

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

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, Takumi OHYAMA

Expanded mild-slope equation models (2D and 3D) have been developed and applied to seismic response analysis of semi-submersible-type isolation structure. It was found by the 2D analysis that the wave resonance above the upper deck occurs at specific periods, which influences the horizontal response of the structure, and that the attachment of porous body on the deck is effective to reduce the maximum response. The 3D computation demonstrated the suppression of the wave resonance, which was found in the 2D computations.

1. はじめに

浮体式免震工法は、通常の陸上構造物に用いられる免震工法に比べて固有周期の長周期化が可能であり、高い免震性能が期待できる構法として注目されている。最近では、陸上建築物として、建物重量の半分程度を浮力で支え残りの重量を積層ゴムによって支持する新しい免震構造（以下、パーシャルフロート免震工法と呼ぶ）が実用化された（猿田ら, 2006）。当建物では、浮力の利用により積層ゴムが小型化されているとともに、貯水槽内に設置した消波装置により減衰性能が高められており、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。

本免震構法は陸上建築物に留まらず、例えば半閉鎖海域などの比較的静穏な水域上での免震人工地盤としての応用も可能である。ただし、陸上建築物として実用化されたポンツーン形式では、潮位変化などにより免震装置などの支持構造に作用する軸力が大きく変動しうることから、既存内水面への適用にあたっては水線面積の小さなセミサブ型浮体が望ましいケースも多いと考えられる。

そこで本研究では、セミサブ型浮体式免震構造物を対象として、拡張緩勾配方程式（大山ら, 1996）をベースとする地震応答解析モデルの開発を行い、ポンツーン型浮体との振動応答特性の差異や周辺地形の影響について検討するとともに、流体抵抗を活用した減衰機構の効果についても検討する。なお、本論では主に断面 2 次元モデルによる計算結果を参照するが、最後に 3 次元モデルにより波の回折の影響についても考察を加える。

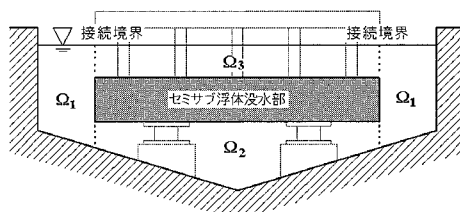


図-1 流体領域のモデル化

2. 数値モデルの概略

(1) 没水体上部の流体領域 Ω_3 に関する緩勾配方程式本研究で用いる地震応答解析モデルは、ポンツーン浮体を対象とした拡張緩勾配方程式モデル（大山ら, 1996）をセミサブ浮体用に応用・開発したものである。本モデルは周辺地形の影響を考慮できる点だけではなく、グリーン関数法に比べて計算時間が非常に短いという実用性の高さも併せ持つ。本研究ではセミサブ浮体への適用に際し、図-1 のように新たに没水体上部の流体領域 (Ω_3) を設け定式化を行った。なお Ω_1 , Ω_2 はそれぞれ浮体の存在しない流体領域、没水体底部の流体領域である。各領域 ($I=1, 2, 3$) の速度ポテンシャルは、浮体および地盤震動に伴う発生波ポテンシャルの和として以下のように周波数領域で表される。

$$\hat{\Phi}^{(I)}(x, y, z, t) = -i\sigma \sum_{j=1}^9 \Phi^{(I,j)}(x, y, z) \Delta_j e^{-i\sigma t} \quad (1)$$

ここで、 σ : 角振動数、 Δ_j : J 方向運動の複素振幅であり、3 次元モデルでは $J=1 \sim 6$ がそれぞれ浮体の surge, sway, heave, roll, pitch, yaw 運動を、 $J=7 \sim 9$ は地盤の x, y, z 方向の並進運動を表すものとする。

各領域のポテンシャル $\Phi^{(I,j)}$ は、一般解 $\Psi^{(I,j)}$ と領域の上下面での境界条件を満足する特解 $A^{(I,j)}$ の和として

