

セミサブ型浮体式免震構造物を対象とした三次元地震応答解析

Three-Dimensional Seismic Response Analysis of Semi-Submersible-Type Isolation Structure Based on Expanded Mild Slope Equations

長谷部雅伸¹・大山巧²

Masanobu HASEBE and Takumi OHYAMA

Three-dimensional expanded mild-slope equation models were applied to seismic response analysis of semi-submersible-type isolation structure. Against horizontal vibration, damping effects caused by wave generation calculated by the 3D-model was relatively weak, and the peak of magnification factor indicated larger value than the results of 2D-model. We also estimated axial forces of rubber bearings under vertical and horizontal external vibration, and found that not only heaving but also rocking motion increases axial forces.

1. はじめに

浮体式免震構法では浮力によって構造物重量を支持することができるため、陸上建築の分野で広く用いられている基礎免震のような支持荷重によるせん断剛性の制約が緩和され、固有周期を長周期に設定することが可能である。最近実用化された浮体式免震建築物の例(土屋ら, 2005)では、建物重量を浮力と積層ゴムの双方で支持する構造形式(以下、パーシャルフロート免震工法とする)が採用されており、実際の地震動に対する観測からも良好な免震性能が確認されている(猿田ら, 2006)。

筆者らはこの新しい浮体式免震構法を、湖沼や港湾など比較的静穏な水域への免震人工地盤として活用するための検討を行ってきた。特に水線面積が小さく潮汐による軸力変動が小さいセミサブ型浮体式免震構造については、断面二次元モデルによる地震応答解析(長谷部ら, 2007)が行なわれているものの、地震動に伴って発生する水面波の回折・屈折が考慮されておらず、周辺地形と構造物の配置によっては実現象の再現性に疑問が残る。とりわけ上下・回転運動も含めた三次元的な応答特性を把握することは、支持部材に作用する軸力変動の正確な推定に直結する構造設計上の重要な課題でもある。

そこで本研究では、セミサブ型パーシャルフロート免震人工地盤を主対象とした三次元地震応答解析により、波の平面的な伝播による応答特性の変化と浮体の三次元的な応答に伴う支持構造の軸力変動について、断面二次元モデル、およびポンツーン浮体との比較を交えて検討を行なう。

2. 数値モデル

(1) 数値モデルの概略

本研究では、筆者らが前報(長谷部ら, 2007)において拡張緩勾配方程式(大山ら, 1996)を元に開発した地震応答解析モデルを用いる。本解析モデルは水深変化や周辺の護岸配置による屈折・反射・回折の影響を考慮できることに加え、計算効率が高めという実用上の利点も有する。ただし従来の拡張緩勾配方程式モデルはポンツーン型浮体の動揺解析を対象としたものであったが、本モデルでは構造体没水部上部の流体運動も考慮することでセミサブ型浮体への適用も可能となっている。詳細は長谷部ら(2007)を参照されたい。

(2) 検討条件の設定

検討対象としたセミサブ型浮体式免震構造物と周辺地形の状況を図-1に示す。浮体構造物は上部デッキ、没水部ともに平面形状が100m四方の矩形であり、10m~17mの水深変化がある幅140mの水路状海域に設置されているものとする。また構造体没水部は高さが7mであり、上面・底面はそれぞれ水面下2m, 9mに位置する。

浮体構造物は総重量が $1.11 \times 10^6 \text{kN}$ (113,000tf)、没水部体積が $70,000 \text{m}^3$ であり、海水の比重を1.03とすると $7.07 \times 10^5 \text{kN}$ (72,100tf)の浮力が作用することになる。浮力が差引かれた残りの $4.01 \times 10^5 \text{kN}$ (40,900tf)の荷重(浮体総重量の約36%)は、1600mmの積層ゴム16台によって支持される。図-2は比較のために設定したポンツーン型浮体構造である。喫水が7mである他は、図-1のセミサブ型浮体と浮体重量、没水部体積、免震機構等の緒元は同一である。表-1に両者の構造物緒元をまとめる。

