

浮体式洋上風力発電に関する研究

その2 浮体動揺の数値予測

A Study of Floating Offshore Wind Turbine Systems

Part 2 Numerical Simulation of Dynamic Response of Floater

○ ファバンフック¹⁾ 石原 孟²⁾
Pham Van PHUC¹⁾ Takeshi ISHIHARA²⁾

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及び風車と浮体との相互作用を評価することが不可欠である。浮体動揺解析^{1),2),3)}は、主にグリーン関数法(ポテンシャル理論)を用いる方法と、モリソン式を適用する方法がある。前者では、流体の粘性効果を見逃し、浮体による波の回折影響を考慮する。また、流体の速度ポテンシャルが存在することとし、周波数領域で浮体動揺の応答関数を求める。この手法は船舶工学や石油開発分野でよく使われており、抗力を線形化することにより流体の粘性効果³⁾を評価することができるが、各種の非線形効果を厳密に評価することが難しい。一方、後者は土木工学の分野において、主に杭に作用する流体力の算定に用いられ、構造物による波の変形が無視できると仮定しているため、構造物スケールが波長に比べて十分小さいことを前提としている。この手法の利点としては、流体による抗力が水粒子と浮体構造の相対速度により表現され、流体の粘性効果を考慮でき、時間領域で解くことにより各種の非線形効果を厳密に評価できる。

本研究その2では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、モリソン式に基づく数値解析モデルを開発した。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の検証を行った。

2. 解析モデルの概要

一般に、波浪・風による構造物の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),5)} 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波浪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。

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

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

ここで、 F_E は部材の単位長さに作用する流体力、 ρ 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^{3),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⁶⁾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 は流速、 $\dot{X}$ 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

浮体の動揺量を予測するために、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

1) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 大学院生
Graduate Student Dept. of Civil Eng., Univ. of Tokyo

2) 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構 助教授
Assoc. Prof. Institute of Eng. Innovation, Univ. of Tokyo

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.

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, 風車と浮体を含めた解析モデルを作成し, 固有値解析と動揺解析を行った. 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についてはク

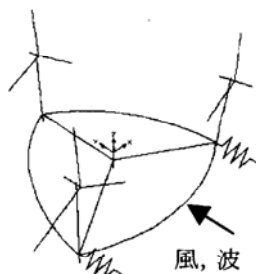


図1 解析モデル

リーガン・カーペンター数 K_c の関数として文献 6 により定めた値を採用した. また空気力を算定する際には, 発電時においてスラスト係数 0.33 とし, 暴風時においてタワー, ナセル, ブレードの抗力係数はそれぞれ 0.6, 0.6, 1.3 とした. 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, 解析モデルを用い, 固有値解析を行った. 得られたサージ, ヒープ, ピッチの固有周期はそれぞれ 2.82s, 3.06s, 2.68s であり, 自由振動から得られた値とほぼ一致し, 解析モデルの妥当性を確認できた.

(b) 流体力による減衰効果 固有周期付近での動揺量を定量的に評価するためには, 流体力による減衰効果を正確に求める必要がある. 流体力による減衰は抗力係数に大きく依存し, その決め方は解析結果に大きな影響を与える. これまでに, 浮体の部材が大きいことから抗力係数を無視した研究例¹⁾や, 抗力係数を一定値とした研究例⁴⁾がある. 図 2 には C_D をゼロ¹⁾, C_D を一定値⁴⁾, そして C_D をクーリーガン・カーペンター数 K_c の関数⁶⁾とした 3 つのケースについて解析を行い, 得られたサージの周波数応答関数を示す. 実験結果との比較により, 抗力を無視した解析 ($C_D = 0$) は固有周期付近での応答を過大に評価し, また, 抗力係数を一定値とした解析は, サージを過小に評価していることが分かる. 抗力係数をクーリーガン・カーペンター数の関数とした解析は実験結果とよく一致し, 抗力係数が動揺量の評価に与える影響を明らかにした.

(c) 動揺解析の結果 図 3 には無風時において動揺解析から得られたサージの周波数応答関数と動揺実験から得られたものを示す. サージの固有周期に対応する共振点の近辺での振幅が顕著に現れる. この近辺での振幅は波高の増大に伴い減少する. これは, 波高が大きいと浮体の運動速度が増大し, 流体力による減衰

が大きくなる. 一方, 固有周期から離れると, サージと波高の関係が線形であることは解析からも示された.

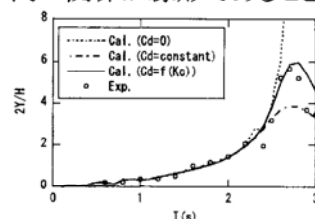


図2 抗力係数がサージに与える影響

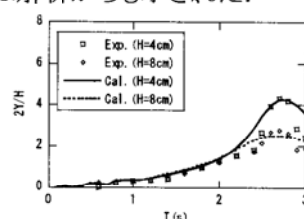
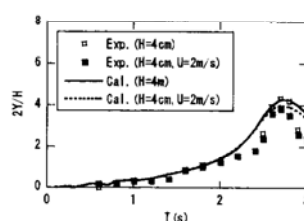
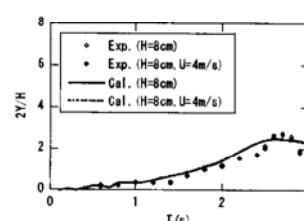


図3 サージの周波数応答関数

(d) 空気力による減衰効果 風車から浮体に与える影響を明らかにするために, 風車と浮体を含めた解析モデルを用い, 発電時(風速 2m/s)と暴風時(風速 4m/s)の動揺解析を行った. 図 4 には, 風水動揺実験と解析から得られたサージの周波数応答関数を示す. 風車発電時のサージは無風時の値に比べ, 共振周期近辺での振幅が減少し, 風車ロータの抗力による空力減衰効果が再現された. 一方, 暴風時のサージは無風時の値と比較すると, 殆ど変化しない. これはブレードに起因する空力減衰は流体力による減衰に比べ小さいことが解析から分かった. また, 解析結果が実験とほぼ一致し, 数値解析モデルの予測精度を確認できた.



(a) 発電時



(b) 暴風時

図4 風速によるサージの周波数応答関数

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, 風車と浮体との相互作用を考慮した浮体動揺予測プログラムを開発し, 流体力, 空気力による減衰効果を明らかにした. 風水動揺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) A. Henderson, M. Patel: Rigid-Body Motion of a floating offshore wind farm, Int. Journal of Ambient Energy, Vol.19, No.3, pp.167-180, 1998. 2) 日本造船学会 海洋工学委員会性能部会編: 実践浮体の流体力学, 成山堂書店, 2003. 3) 日本建築学会: 海洋構造物構造設計指針(浮遊式)・同解説, pp.110-118, 1990. 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) 日本造船学会, 他: 半潜水式海洋構造物の構造強度概論 2, 日本造船学会誌, 第 675, 昭和 6 年 5 月, pp.583-587. 6) Offshore Standard DNV-OS-J101: Design of offshore wind turbine structures, 2004.