表-1 Ω_3 の特解特解 $\Lambda^{(3,J)}$ 中の係数

J	$a_0^{(3,J)}$	$a^{(3,J)}$
1	$\frac{1}{A^{(3)}} \frac{\partial h_3}{\partial x}$	$\frac{\partial h_3}{\partial x}$
2	$\frac{1}{A^{(3)}} \frac{\partial h_3}{\partial y}$	$\frac{\partial h_3}{\partial y}$
3	$\frac{1}{A^{(3)}}$	1
4	$\frac{1}{A^{(3)}} \left(Y + \frac{\partial h_3}{\partial y} \left(2h_3 + Z_0 - \frac{1}{A^{(3)}} \right) \right)$	$Y + \frac{\partial h_3}{\partial y} \left(2h_3 + Z_0 - \frac{1}{A^{(3)}} \right)$
5	$-\frac{1}{A^{(3)}} \left(X + \frac{\partial h_3}{\partial x} \left(2h_3 + Z_0 - \frac{1}{A^{(3)}} \right) \right)$	$-X - \frac{\partial h_3}{\partial x} \left(2h_3 + Z_0 - \frac{1}{A^{(3)}} \right)$
6	$\frac{1}{A^{(3)}} \left(X \frac{\partial h_3}{\partial y} - Y \frac{\partial h_3}{\partial x} \right)$	$X \frac{\partial h_3}{\partial y} - Y \frac{\partial h_3}{\partial x}$

以下のように表現できる。

$$\Phi^{(I,J)} = \Psi^{(I,J)} + \Lambda^{(I,J)}, \quad (I=1,2,3); J=1-9 \quad (2)$$

海底面および浮体上面、底面の空間的な変化が緩やかであると仮定することにより、一般解 $\Psi^{(I,J)}$ に関する緩勾配方程式が導かれる。また、 Ω_1 と Ω_2 における特解は大山ら（1996）によりすでに示されているが、 Ω_3 での特解 $\Lambda^{(3,J)}$ については、浮体上面での運動を考慮して新たに導いた。結果を式（3）および表-1に示す。ただし、 μ は流体の動粘性係数である。

$$\Lambda^{(3,J)} = \begin{cases} \bar{a}_0^{(3,J)} + \bar{a}_1^{(3,J)} z & (J=1-6) \\ 0 & (J=7-9) \end{cases} \quad (3)$$

$$A^{(3)} = \frac{\sigma^2}{g} \left(1 + i \frac{\mu}{\sigma} \right) \quad (4)$$

各領域での接続面では、圧力および流速に関する連続条件を満たすように境界条件を設定する。また、計算で対象とする領域は地震動の地盤速度が与えられる岸壁境界と、水面波が透過する開放型境界によって周囲を囲まれているものとする。開放型境界では外部から波浪は到来せず、領域内部で発生した波の透過だけを考慮した。

（2）数値モデルの検証

数値モデルの検証のため、ポンツーン形式ではあるがパーシャルフロート免震工法を採用している実建物（清水建設技術研究所風洞実験棟；重量 2,900 t，浮力支持率 50 %；土屋ら，2006）で観測された地震波形（猿田ら，2006）と解析結果の比較を図-2に示す。観測では最大入力加速度 30 Gal に対し、建物の最大応答が 18 Gal と約 40 % 程度の加速度低減効果が確認されたが、解析においても 21 Gal と同等の最大応答値となった。また、全体的な波形の一致度も非常に良好であることが

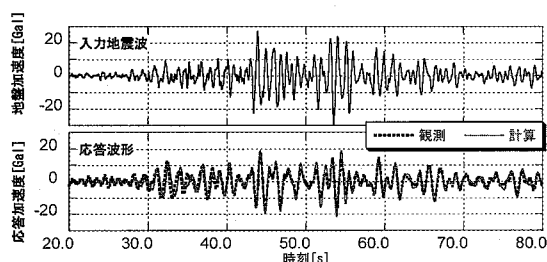


図-2 宮城県沖地震の再現計算

わかる。一方、初期微動時における波形にはやや相違が見られるが、これは当該建物の免震装置として非線形な水平合成特性を有する高減衰積層ゴム（減衰定数 22 %）を用いているのに対し、解析では等価線形化された水平剛性値を用いているためである。またここには示さないが、セミサブ浮体を対象としたケースについてはグリーン関数法モデルとの比較検証を行っており、良好な一致を確認している。