なお、セミサブ型浮体の上部デッキを支持するカラム(カラム)の流体力については、没水部分に作用する流体力や、支持構造から伝達する外力と比較して非常に小さいオーダー

であるため、本検討では考慮しないものとする。

解析では浮体中心の水面上を原点とし、鉛直上方をz軸の正とする。x軸、y軸はそれぞれ水路方向、水路と直行する方向に設定する。また、水路の両端は水面波が透過する放射境界とし、岸壁の反射率は0.9とする。三次元解析では計算領域が開境界と岸壁の二種類の境界で囲まれているのに対し、AA'、BB'断面を対象とした二次元解析では両端が岸壁もしくは開境界となる。

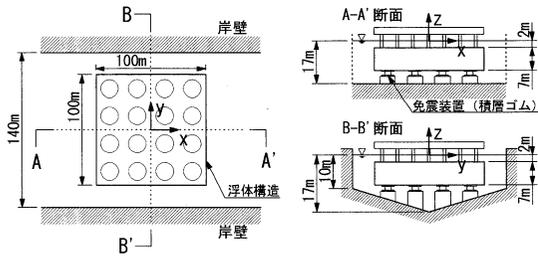


図-1 セミサブ型パーシャルフロート免震構造物

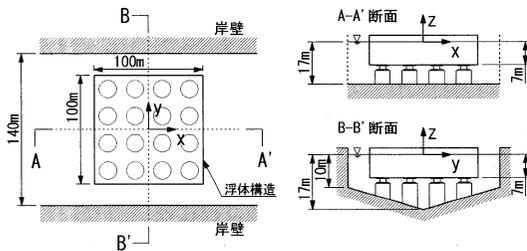


図-2 ポンツーン型パーシャルフロート免震構造物

表-1 構造物の緒元

項目	セミサブ	ポンツーン
浮体総重量 [kN]		1.11×10^6
作用する浮力 [kN]		7.07×10^5
没水部上面深度 [m]	2.0	-
没水部底面深度 [m]	9.0	7.0
積層ゴムの数 [個]		16
免震装置の等価水平剛性 [kN/m/個]		6330
免震装置の鉛直剛性 [kN/m/個]		1.42×10^7
減衰定数 (水平)	0.08 (8%)	
減衰定数 (鉛直)	0.02 (2%)	

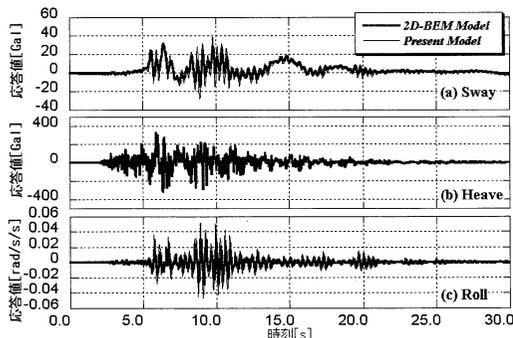


図-3 断面2D-BEMモデルとの地震応答に関する比較

(3) 解析モデルの検証

本解析モデルの検証として、没水部上の流体領域を考慮した断面二次元BEMモデルとの比較を行なった。図-1のセミサブ型浮体B-B'断面を対象とし、水平、鉛直方向にそれぞれ神戸NS波(最大加速度818Gal)、神戸UD波(最大加速度332Gal)を同時に入力したケースでの水平、上下、回転方向の加速度応答を図-3に示す。なおBEMモデルでは非定常の時間発展解法を用いており、本解析モデルは周波数領域での応答に逆フーリエ変換を施している。上下、回転運動に関しては両モデルの解析結果はほぼ同じ波形となっており、水平方向の応答についてもピーク値が若干異なっているものの比較的良好な一致が見られた。

