非粘性, 非圧縮性, 線形, 水底面を剛の条件とした. 水底面が軟弱土の場合には, 動水圧の総荷重が小さくなる傾向³⁾ であるが, 今回は主に支持脚作用荷重に着目しているため, 大きめの値が出る水底面剛の条件とした. 実験解析のメッシュ図を図-6に示す. 同図の水底中央部の3mは, 水中振動台が設置されているので, 少し底上げになっている.

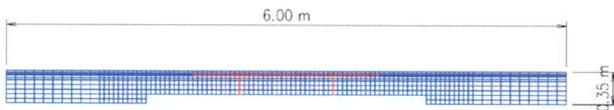


図-6 解析のメッシュ図の例 (実験)

(4) 実験結果と解析結果の比較

実験結果のうち代表的な浮体絶対変位 (u_{z0} , mm) と支持脚に作用する全荷重 (F_T , N) について, 図-3の着目箇所の実験結果と解析結果の比較を図-7, 図-8に示す. なお, 図-8の実験波形は, 図-2に示す剛部材の間にある板ばねの計測記録であるが, 水中振動台の高周波数成分を除去したものである.

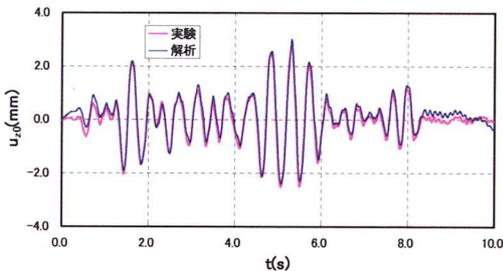


図-7 浮体絶対変位の実験結果と解結果の比較

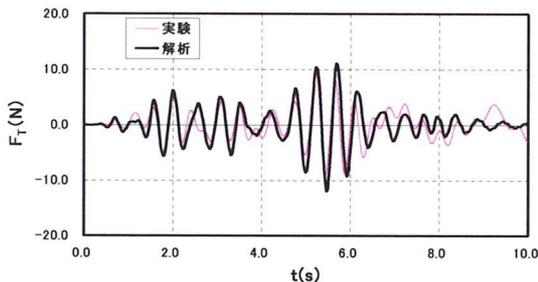


図-8 支持脚作用荷重の実験結果と解析結果の比較

次に, 支持脚のばね定数と応答の関係を図-9に示す. 実験と解析の比較の結果, 変位に関しては支持脚ばね定数の影響が小さく, 実験結果と解析結果は一致するが, 一方, 支持脚作用荷重に関

しては, 剛な支持脚の場合には解析の方が小さめの値をとる.

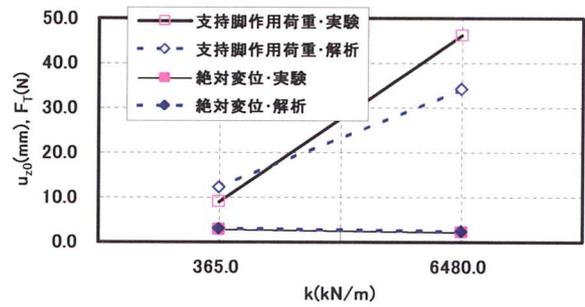


図-9 支持脚ばね定数と応答の関係

4. 実機規模の鉛直地震応答

この節では, 前節で適用性を確認した数値解析の利用により, 実機規模の鉛直地震応答の特性を明らかにする.

(1) 検討の条件

図-10に2次元の解析モデルの一例を示す. 浮体剛性と支持脚ばね定数(地盤ばねを含む)には, これ迄に試設計をした事例の代表的なものとして, 表-3, 表-4を設定した. なお, 表-3, 表-4の中の幅とは, 試設計事例の値であり, 図-10の解析模式図の奥行きに相当するものである. 表-5は, この節で検討する解析ケースを示す. ケース11は図-1を対象としたものであり, ケース12~14は浮体長さの影響を調べるためである. 解析に使用した地震波は, 模擬地震波として作成した図-11, 図-12に示す直下型とプレート境界型の2つである. 後述するように, 直下型地震に対する応答が大きかったので, 4.(3)~(6)には直下型地震, 4.(7)にはプレート境界型地震波を使用した.