3. セミサブ型浮体の地震応答特性

（1）検討条件

パーシャルフロート免震工法を採用したセミサブ型浮体の基本的な地震応答特性を把握するため、図-3に示すような水路に設けられた 100 m 四方の人工地盤を解析対象として設定した。構造物の諸元など計算条件を表-2にまとめる。なお、上部構造を支持するコラムの流体力については、本来モリソン式などによる評価を行うのが一般的であるが、没水体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く、抗

表-2 計算条件

項 目	数 値
浮体総重量	981,000 [kN]
浮力	686,700 [kN]
没水部上面深度	2.0 [m]
没水部底面深度	9.0 [m]
免震装置の総水平剛性値	100,000 [kN/m]
免震装置の減衰定数	8 %, 15 %, 22 %

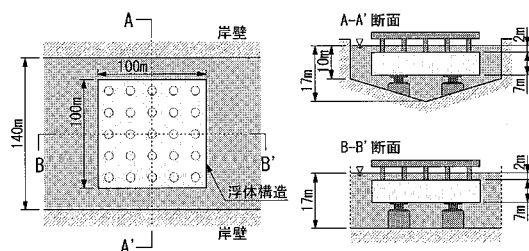


図-3 計算領域の設定

力、慣性力ともに動揺特性にはほとんど影響を及ぼさないオーダーであることを確認している。従ってここでは簡単のため、コラムに作用する流体力は考慮しないものとした。

(2) 岸壁の影響について

まず断面2次元モデルを用いて、図-3中のA-A'、B-B'両鉛直断面を対象とする解析を行った。水路と直行するA-A'断面は両端が岸壁(反射率0.9)で地盤速度が与えられるのに対し、B-B'断面は水面波が透過する境界条件を課すことになる。これら各ケースに対し、免震装置の減衰定数 h を8%、15%、22%と変化させた各断面の周波数応答特性を図-4に示す。一方、図-5は表-2と同じ条件で、喫水を7mとしたポンツーン浮体の応答特性を示したものである。当該構造物は水が無いことを想定した場合の固有周期が6.3sであるのに対し、A-A'断面では6.5sと付加質量の影響によりわずかながら長周期化していることがわかる。一方B-B'断面ではA-A'断面に比べ主共振ピーク値が低くなっており、浮体動揺に伴う水面波の遠方への逸散による造波減衰の効果がみられるものの、固有周期は6.0sと若干短周期化している。また図-4(a)のA-A'断面の応答特性を見ると、加振周期6.3sにおいて、免震装置の減衰定数によらず応答値が低下していることがわかる。図-5(a)に示す重量、浮体幅、浮力支持率の等しいポンツーン型浮体(喫水7m)の応答解析結果ではこのような応答値の低下は見られず、セミサブ浮体の特性の一つであることがわかる。図-6(a)、(b)にそれぞれ付加質量係

数、波強制力(実部)の周波数特性を示すが、セミサブ型浮体ではポンツーン型浮体に比べ、急激な特性変化を示す周期が多くなっていることがわかる。例えば図-4で応答値の低下が見られた $T=6.3$ sでは、付加質量、波強制力ともに負の極値から正の極値へと大きな変化を示している。図-7はA-A'断面での水面波形を半周期分描いたものである。この図からわかるように、流体力特性の変動とともにA-A'断面の水域全体にわたって水面波の共振も発生している。このように流体力係数が極値を示す周期では、水面波の共振現象が発生しているものと推察できる。例えば、 $T=5.2$ sではセミサブ型、ポンツーン型共に付加質量、波強制力の符号が変化しているが、これは岸壁と浮体間での波の共振が発生しているためである(図-7(b))。ポンツーン型浮体では岸壁と浮体の間の水面との共振モードが流体力特性の変動に影響を及ぼすが、セミサブ型浮体ではさらに没水体上面の水面を含む共振モードが存在し、相対的に複雑な流体力特性となる。