3. 水平振動に対する応答特性

x方向の正弦振動に対する加速度応答倍率を図-4に示す。セミサブ、ポンツーン共に、3Dモデルを用いた解析では、断面2Dモデルのケースに比べてピーク値が大きくなっていることがわかる。図-5にて造波減衰係数を比較してみると、3Dモデルでは全周波数帯域にわたり非常に小さな値となっていることがわかる。セミサブ型浮体では固有周期である $T=6.7$ 秒での造波減衰係数の相違が著しい。 $T=6.7$ 秒での断面二次元モデルでの半周期間での水面波の発生状況を図-6に、三次元モデルにおいて発生する水面波振幅の分布を図-7に示す。断面2D解析からは、造波減衰係数が極大となる周期において図-6のように没水体上部に両側を自由端とする定在波が発生し、浮体の存在しない領域では進行波が水路方向に遠方へと伝播している様子が確認できる。これに対し3D解析では明確な共振波が発生せず、水路方向に伝播する進

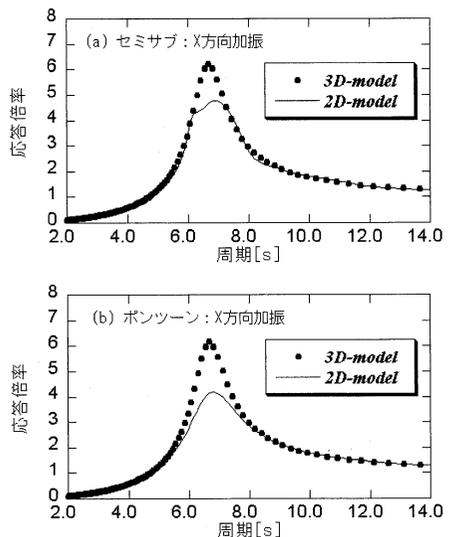


図-4 x方向加振時(AA'断面)の加速度応答倍率

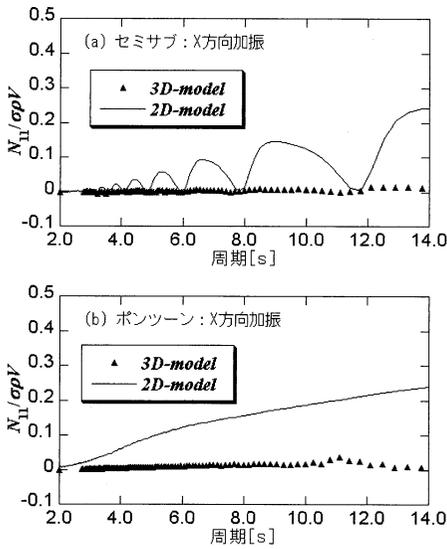


図-5 x方向加振時(AA断面)の造波減衰係数

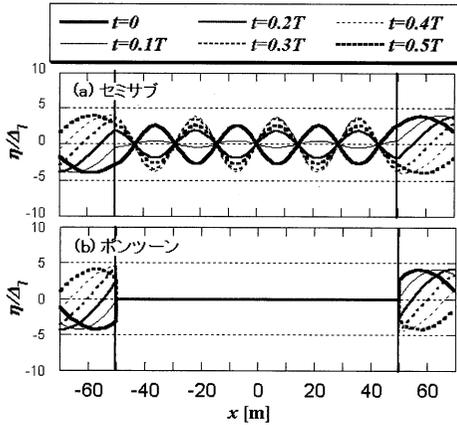


図-6 x方向加振時に発生する水面波の状況(断面2Dモデル)

