

洋上風力発電施設における制振装置の基礎的考察

小郷卓也*・関田欣治**・白石悟***・酒井洋一****

* 前 (財)沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** 東海大学 海洋学部 海洋建設工学科 教授 (工博)

*** 北海道工業大学 工学部社会基盤工学科 教授 (工博)

**** (財)沿岸技術研究センター 研究主幹

洋上の風力発電施設は、陸上の当該施設と比較して、騒音等環境上の問題が少ないこと、施設の大型化が可能なこと、風速が大きくかつ風の乱れが少なく安定した電力を得る環境にあることなどの利点を有することなどから、今後の展開が期待されている。

一方、洋上の風力発電施設は、こうした良好な風環境のために風による応答の増大に起因する疲労などの問題が懸念される。本論文は、洋上の風力発電施設にTMDを設置した場合のその効果について、簡略なモデルにより基礎的な考察を行ったものである。

キーワード: 洋上風力発電施設, TMD, 制振装置, モノパイル基礎

1. はじめに

洋上の風力発電施設は、陸上の当該施設と比較して、騒音等環境上の問題が少ないこと、施設の大型化が可能なこと、風速が大きくかつ風の乱れが少なく安定した電力を得る環境にあることなどの利点を有することから、既に欧州では大規模な洋上風力発電施設が建設されている。しかしながら、洋上への風力発電施設導入には、風と波浪を同時に受ける際の耐力や疲労損傷の問題など陸上にはない課題を抱えている。こうした問題は長年の疲労の蓄積が表面化することによって初めて問題となるため、計画段階で十分に検討しておくことが望ましい。

財団法人沿岸技術研究センターでは、疲労問題への取り組みの一環として、東海大学、三菱重工業株式会社、五洋建設株式会社、株式会社ニュージェックによる「洋上風力発電施設の疲労解析に関する共同研究」を行った。この研究では、防波堤外の洋上(水深10m)に2400kWの発電機を搭載するタワーとモノパイル基礎からなる洋上風力発電施設を想定した。荷重条件としては、近接する観測地点にて得られた10年間の有義波高と風速を同時計測することにより得られた海象データを整理し、有義波高、波周期そして風速の関係を近似的に関連づけ、その結果を海象10ランクに分類して疲労解析した^{1) 2)}。その結果、DL+10m高さ風速が15.46m/s(出現確率:2.67%)のときにタワー頂部に1.23mの応答変位(風方向風荷重)が生じ、レインフロー法で計算すると疲労寿命は96年と算出された。

疲労寿命が設計寿命を上回っており、問題がないという結論に達したが、構造物とモデル化の差異などによるばらつきを考えると、安全をみてより余裕をみることが望ましい。

裕度を上げるひとつの方策として、振動制御が挙

げられ、制御用の動力を要すアクティブ制御や動力不要のパッシブ制御が考えられる。ここでは、ポールや煙突などの塔状構造物の一部に既に設置されているパッシブ制御のひとつである、TMD(Tuned Mass Damper; 動吸振器)の適用を考えた。

本論文では、洋上の風力発電施設にTMDを設置した場合の制振効果について、多質点系の構造物である風力発電施設を等価な運動エネルギーを有する一質点系に変換しTMDの制振効果を確認するとともに、構造物の減衰定数について基礎的な考察を行った。

2. モデルと減衰定数の設定

解析に用いた風力発電施設、基礎のモデル及び減衰定数の設定は次の通りである。

2.1 風力発電施設、基礎のモデル

洋上の風力発電施設の基礎は、モノパイル基礎とした。モデル化にあたっては、タワートップからモノパイル基礎との接合部までを9要素、モノパイル基礎接合部から基礎底部(海底部)までを8要素に分割し、集中質量とそれらをつなぐ弾性梁で近似した。また、ローター、ナセルについても集中質量にてモデル化し、タワーのモデルの先端にすえつけた。図-1にモデル図を示す。

タワーは基部で外径4.0m(板厚40mm)、タワートップで外径3.0m(板厚13mm)とし、高さ方向に直線のテーパーを仮定した鋼管(SKK490)とした。

基礎のモデル化に関しては、杭と地盤の相互作用を考慮するため横方向地盤ばねにより基礎を含めてモデル化した(図-2)。なお、線形の横方向地盤ばねの算定は「港湾の施設の技術上の基準・同解説」³⁾に従っ