(3) セミサブ浮体の造波減衰特性

図-4(b)に示したセミサブ型浮体のB-B'断面に関する応答特性を見ると、同断面のポンツーン型浮体(図-5(b))のケースに比べピークが鋭くなっている。図-8には両浮体形式での付加質量係数および造波減衰係数の周波数特性を示すが、ポンツーン型浮体のケースに比べ、セミサブ型浮体では全周波数帯域にわたって造波減衰係数が小さいことに加え、付加質量係数、造波減衰係数ともに波打つように変動していることがわかる。ここで、

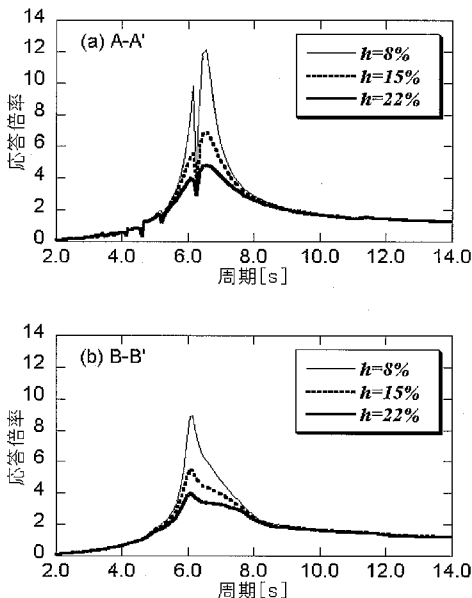


図-4 各断面における応答特性(セミサブ)

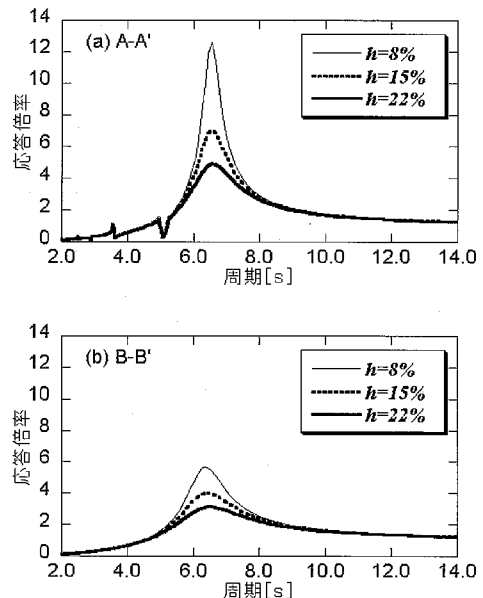


図-5 各断面における応答特性(ポンツーン)

造波減衰係数がほぼ0となるような加振周期（例えば7.8s）に着目したところ、図-9(a)のように没水体上部で水面波の共振現象が発生し、浮体の存在しない部分ではほとんど水面が静止していることが判明した。すなわち、造波減衰係数が0となるような加振周期では、浮体動揺に伴う水面波が遠方に伝達されずに浮体上面にトラップされ、流体による振動エネルギーの散逸が生じなくなっているものと解釈できる。一方、造波減衰係数が極大となる加振周期6.7sでは、浮体の両端から進行波が発生していることが確認できる。