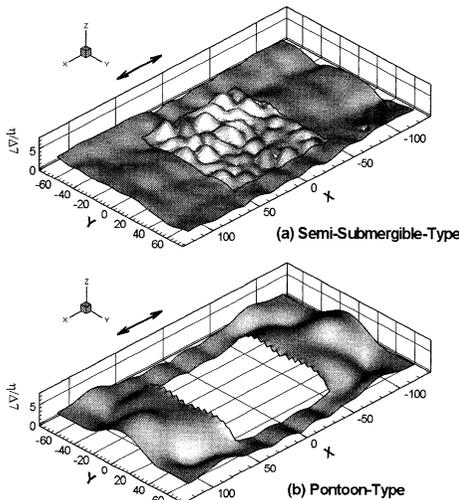


図-7 x方向加振時に発生する水面波の状況(3Dモデル)

行波も2D解析に比べて小さいことがわかる。一方ポンツーン浮体では、3D解析において岸壁と浮体との間隙が考慮されているために、浮体動揺によって水路方向に発生する波が断面2D解析に比べ小さくなっていると考えられる。

一方、y方向の入力振動を想定したケースでは、主共振周期およびピーク値について、浮体形式および解析モデルに関わらずほぼ同じ値となった(図-8)。しかし、セミサブ型浮体に対し神戸NS波を入力とする時刻暦解析を行なったところ、図-9に示すように断面2D解析では最大応答加速度が39.2Galと3D解析に比べ約10Gal大き

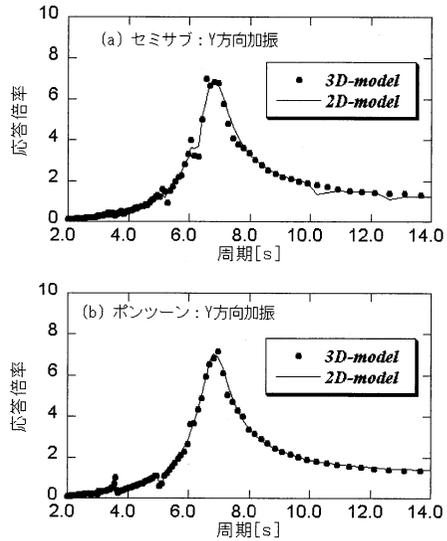


図-8 y方向加振時(BB断面)の加速度応答倍率

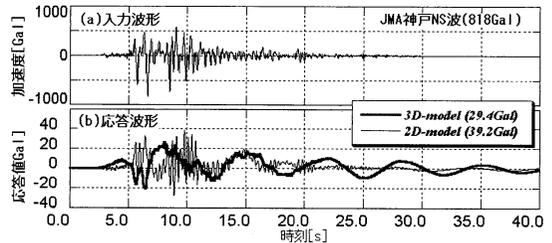


図-9 神戸NS波に対する加速度応答波形(y方向入力時)

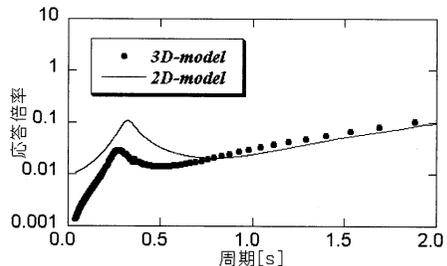


図-10 y方向加振時の加速度応答倍率(高周波数帯域)

く、およそ4Hz程度の振動成分が卓越するなど特異な傾向が見られた。図-10に示す高周波数帯域でのy方向加速度応答倍率を見ると、 $T=0.7s$ 以下の周期帯において2D解析での値が大きくなっていることがわかる。図は省くが、水平方向の波強制力の振幅についても2D解析で得られた値の方が大きいことから、岸壁の動水圧の影響が強く反映されているものと考えることができる。また $T=0.25\sim 0.3s$ 付近に見られる極値は、回転運動との連性による固有周期であり、図-8の時刻暦応答において卓越している4Hzの振動成分に対応していることがわかる。