た。

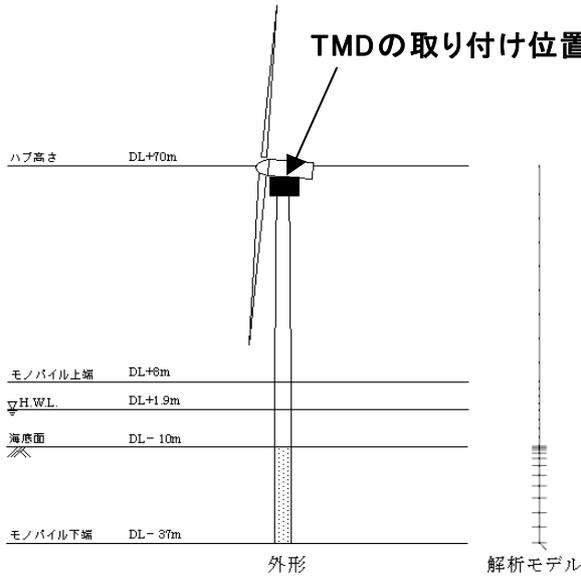


図-1 モデル図

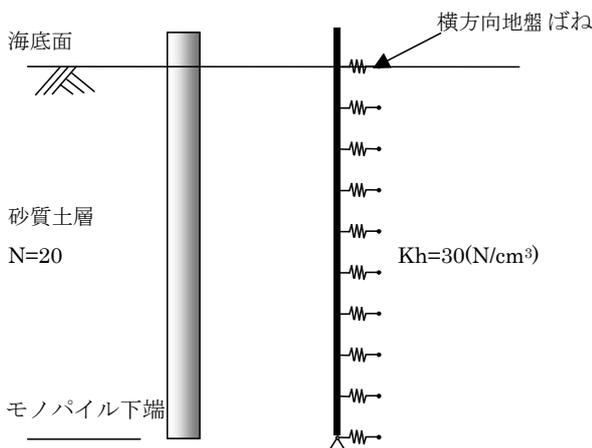


図-2 基礎のモデル化

2.2 減衰定数の設定

ここでは運転時の回転する3枚のブレードにかかる荷重は、ブレードを円盤とみなしてモデル化(ディスクモデル)することにより空力減衰を考慮した模型実験より得られた結果⁴⁾(1次モードの減衰定数： $\zeta=0.07$)を適用した。

3. TMDの設定

制振効果が期待できるTMDの設置位置は、最も移動量の大きい部分である。そこで、ナセル付近に設置するものとした。

TMDの設定には、定点理論⁵⁾を準用した。定点理論では、減衰を含む振動系の周波数応答関数(曲線)において、減衰の大きさに関係なく定まる特異点を利用して、その応答高さを同一なものとする、そしてそ

の特異点において周波数応答関数の極値をとることによってダンパーの性能が定まる設計方法であり、TMDの質量を仮定すれば最適なTMDの諸元(ばね定数、減衰定数)を得ることができる。

3.1 固有値解析

風力発電施設は多質点系の構造物であるが、定点理論を準用し設定するためには等価な運動エネルギーを有する1質点系に変換する必要がある。変換イメージを図-3に示す。等価な1質点系の質量を得るために固有値解析を行った。固有値解析の結果を図-4に示す。1次モード形状からTMDの設定を試みる。

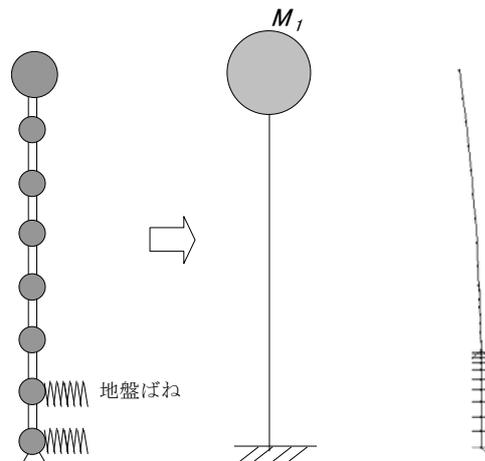


図-3 イメージ

図-4 固有値の解析結果
(1次モード $f=0.3\text{Hz}$)