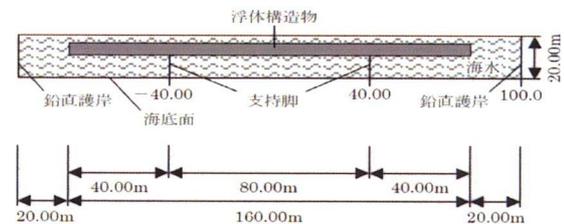


図-10 実機規模の解析の模式図例(2次元)

表-3 検討に用いた浮体剛性

項目	幅 m	弾性係数 kN/m ²	断面2次 剛性 m ⁴	剛性 kN・m ²	単位幅当りの剛性 kN・m ² /m
Aプロジェクト	120	2.05E8	40.0	0.823E10	6.86E7
Bプロジェクト	330	2.05E8	358.6	7.381E10	27.4E7
Cプロジェクト	260	2.05E8	884.0	18.19E10	68.6E7

表-4 検討に用いた支持脚ばね定数

項目	幅 m	支承ばね kN/m	支持脚ばね kN/m	地盤ばね kN/m	合成ばね kN/m	単位幅当りのばね kN/m
TL方式相当	120	0.25E7	0.393E7	4.41E7	0.147E7	12,250
重力式標準相当	120	2.45E7	9.80E7	4.41E7	1.372E7	114,000
重力式上限	120	—	9.80E7	4.41E7	29.40E7	245,000

表-5 実機規模を対象にした解析のケース

項目	概略図 (左右対称)	長さ L (m)	幅(奥行き) B (m)	高さ D (m)	脚数 n (-)	脚間距離 l _o (m)	水深 h (m)	浮体迄の距離 l _g (m)	護岸迄の距離 L _B (m)
ケース11		160.0	1.0	5.5	2	80.0	20.0	3.25	20.0
ケース12		160.0	1.0	5.5	4	40.0	20.0	3.25	40.0
ケース13		240.0	1.0	5.5	5	50.0	20.0	3.25	40.0
ケース14		320.0	1.0	5.5	6	56.0	20.0	3.25	40.0

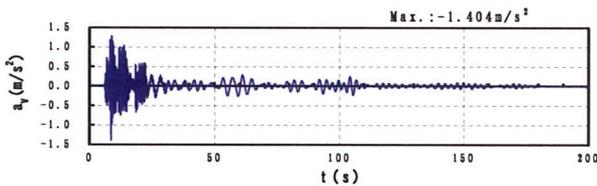


図-11(a) 入力地震波の時刻歴波形(直下型)

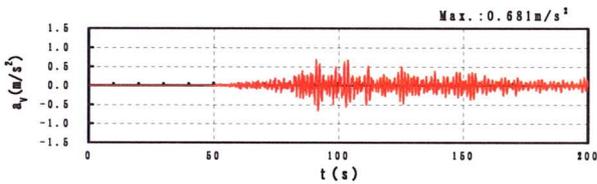


図-11(b) 入力地震波の時刻歴波形(プレート境界型)

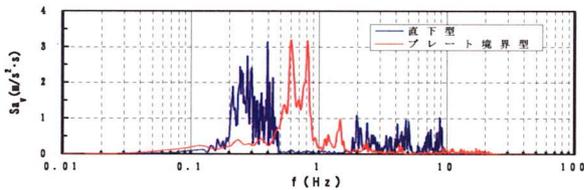


図-12 入力地震波加速度のフーリエスペクトル

(2) 正弦波入力に対する応答

ケース 11 を対象にした正弦波入力(加速度振幅:1m/s²)に対する応答結果を図-13に示す。ここで、 k : 支持脚のばね定数(kN/m)、 g : 重力の加速度(m/s²)、 W_w : 水中重量(kN)(空中重量-浮力)である。低振動数帯において、全ての応答値が1.0である。これは、入力地震の a_g の加速度場においては、浮体への作用力は水中重量(W_w)×震度(a_g/g)になることを意味し、水平方向に対する震度法の考え方と同一である。

