

浮力利用構造物の耐震解析手法に関する 基礎的検討

塩崎禎郎¹•田中祐人²•規矩大義³

¹JFE技研(株) (〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町1-1) E-mail: y-shiozaki@jfe-rd.co.jp ²JFEエンジニアリング(株) (〒230-8861 横浜市鶴見区末広町2-1) E-mail:tanaka-sachito@jfe-eng.co.jp ³関東学院大学(〒236-8501 横浜市金沢区六浦東1-50-1) E-mail: kiku@kanto-gakuin.ac.jp

浮体橋梁や浮体式防災基地等の浮力利用構造物の耐震設計で用いる数値解析手法について,基礎的な検 討を行った.浮力利用構造物の地震時挙動を把握するために簡単な例題として,矩形浮体の模型振動実験 を実施し,1)厳密解法として流体要素を用いたFEM解析,2)簡易解析手法として質点系解析による検討を 試みた.その結果,1)流体要素を用いたFEM解析は良好に実験結果を再現できること,2)質点系解析では, 流体による力を付加質量・造波減衰係数として適切に表現することで,実験結果を再現できることがわか った.

Key Words : Floating Body, Seismic design, Numerical method, FEM, spring-mass system

1. はじめに

浮体橋梁, 浮体式海上防災基地, 水面空間利用 型発電所¹⁾等の浮力利用構造物(図-1参照)は、大 水深領域や軟弱地盤といった厳しい条件に対応で きるほか、地震の影響が少ないメリットを有して おり、既に実用化されている²⁾、地震の影響に関す る設計は、「浮体橋の設計指針」²⁾によると、係留 機構(支承機構)を含めた動的解析による照査が 求められている.特に、レベル2地震に対しては、 時刻歴応答解析による検討が規定されている. そ こで,筆者らは,簡単な矩形浮体を対象として時 刻歴応答解析手法の適用性の検討を行った.本検 討のフローを図-2に示す.最初に,解析のターゲ ットとなる簡単な模型振動実験を実施して, 厳密 解法である流体要素を用いたFEM解析の適用性を 確認した.次に、係留機構のパラメトリックスタ ディ等の実務で有用となる簡易解析手法として, 質点系解析への置き換え方法について検討をした. ここでは, 流体力の影響を付加質量と造波減衰係 数で適切に表現することを念頭において検討を進 めた. なお、本検討では、問題の複雑化を避ける ため水平方向の挙動のみに着目している.



図-2 検討フロー



2. 浮体模型に対する模型振動実験

(1) 実験概要

模型実験の断面図を図-3に示す.幅1.8m×奥行 き0.6m×深さ0.6mの水槽が振動台に取り付けられ ており、その中に矩形浮体模型を設置した.浮体 のサイズは幅0.7m×奥行き0.58m×高さ0.3mである. 浮体の上部には床版を模擬した鋼板が取り付けら れており、両端で係留(固定)している.係留は、 防舷材を模擬するためバネを用いた(バネ定数は 合計で0.827N/mm).また、水平方向のみ挙動とす るためリニアガイドを用いている.浮体質量は 68.2kgで約95%の浮力が働くように設計してある.

実験計測項目は、加速度、変位、および浮体に 作用する水圧と反力(慣性力と流体力の合力)で ある.反力は、浮体と固定ジグの間に設置した2分 力計で計測した.

入力地震動は、大正型関東地震を対象としたシ ナリオ地震として作成した東京港のL2地震動の時 間軸を1/5に調整した波形を用いた.地震動作成手 法は、野津らによる統計的グリーン関数法を用い た³⁾.時刻歴波形とフーリエスペクトルを図-4に示 す.



表-1 解析条件

【線形ポテンシャル要素】	【N−S流体要素】
レーレー減衰:0.5% (1次、2次の振動モードに対して) ただし、ADINAでは流体要素にレーレー 減衰が作用しないため、実際にはパ ネ要素部分だけに作用することになる。 Δt:0.002秒	ALE法(移動境界) 流体の粘性考慮 (粘性係数1.0 ⁻³ Pa·s) 減衰は特に設定していない ムt:0.002秒



図-6 流体要素を用いた解析のメッシュ図

(2) 実験結果

実験計測した時刻歴波形の一例を図-5に示す. 係留機構ありの場合と、浮体を完全に固定したケースについて重ねて示している.係留機構ありの 場合では、完全固定と比べて浮体が水平方向に変 位できるため、浮体の加速度、反力が小さくなっ ている.すなわち、浮体構造の免震効果の特性が 発揮されていることがわかる.