風車本体を図-4に示すとおり、1質点系の振動系に換算し、この振動系にTMDを設置する。

ブレード、ナセルおよび海底部を含むタワーを多質点でモデル化した運動方程式は次式のとおりである。

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

モード解析により得られた1次の固有ベクトル $[\phi_1]$ を用いて等価な運動エネルギーとなる1質点系有効質量 M_1 を算出する。

$$M_1 = [\phi_1]^T \cdot [M] \cdot [\phi_1] \quad (2)$$

3.2 TMD設計モデル

風車本体の構造物と単一TMD(1つだけTMDを設置する場合は図-5の2質点系に変換され、この力学モデルは次式で示される。

$$M_1\ddot{x}_1 + C_1\dot{x}_1 + K_1x_1 - C_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - K_2(x_2 - x_1) = f$$

$$M_2\ddot{x}_2 + C_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + K_2(x_2 - x_1) = 0 \quad (3)$$

ここに、 M は質量、 K :ばね定数、 C :粘性減衰係数を示し、サフィックス1は構造物(風力発電施設)を、サフィックス2はTMDを示す。

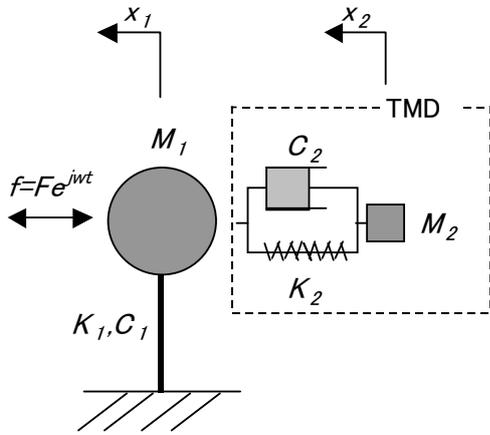


図-5 単一TMD力学モデル

制振の効果は、静的な荷重による応答変位(x_{st})に対する、タワートップの変位量の比で示され、周波数応答関数は以下のとおりである。

$$\frac{x_1}{x_{st}} = \frac{\sqrt{(\gamma^2 - \lambda^2)^2 + (2\zeta_2\lambda)^2}}{\sqrt{\{(1 - \lambda^2)(\gamma^2 - \lambda^2) - \mu\gamma^2\lambda^2 - 4\zeta_1\zeta_2\lambda^2\}^2 + (2\lambda)^2[\zeta_2\{1 - (1 + \mu)\lambda^2\} + \zeta_1(\gamma^2 - \lambda^2)]^2}} \quad (4)$$

ここに、 μ は質量比(M_2/M_1)、 λ は強制振動数比(ω/Ω_1)、 Ω_1 は制振対象の固有振動数($\sqrt{K_1/M_1}$)、 γ は固有振動数比(n_1/Ω_1)、 ζ_1 は風力発電施設の減衰定数、 ζ_2 はTMDの減衰定数($C_2/(2M_2\Omega_1)$)。

ここで、等価換算質量に対するTMDの質量比はその値を大きくするほど、大きな制振効果が得られるが、大きな値とすると、風車タワー部に与える自重成分が大きくなるため不経済な設計となることも懸念される。そのため、ここでは($\mu=2\%$)と設定した。また減衰定数は $h=7\%$ とした。この計算結果を図-6に示す。この図から、TMDにより応答倍率は4割程度低減できるものの、構造物自身のもつ減衰が大きいためTMDがあまり有効に働いていないことがわかる。