図-14 は、ばね定数と付加質量(M_a , kg)の関係を示したものである。ここでの付加質量とは、

$$(M + M_a) = \left\{ \frac{1}{(2\pi f_{z0})^2} \right\}^2 k \quad (4)$$

と定義した。ここで、 f_{z0} : 図-13における共振振動数(Hz)、 M : 空中質量(kg)、 V : 排水体積(m³)、

ρ : 流体の密度(kg/m³)である。図-14には、剛体相当の付加質量も併記してあるが、剛体の場合は一定の値になっている。一方、弾性体の場合には付加質量は浮体剛性とばね定数に依存しており、剛体の場合より複雑である。

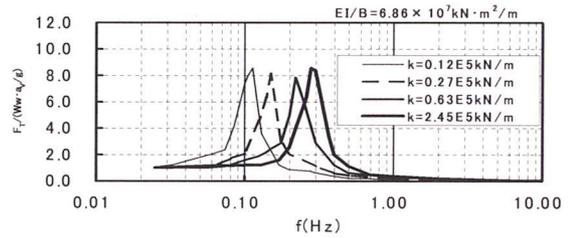


図-13(a) 弾性体における支持脚作用荷重の正弦波応答

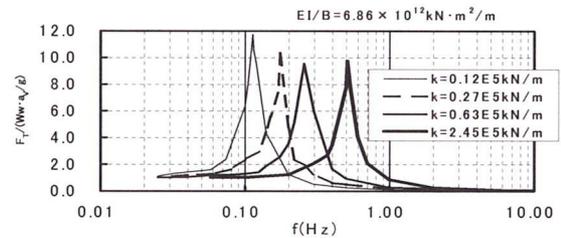


図-13(b) 剛体における支持脚作用荷重の正弦波応答

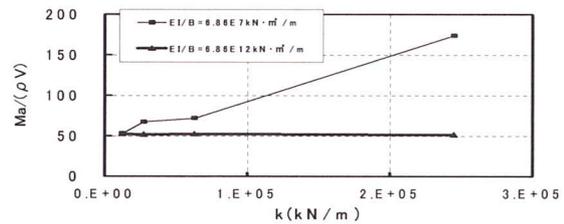


図-14 支持脚ばね定数と付加質量係数の関係

(3) 水中重量の影響

図-15 は、ケース 11 を対象にして水中重量の影響を調べたものである。ここで、 W : 空中重量(kN)である。 W_w/W が負とは、空中重量より浮力が大きいのでテンションレグ式の支持状態を意味し、逆の W_w/W が正とは、浮力活用型の重力式の支持状態を意味する。図-15は、 $|W_w/W|$ が同じであればテンションレグ式の現象と重力式の現象はほぼ同じであることを示している。

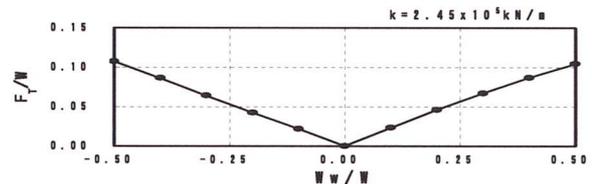


図-15 水中重量と支持脚作用荷重の関係

(4) 構造物剛性の影響

図-16 は、浮体剛性と支持脚への作用荷重の関係を図示したものである。同図から、テンションレグ式を想定した支持脚ばねが小さいときは、浮体剛性の影響が小さく、重力式相当の支持脚ばね