3. 流体要素を用いたFEM解析

係留機構がある場合の模型実験に対して流体要素を用いたFEM解析でシミュレートを試みた.解析は汎用解析コードADINA(およびADINA-F)を用いた.流体要素としては,線形ポテンシャル要素とN-S流体要素を用い,両者の適用性を検討した. 解析条件を表-1に,解析メッシュを図-6に示す.浮体は水平方向のみ自由度を持つように設定した.



図-7に解析結果として、反力と浮体の相対変位 の時刻歴を示す.線形ポテンシャル要素,N-S流体 要素の両者とも良好に実験結果を再現できている ことがわかる.ただし、浮体の応答が大きくなる 15秒以降では、ポテンシャル要素はN-S流体要素よ りも僅かではあるが大きな値となっている.これ は、流体要素に減衰が作用していないことが影響 しているものと考えられる.なお、実験では、リ ニアガイド部に滑り抵抗が発生してしまうため、 滑り抵抗力を実験結果から分離して、解析では反 対側に外力として作用させている.具体的には、 慣性力と流体力(圧力計の値を積分)の合力から、 バネ反力(相対変位×バネ定数)を引いて、滑り 抵抗力を算定した.

4. 質点系解析への置き換え検討

(1) モデル化方針

質点系解析のモデルは図-8 に示すとおりである. 浮体と流体との相互作用は,付加質量と造波減衰 係数を用いて表現している.なお,付加質量と造 波減衰係数は以下に示すように係留機構のバネ定 数を考慮した方法で算定した.

浮体の水平方向(左右揺)の運動方程式は(1)式 となる.ここで,振動台の絶対変位を y,浮体と振 動台の相対変位を x とした.

$$(M + m)(\ddot{x} + \ddot{y}) + N\dot{x} + kx = 0$$
 (1)

ここに, *M*: 浮体質量, *m*: 付加質量, *N*: 造波減 衰係数, *k*: バネ定数.

ここで(1)式を,(2)式で示す周波数表示で置き換え て,実部と虚部に分けてそれぞれの項をゼロとする と,付加質量は(3)式,造波減衰係数は(4)式で求め ることができる.

$$x = \overline{x} \cdot e^{i\omega t} \qquad y = \overline{y} \cdot e^{i\omega t} \cdot e^{i\alpha} \quad (2)$$

ここに, $x \ge y$ の位相差を α とする.



図-8 質点系解析のモデル化





図-9 付加質量・造波減衰係数の算定例

$$m = \frac{k\overline{x}}{\omega^{2}(\overline{x} + \overline{y}\cos\alpha)} - M \quad (3)$$
$$N = \frac{\omega\overline{y}\sin\alpha(M+m)}{\overline{x}} \quad (4)$$

具体的算定例として,線形ポテンシャル要素を 用いたFEM解析で、3種類のバネを用いた場合の付 加質量、造波減衰係数を求めた.算定結果を図-9 に示す.ここでは、付加質量は $\rho \bigtriangledown (\rho: \pi \sigma)$ 重、 $\nabla: 排水量) で、造波減衰係数は<math>\omega \rho \bigtriangledown$ ($\omega:$ 角周波数)で無次元化して整理した.また、 比較対象として、浮体が固定されている場合の運 動方程式(5)から算定される付加質量と造波減衰係 数((6)式で算定)を合わせて示している.

$$(M + m)\ddot{x} + N\dot{x} = F \quad (5)$$







$$m = \frac{F_c}{\omega^2 \overline{x}} - M \qquad N = \frac{F_s}{\omega \overline{x}} \quad (6)$$

ここに, F::反力, Fs:Fの加速度比例項, Fc: Fの速度比例項.

これらの結果から、バネ値の違いや、固定条件 の違いによって付加質量、造波減衰係数が大きく 変化することがわかる。特に付加質量に関しては、 固定の場合には正の値であるのに対して、係留機 構のバネを考慮したケースでは負の値となってい る。付加質量の負の値は、浮体が進む方向を同じ 方向に流体力が作用することを意味している。

(2)係留機構が線形の場合

実験対象とした係留機構は線形挙動する.図-6 で示した流体要素を用いたFEM解析モデルを図-8 に示した質点系解析モデルに置き換えた計算を実施した.付加質量と造波減衰係数は、バネを考慮 した浮体の固有振動数(固有値解析を実施して刺 激係数が最も大きな値とした)f=0.97Hzに対応する 値を用いることにした.図-9から読みとると,付 加質量はm/ρマ=-0.765,造波減衰係数はN/ωρマ =0.021である.質点系解析で計算した反力と相対変 位の時刻歴波形を図-10に示す.図中には線形ポテ ンシャル要素とNS流体要素を用いたFEM解析結果 と併せて示している.質点系解析はNS流体要素の 解析と良好に一致している.したがって,流体要 素を用いた解析を質点系解析による置き換えが



図-14 質点系解析への置き換え検討 (係留機構:非線形)

可能であることがわかる.