4. 上下・回転運動に伴う軸力変動の評価

(1) 鉛直振動に対する応答特性

鉛直方向地震動として神戸UD波（最大332Gal）を入力とした応答解析を行なった。なお、ここでは水平振動の入力は考慮せず、断面2D解析についてはAA'、BB'両断面に対して行なった。図-11に変位応答の時刻暦を示すが、3D解析で得られる最大応答変位は2.6mmと2D解析の約3倍近い値となっていること、周期1.4秒（0.71Hz）の振動成分が卓越していることなどがわかる。図-12に鉛直動揺に関する付加質量係数 M_{33} を示す。低周波数帯域では各ケースとも複雑に変動しているが、3D解析のみ0.7Hz付近において符号が変化しており、このために変位応答倍率が大きくなっているものと考えられる。なお、ポンツーン浮体を対象とした解析では、セミサブ浮体のように3D、2D両解析モデルにおいて、最大応答値に関しては顕著な差異は見られない（図-13）。図-14に付加質量係数の周波数特性を示すが、セミサブ型浮体の

解析ケースとは異なり、付加質量が大きく変動していないことがわかる。また、セミサブ、ポンツーン共に3D解析ではおよそ0.5Hzから付加質量が増加しているのに対し、断面2D解析ではより低い周波数から増加しほぼ一定値に収束していることから、上下動の際の浮体底部の平面的な流体運動がこうした流体力の変動特性に深く関係しているものと考えることができる。

(2) 積層ゴムに作用する軸力の評価

積層ゴムについては、引張軸力の作用により降伏しやすいことが知られており、特にバーチャルフロート免震構造では静止時の初期軸力が低いため、陸上の免震構造物に比べ引張力に対する脆弱性が問題になると考えられる。特に断面2Dモデルでは平面的な流体運動が再現できないため、浮体構造物の形状や周辺地形次第では3Dモデルと全く異なる値となる場合が考えられる。

積層ゴムの軸力は、鉛直剛性 k と上下および x, y 軸周りに関する回転方向の変位 $\delta_3, \delta_4, \delta_5$ 、積層ゴムの設置位置 (X, Y, Z) によって求められる。具体的には圧縮を正とし、

$$F_z = F_{z0} - k(\delta_3 + Y\delta_4 - X\delta_5) \quad (1)$$

F_{z0} は初期圧縮力であり、静止時に各積層ゴムに作用している軸力である。本検討では約25,000kNである。

上下方向にのみ神戸UD波が作用しているセミサブ型浮体について、 $X=Y=35m$ の位置にある積層ゴムに作用する軸力変動波形を図-15に示す。断面2Dモデルによる解析では軸力の値が負にならず引張力が発生していないが、3D解析では時刻5~10sの間に2度引張力が発生していることがわかる。すなわち、本検討の例では断面2D解析では引張方向の軸力を過少に評価することになる。

さらに上下動に加え x, y 各方向にそれぞれ神戸EW波、

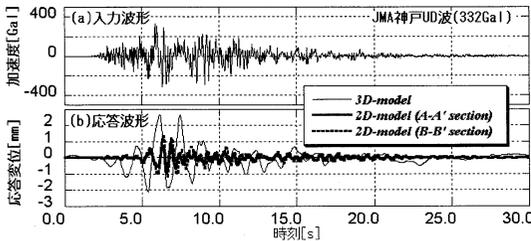


図-11 神戸UD波に対する変位応答波形(セミサブ)

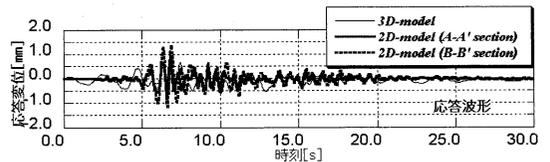


図-13 神戸UD波に対する変位応答波形(ポンツーン)

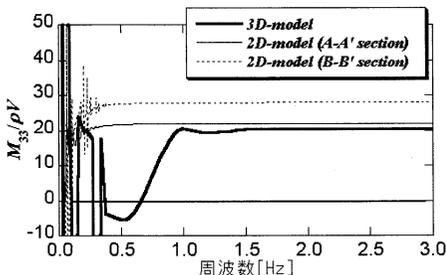


図-12 付加質量係数 M_{33} の周波数特性(セミサブ)