が大きいときは、浮体剛性の影響が大きいことがわかる。

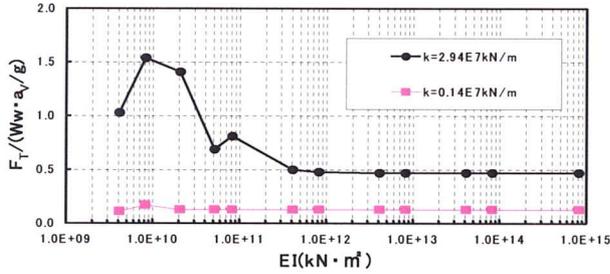


図-16 浮体剛性と支持脚作用荷重の関係

(5) 支持脚ばね定数の影響

一方、図-17は、浮体剛性を $EI=8.23 \times 10^9 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ の一定(弾性浮体)として、支持脚ばね定数と支持脚への作用荷重の関係を図示したものである。支持脚のばね定数が増加するにつれて支持脚への作用荷重が大きくなるが、次第にほぼ一定になる。

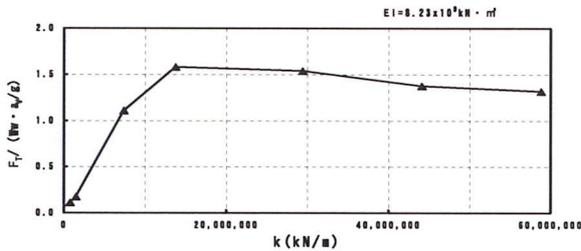


図-17 支持脚ばね定数と支持脚作用荷重の関係

(6) 特性係数の影響

浮体剛性と支持脚ばね定数の双方を考慮できるものとして、式(5)で定義される特性係数 (α, m^{-1}) を導入する。

$$\alpha = \{\kappa_z / (EI/B)\}^{1/4} \quad (5)$$

ここで、 κ_z : 浮体単位面積当りの復元力 (N/m^3 , 支持脚ばね定数×本数/浮体底面積)である。この特性係数を利用して、上記図-16, 図-17の値を整理し直すと、浮体剛性と支持脚ばねに関して、図-18が得られる。ここで、 D : 浮体高さ(m)である。同図の曲線は、多くのプロットの平均的なものを示したものであり、横軸の左側ほど、「剛性大」または「ばね定数小」を意味し、右側ほど、「剛性小」または「ばね定数大」を意味する。

表-5のケース12~14を対象にして、上述の特性係数と支持脚作用荷重の関係を調べた結果が、図-19(a)~(c)である。支持脚作用荷重は、浮体剛性と支持脚ばね定数の影響を受けている。縦軸は、支持脚の作用荷重の無次元表示であり、1.0を越えるものは地盤からの入力地震力より大きな応答になっていることを意味する。つまり、浮体剛性や支持脚ばね定数によって、支持脚の作用荷重は大きく変化している。

ひとつの閾値として、図-19の縦軸の0.5を境にして、 EI/B と αD の関係を整理し直してみると、図-20が得られる。閾値の0.5とは、次のことを

参考にして設定したものである。

- ・支持脚作用荷重に関して、増減幅の特段の応答がなければ、図-19の縦軸は1.0になるので、その半分を弾性体と剛体の境とした。(縦軸が1.0になる理由は、4.(2)に記した)
- ・図-19の曲線を見ると、同図の縦軸の0.5付近が最も勾配が大きくなっており、この付近で応答特性が変化していると判断した。