さらに、質点系解析において、付加質量と造波 減衰係数の違いが解析結果に与える影響について 比較検討を行った.図-10で示した付加質量・造波 減衰係数を用いた解析をModel-1,Model-2は浮体 を固定として求めた付加質量(m/ $\rho \bigtriangledown$ =0.947),造 波減衰係数(N/ $\omega \rho \bigtriangledown$ =-0.013)を用いた解析, Model-3は浮体下端を海底面と仮定して求めた Westergaardの動水圧による付加質量(m/ $\rho \bigtriangledown$ =0.233,造波減衰は無視)を用いた解析とした.

解析結果を図-11に示す.これらの結果から,付 加質量・造波減衰係数の設定によって,解析結果 は大きく異なることがわかる.したがって,質点 系解析を行う際には,付加質量・造波減衰係数の 与え方が重要であることがわかる.

(3) 係留機構が非線形の場合

ここでは、係留機構が非線形挙動する場合のモ デル化について検討する.非線形モデルとしては、 すべり支承とバイリニア型の係留装置(防舷材) の組み合わせを取り上げた.履歴モデルを図-12に 示す.線形ポテンシャル要素を用いたFEM解析を 実施して、変位~荷重の履歴曲線を求めた(図-13 参照).

このモデルに対する付加質量・造波減衰係数を 求めるため図-13から原点と履歴曲線の頂点を結ぶ 等価線形バネ(2.12kN/m)と等価粘性減衰(he=1/2 $\pi * \Delta W/W=0.159$)を求めた.線形ポテンシャル要 素を用いたFEM解析のモデルに,線形バネ(等価 線形バネの値)とダンパー(等価粘性減衰の値) を組み込んで,浮体の固有周波数f=0.98Hzに対する 正弦波の解析を実施して付加質量・造波減衰係数 を求めた.付加質量はm/ ρ ∇ =-0.621で,造波減衰 係数はN/ $\omega \rho \nabla$ =0.221であった.

これらの値を用いて,質点系解析を行った.係 留機構の履歴モデルとして,非線形バネをつける ことも考えられるが,より簡略化を目指して,線 形バネ(等価線形バネ)とダンパー(等価粘性減 衰)を組み込んだモデルとした.

解析結果の時刻歴を,線形ポテンシャル要素を 用いたFEM解析結果と併せて図-14に示す.これら の波形から,係留機構が非線形であってもFEM解 析を質点系解析に置き換えが可能であることが確 認できた.

なお、上記で検討した質点系解析は、係留装置 の最適化検討などの実務における効率化に有効で あるが、あらかじめ、想定されるバネ定数と減衰 に対して、付加質量と造波減衰係数を求めておく 必要がある.

5. 結論

浮力利用構造物の耐震設計で用いる数値解析手 法について基礎的な検討を行った. 簡単な例題と して矩形浮体をとりあげ,模型振動実験,数値解 析によるシミュレーション試みた. 今回の検討で 得られた結論を以下にまとめて示す.

- 1) 線形ポテンシャル要素およびN-S流体要素を 用いた解析は実験結果を良好に再現できる.
- 2) 流体要素を用いたFEM解析を、質点系解析に 置き換える方法としては、流体による力を 付加質量と造波減衰係数として適切に表現 することで可能なことがわかった.
- 3) 係留機構が非線形挙動する場合も、等価線 形バネと等価粘性係数を考慮した付加質量、 造波減衰係数を用いることで、FEM解析を質 点系解析に置き換えることができる。

参考文献

- 興野俊也,貝沼憲男,大熊義夫,王均,都築富雄, 宮本幸始:水面空間を利用した海上発電所の地震 時挙動について,海洋開発論文集,Vol.14, pp.65-70,1998.
- 2) 土木学会: 浮体橋の設計指針, 2005.
- 野津 厚,菅野高弘:経験的サイト増幅・位相特 性を考慮した強震動評価手法-内陸活断層地震およ び海溝型地震への適用性の検討-,港湾空港技研資 料, No.1120, 2006.

(2007.6.29受付)