(4) 流体抵抗を利用した付加減衰機構

次に図-10のように没水体上面に敢えて乱流抵抗を発生させるような透水部材（空隙率 $\lambda=0.95$ 、厚さ $D=1$

m、繊維径 $d=2$ mm）の設置を想定した検討を行った。透水部材に作用する流体力はモリソン式を応用して評価した。具体的には、透水体を構成する繊維を1本の細長い円柱とみなす考え方に基づく。この仮想的な円柱長さ l^* は透水体の体積 V 、空隙率 λ と繊維径 d によって表すことができる。

$$\frac{\pi}{4} d^2 l^* = (1 - \lambda) V \dots\dots\dots (5)$$

例えば透水体に作用する抗力 F_D については、式(5)から求められる l^* をモリソン式に代入することで、式(6)のように簡易的に評価した。

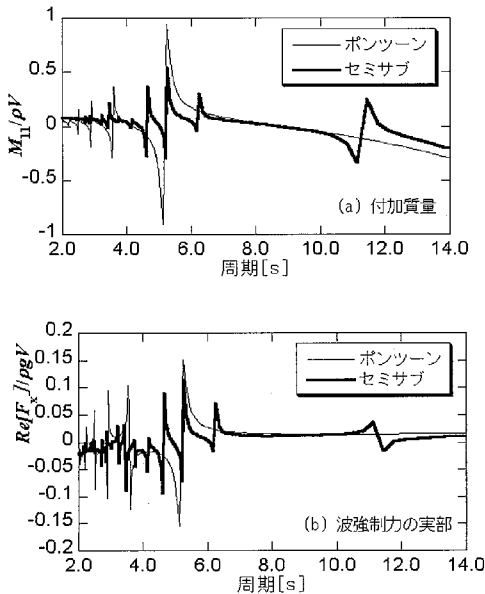


図-6 A-A'断面のケースにおける流体力特性 (Surge)

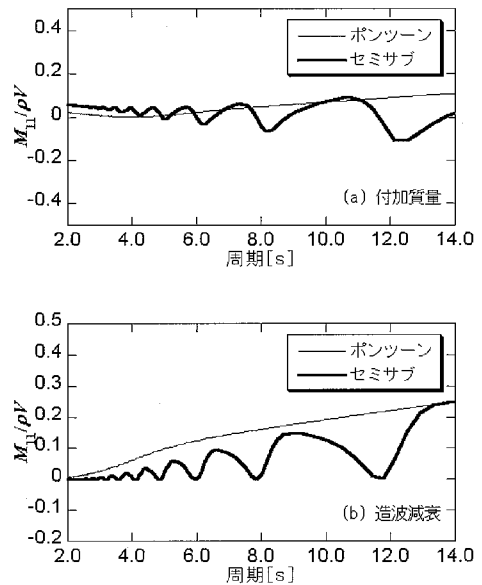


図-8 B-B'断面のケースにおける流体力特性 (Surge)