以上のことより、 αD が概ね0.2以下の場合には剛体の挙動を示し、概ね0.2以上になると弾性体の挙動となり支持脚の作用荷重が大きくなることがわかった。

図-21は、 αD が同じ条件での浮体の変形分布である。浮体長さに関係なく、 x/L が±0.25付近で変位の最小値となる。

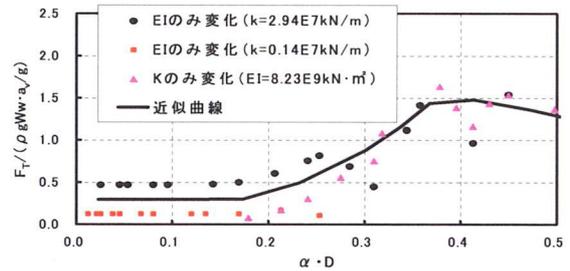


図-18 特性係数と支持脚作用荷重の関係

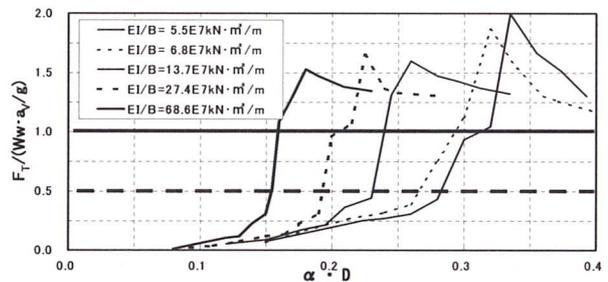


図-19(a) ケース12の特性係数と支持脚作用荷重の関係

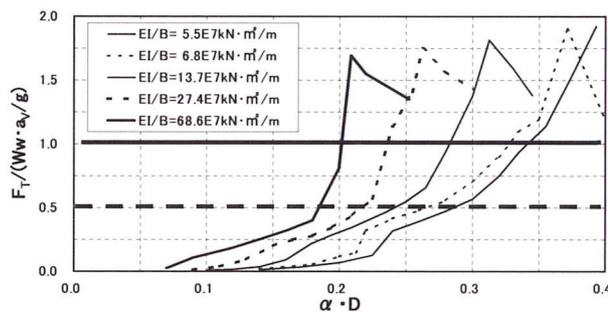


図-19(b) ケース13の特性係数と支持脚作用荷重の関係

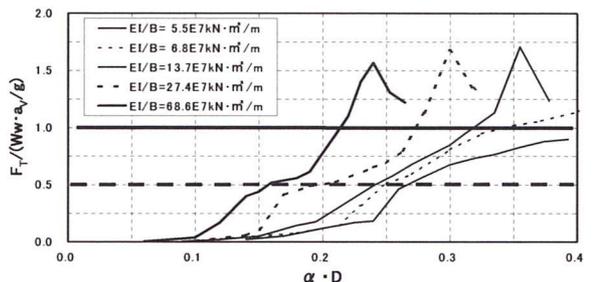


図-19(c) ケース14の特性係数と支持脚作用荷重の関係

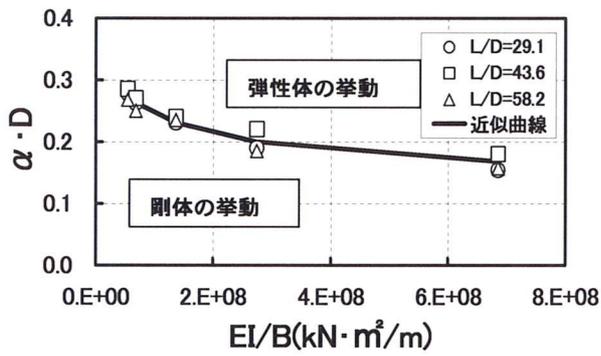


図-20 剛性と特性係数の関係

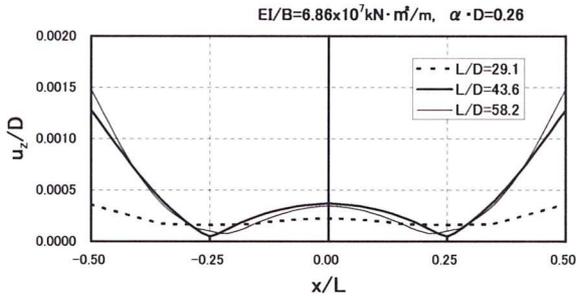


図-21 距離と浮体変位の関係

(7) 入力地震波の影響

図-22 は、ケース 11 を対象にして入力地震波の影響を調べた結果である。直下型地震波の方が、大きい支持脚作用荷重を与える結果になっている。図-23 の変位応答スペクトルからみると、支持脚ばね定数が表-4 の値の範囲であれば、共振振動数は 0.1Hz~0.4Hz 程度 (図-13) にあるので、図-22 と図-23 の傾向は一致している。

