

軽量セミサブ浮体の弾性応答予測に関する研究

○ 東京大学 学生会員 ファバン フック
東京大学 正会員 石原 孟

1. はじめに

浮体式洋上風力発電設備の設計においては浮体の動揺量と弾性応答を評価することが重要である。浮体の応答解析手法は、主に「二段階解析法」¹⁾と「弾性応答解析法」²⁾に分けられる。前者は、部材の変形が応答に与える影響が微小であると考えられる場合に用いられる。この手法では、まず構造全体を剛体と仮定し、動揺解析を行い、その結果を用いて、構造の各部材に作用する力を算出する。次に得られた力を節点外力として浮体に作用させ準静的な弾性解析を行うことにより、部材の応力を求める。この手法は、船舶工学の分野で開発された動揺解析プログラムと汎用の構造解析プログラムを用いることができるという利点があるが、部材の変形が大きくなると誤差が生じる恐れがある。一方、後者は最初から構造を弾性体としてモデル化し、多質点応答解析を行うことにより浮体の動揺量と部材の応力を同時に求める。本研究の対象となる軽量セミサブ型浮体に変形しやすいため、弾性応答解析法を用いる必要があると考えられる。

本研究では、浮体全体を弾性体とし、風車と浮体との相互作用、非線形流体力及び空気力による減衰効果を考慮した多質点応答解析コードを開発する共に、弾性模型を用いた水槽実験の結果³⁾と比較することにより、数値解析モデルの予測精度の検証を行う。

2. 解析モデルの概要

一般に、波浪・風による構造物の弾性応答を求めるための運動方程式は次式のように表される。

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F\} \quad (1)$$

$$\{F\} = \{F_G\} + \{F_R\} + \{F_E\} + \{F_W\} \quad (2)$$

ここで、 $[M]$ は質量マトリックス、 $[C]$ は減衰マトリックス、 $[K]$ は要素剛性マトリックス、 $\{F\}$ は各節点での外力ベクトル、 $\{X\}$ は節点変位ベクトルである。また、 $\{F_G\}$ は係留力、 $\{F_R\}$ は水圧による復元力、 $\{F_E\}$ は流体力、 $\{F_W\}$ は空気力である。

(a) 係留力のモデル化⁴⁾ 係留バネは非線形のカテナリー曲線で表されるが、潮流力による定常外力が支配であると仮定し、カテナリー曲線から微小変位理論により線形バネを算出した。係留力は次式で表される。

$$\{F_G\} = -[K_G]\{X\} \quad (3)$$

ここで、 $[K_G]$ は線形バネ係数である。

(b) 復元力のモデル化⁴⁾ 水圧による復元力は微小

変位理論により式(4)に線形化することができる。

$$\{F_R\} = -[K_R]\{X\} \quad (4)$$

ここで、 $[K_R]$ は水圧による復元力係数である。

(c) 流体力のモデル化⁴⁾ モリソン式は、もともと海底に固定されている鉛直の杭に作用する荷重を評価するために提案された式であり、粘性影響による抗力の成分は、造波成分に比べ大きいと仮定している。移動する細長部材にも使えるように修正されたモリソン式は次式により表す。

$$F_E = 0.5\rho_w C_D D u_r |u_r| + \rho_w [(C_M - 1)\dot{u}_r + \ddot{u}] A \quad (5)$$

$$u_r = u - \dot{X} \quad (6)$$

ここで、 F_E は部材の単位長さに作用する流体力、 ρ_w は流体密度、 C_D は抗力係数、 C_M は質量係数あるいは慣性力係数、 A は部材面積、 $u, \dot{u}$ は部材に直交する方向の水粒子の速度と加速度、 $\dot{X}$ は浮体の移動速度の直角成分である。(5)式右辺の第1項は流体による抗力で、浮体部材の移動速度に依存することから、流体力による減衰効果を表せることが分かる。断面形状が円柱の場合には $C_M = 2.0$ と $C_D = 1.17$ の一定値⁴⁾として使用することが多いが、部材表面の粗度、レイノルズ数とクーリガン・カーペンター数 K_c の関数⁵⁾として定義することができる。

(d) 空気力のモデル化 空気力は準定常理論により次式のように表される。

$$\{F_W\} = \{F_D(V), F_L(V), F_M(V)\} \quad (7)$$

$$V = U - \dot{X} \quad (8)$$

ここで、 F_D は抗力、 F_L は揚力、 F_M はモーメント、 U は風速、 $\dot{X}$ は風車の移動速度、 V は相対風速である。流体力と同様に、抗力は風車の移動速度の関数であることから、空力減衰効果を表せることが分かる。

3. 数値解析手法

浮体の弾性応答を予測するために、運動方程式を時間領域で解く FEM コードを開発した。数値積分は Newmark- β 法、固有値解析は Subspace Iteration 法を採用した。参照座標系は Total Lagrange で定式化し、構造減衰に Rayleigh 減衰を適用した。また、使用要素は Saint-Venant のねじりを考慮する 6 自由度のビーム要素とする。

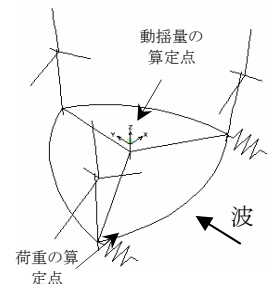


図1 解析モデル

本研究で開発されたプログラムの予測精度を検証するため、文献 3 に用いた剛体と弾性模型を対象に解析モデルを作成し、固有値解析と波高 $H = 2\text{cm}, 8\text{cm}$ の弾性応答解析を行った。図 1 には風車と浮体を含めた解析モデルを示す。ここで、流体による質量係数と抗力係数はクーリガン・カーペンター数 K_c の関数として文献 5 により定めた値を採用した。浮体に作用する 3 成分の水粒子の速度と加速度は線形波理論により求めた。