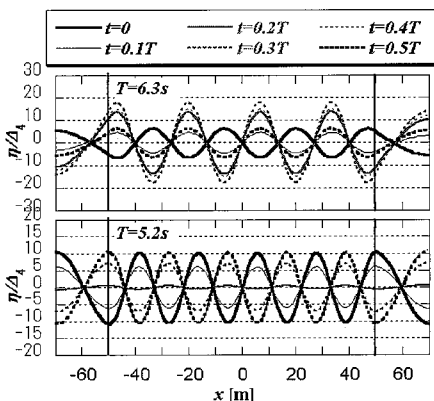


図-7 A-A'断面での水面波形

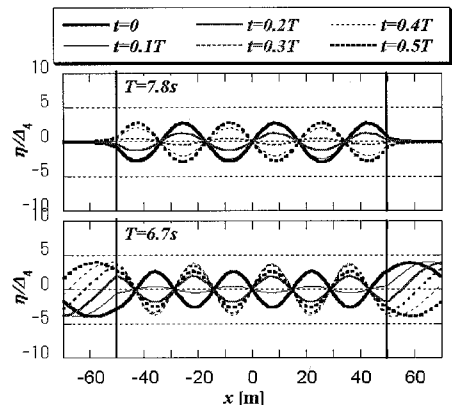


図-9 B-B'断面での水面波形

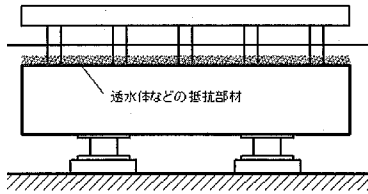


図-10 透水体の設置例

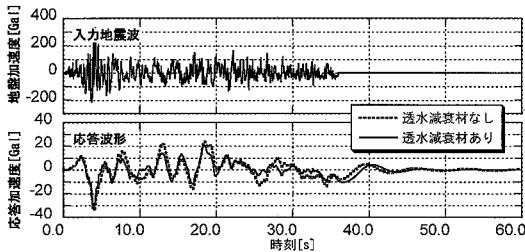


図-11 八戸波に対する応答比較

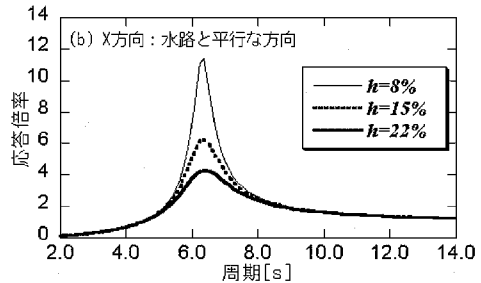
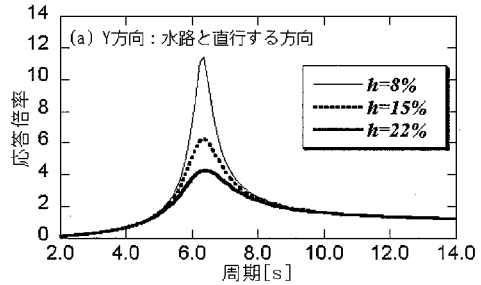


図-12 3次元モデルで得られた応答特性

$$F_D \approx \frac{1}{2} \rho C_D d |U| U^* = \frac{2}{\pi} \rho C_D \frac{(1-\lambda)V}{d} |U| U \quad (6)$$

ここで、 ρ ：流体密度、 C_D ：抗力係数（本検討では1.0とした）、 U ：浮体運動と流体運動の相対速度である。

図-11に八戸波（最大330 Gal）を入力地震波とする、B-B'断面を対象とした解析結果を示す。全体的な加速度の低下に加え、地震波の収束後における浮体動揺も速やかに収まるなど、良好な減衰効果が見られる。

4. 3次元モデルによる検討

最後に3次元モデルを用いた解析についての検討を加える。図-12は、 x 、 y 各方向に対する加振時の加振方向の応答特性を示したものであるが、断面2Dモデルでの計算結果に見られたような差異は見られなかった。これは、浮体構造物の動揺に伴う発生波が平面的に広がるためであり、断面2次元モデルでは完全な閉鎖海域となる y 方向加振のケースでも、直行する x 方向へも波が伝達し、開放境界を透過することになるためである。この結果、断面2次元モデルで見られたような顕著な水面波の共振はほとんど発生せず、流体力の変動特性への影響も弱くなっているものと推測できる。

5. まとめ

拡張緩勾配方程式モデルをベースにセミサブ型浮体の地震応答解析が可能な数値モデルの開発を行い、断面2

次元解析モデルによる検討を行った。岸壁に囲まれた閉鎖的な海域では、セミサブ型浮体はボンツーン浮体に比べ複雑な流体力特性を示すが、これは岸壁と浮体の間、および浮体没水部上部の水面における波の共振の影響であることがわかった。没水体上部の水面波の共振は開放型の領域においても発生し、造波減衰係数が低下する要因にもなる。一方、付加減衰機構として流体抵抗体を設置した場合、実際の地震波に対し効果的な減衰効果が発揮できることを示した。また、3次元モデルによる解析では、断面2次元モデルの計算で流体力特性に強い影響を与えていた水面波の共振は発生せず、本論の解析例では加振方向による差異がほとんど見られなかった。今後、より複雑な周辺地形を考慮した検討を加える予定である。

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.