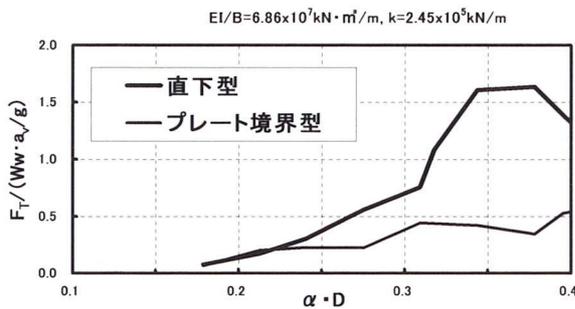


図-22 入力地震波の影響

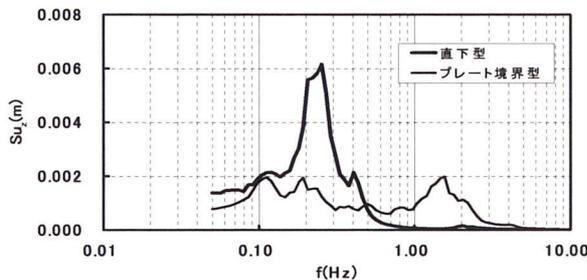


図-23 変位応答スペクトル

(8) 適用性に関する考察

前述の 4. (3)~(7) に述べた応答特性は、厳密には表-5 に示す条件の範囲内のものであるが、図-24 は、基本設計段階での浮体剛性や支持脚ばね定数の選定には利用できるものである。浮体高さが表-5 の条件から少し外れたとしても、 αD は、図-24 に示すようにそれほどには変化しない。

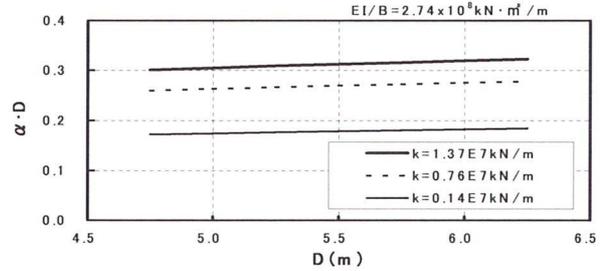


図-24 浮体高さ特性係数の関係

5. まとめ

弾性浮体の鉛直地震応答に関する実験・解析を実施した結果、下記のことが明らかになった。

- ・式(4)で定義する付加質量は、浮体剛性と支持脚ばね定数の双方に依存し、剛体浮体の付加質量より大きくなる。
- ・支持脚への作用荷重は、式(5)で定義する特性係数に依存し、特性係数(α) \times 浮体高さ(D)が概ね 0.20 以下の場合には剛体としての挙動を示し、概ね 0.20 以上の場合には弾性体としての挙動を示す。
- ・浮体剛性は、上部荷重やたわみ制限で決まることが多いので、特性係数は支持脚ばね定数で調整する方が対応しやすい。 αD が 0.16~0.2 以下の場合には、支持脚への作用荷重 ($F_z / (W_w \cdot a_z / g)$) は概略 0.5 以下と推定される。

参考文献

- 1) 池末俊一, 石井元悦, 熊本直樹, 日下理, 大輝聡, 上田茂: 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, 海洋開発論文集, Vol.20, pp.1293-1298, 2004.
- 2) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990.
- 3) 井上義行, 村井基彦, 野間裕一郎: 大型浮体の海震による応答解析, 第 16 回海洋工学シンポジウム, vol.16, pp.89-96, 2001.