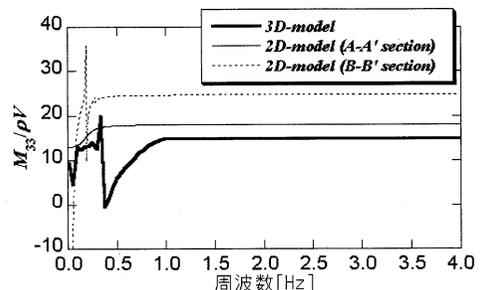


図-14 付加質量係数 M_{33} の周波数特性(ポンツーン)

神戸NS波を同時に入力した，三軸加振での軸力変動波形を図-16に示す．上下動に回転運動が加わることで，軸力の変動量がより大きなものとなることからわかる．このため，別途ダンパーを付加する，あるいはある程度の浮き上がりが許容できる免震装置を用いるなどの対策が必要となる．また，主に地震による岸壁の水平変位によってもたらされる波圧が回転運動を励起する原因であるとも考えられるため，パーシャルフロート免震構造物を護岸付近に設置する場合には造波減衰が大きくなるよう消波工などの対策も有効であると考えられる．

5. まとめ

拡張緩勾配方程式をベースとした三次元解析モデルを用い，既存内水面に設置されたセミサブ型浮体式免震構造物を対象とした地震応答解析を行なった．断面二次元モデルを用いた解析では，岸壁と浮体の間，および浮体没水部上部の水面における波の共振の影響により複雑な応答特性を示すが，三次元モデルでは水面波の平面的な伝播の影響により顕著な定在波の発生は確認できなかった．ただし，より複雑な周辺地形や，平面的に細長い形状の構造物などではこの限りではないと考えられる．また，上下動に対する応答については，浮体下部および没水部上部の流体の平面的な挙動が再現されることで，やはり断面二次元モデルとは異なる応答特性を示す．こうした解析モデルの差異は支持構造となる免震装置に作用する軸力を精度良く見積もる上で重要である．また，特に本論で対象としたパーシャルフロート免震構造では免震装置に引張方向の軸力が発生しやすいため，ダンパーの付加や消波護岸の設置などの対策も重要な課題である．

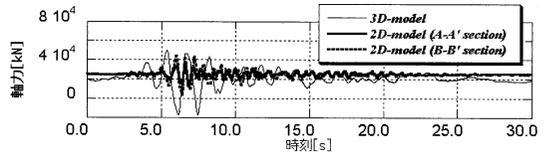


図-15 積層ゴムに作用する軸力の変動波形
(セミサブ，上下振動のみ)

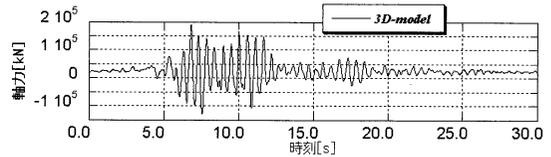


図-16 積層ゴムに作用する軸力の変動波形
(セミサブ，3軸同時加振)

参考文献

- 大山巧・土田充 (1996)：拡張緩勾配方程式による港内船舶の動揺解析，土木学会論文集，No.539/II-35，pp.141-154.
 猿田正明・大山巧・土屋宏明・長谷部雅伸・岡田敬一 (2006)：パーシャルフロート免震構造に関する研究—その8実建物における地震観測，日本建築学会学術講演梗概集(関東)，pp.592-593.
 土屋宏明・石川二巳穂・堀富博・大山巧・長谷部雅伸・猿田正明 (2005)：パーシャルフロート免震構造に関する研究—その6実建物への適用，日本建築学会学術講演梗概集(近畿)，pp.827-828.
 長谷部雅伸・大山巧 (2007)：拡張緩勾配方程式によるセミサブ型浮体式免震構造物の応答解析，海岸工学論文集第54巻，pp.886-890.