4. 解析結果

(a) 固有値解析の結果 浮体の固有周期を明らかにするために固有値解析を行った。表 1 には解析結果を示す。弾性体モデルの 1, 2, 3 次モードの固有周期は剛体浮体を用いた時の値と一致し、これらのモードは係留と復元力によるものであることが分かる。一方、固有周期が 0.74s , 0.58s , 0.37s と 0.35s である高次モードは浮体の面外変形に対応している。

(b) 弾性応答解析の結果 図 2 には弾性模型の水槽実験及び弾性体と剛体モデルの弾性応答解析から得られた浮体中央の周波数応答関数を示す。解析結果は実験値とほぼ一致する。また、弾性体モデルのサージは剛体モデルの値と一致するが、弾性体モデルのヒープ及びピッチは剛体モデルの値に比べ、浮体の弾性変形による固有周期 0.7s 付近に共振によるピークが現れていることが分かる。図 3 には水槽実験及び弾性応答解析から得られた荷重の波周期による変化を示す。ここで、 M_Y と M_Z は連結部材の根元に

おける水平と鉛直応答により発生した曲げモーメントである。サージ応答と同様にサージの固有周期 2.82s 付近に M_Y の振幅は波高の増大に伴い減少する。一方、固有周期から離れると、 M_Y と波高の関係が線形であることが分かる。また、短周期側の荷重は長周期側の値に比べ、周期が減少するとともに荷重が増加する。これは、加速度応答が波周期の二乗に反比例するため、短周期側の荷重が大きくなることによるものである。また、 M_Z は剛体モデルの値に比べ、浮体の弾性変形による固有周期 0.7s 付近に共振によるピークが現れることを確認できた。

5. まとめ

洋上風力発電のための軽量セミサブ浮体を対象に、浮体全体を弾性体として多質点応答解析を実施し、浮体の弾性変形効果を明らかにした。また、弾性模型を用いた水槽実験の結果と比較することにより数値解析モデルの予測精度を検証した。

参考文献

- 1) 片山正敏, 他: 半潜水式海洋構造物の波浪中構造応答解析, 三菱重工技報, 第 13 巻, 第 4 号, 1976.
- 2) 吉田宏一郎, 石川邦照: 三次元骨組構造の周期応答, 日本造船学会論文集, 第 143 号, 1978.
- 3) 東京大学: 浮体洋上風力発電の研究 (その 2), 第 8 章 風車・浮体の連成解析と風水洞実験による検証, 東京大学の産学連携研究の報告書, 2007.
- 4) 元良誠三, 他: 船体と海洋構造物の運動学, 成山堂書店, 1997.
- 5) Offshore Standard DNV-OS-J101: Design of offshore wind turbine structures, 2004.

表 1 剛体と弾性体モデルの固有周期の比較

モード	1	2	3	4	5	6	7
剛体/弾性体の固有周期(s)	3.06/3.06	2.82/2.82	2.68/2.69	—/0.74	—/0.58	—/0.37	—/0.35

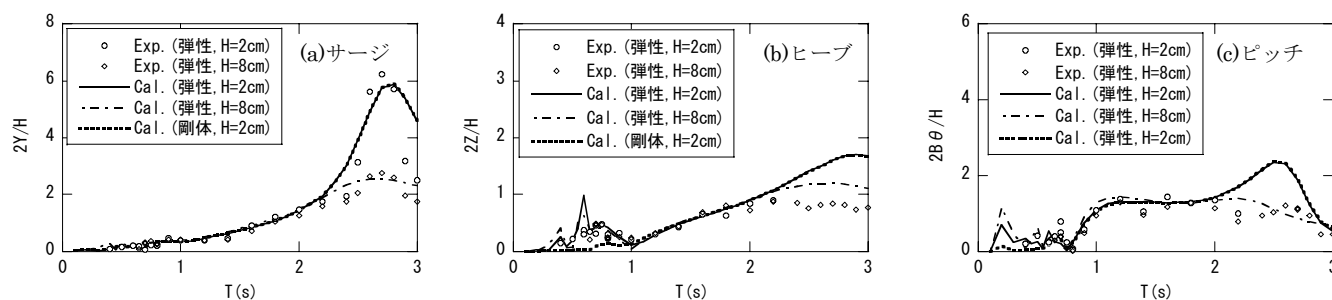


図 2 水槽実験及び弾性応答解析から得られた動揺量の周波数応答関数の比較

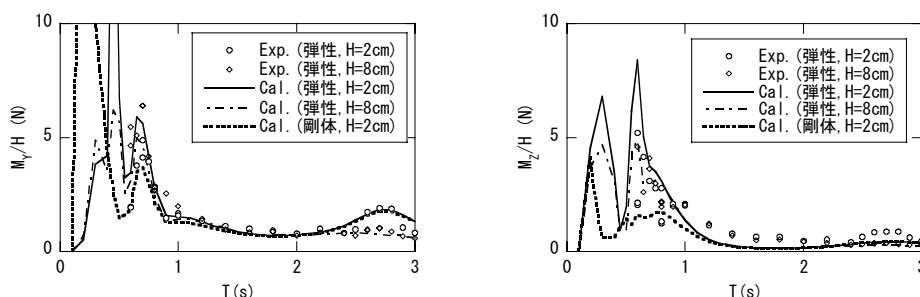


図 3 水槽実験及び弾性応答解析から得られた荷重の波周期による変化