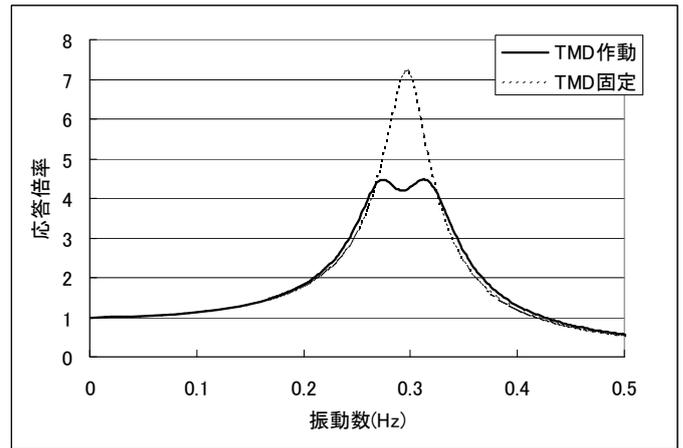


図-6 周波数応答 ($h=7\%$, 単一TMD)

一方、一般の鋼構造物の場合は、2%程度の構造減衰を採用する場合も多い。この場合には図-7のような制振効果が得られ、この場合にはTMD固定とTMD作動を比べると、7割程度、振動振幅を抑制できることがわかった(なお、「TMD固定」とは、単一TMDの振動子(質量)が動かないように固縛した状態を示す)。

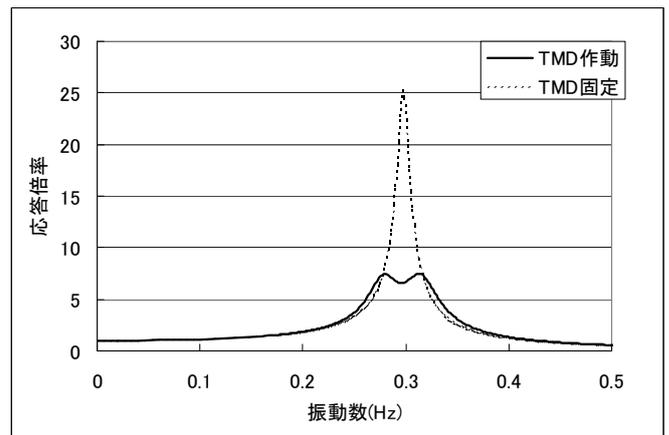


図-7 周波数応答 ($h=2\%$, 単一TMD)

TMDの設定にあたりTMDと風車本体の諸元がモデル化や経年劣化などにより多少異なる可能性があるため、ある程度の振動特性の変動を見越すことが望ましい。

余裕を持たす方法としてTMDの質量を大き目に設定することが考えられ、これは新設風車の場合は可能であるが既設風車の場合は風車支柱の耐力の関係から困難が予想される。そこで、なるべく少ないTMDの質量で振動数が若干変動しても広い範囲で共振時の応答を平滑にすることが望まれる。適切な諸元を有するTMDを設定した部位はそのTMDの固有振動数の部分において変曲点となるためくぼみが生じる。微妙に固有振動数を変えて複数のTMD(多重TMD)を設置することによって共振時の応答を平滑化が可能となる。

ここでは、式(3)に基づく単一TMD振動子の質量(M_2)

を2分割した2重TMDを設定することにより周波数応答を確認した。

風車本体の構造物と2重TMDは図-8の3質点系に変換され、この力学モデルは次式で示される。

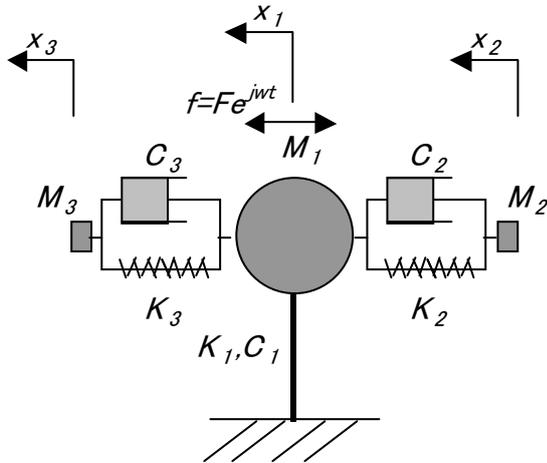


図-8 2重TMD力学モデル

$$\begin{vmatrix} x_1 \\ x_{st} \end{vmatrix} = K_1 / \begin{vmatrix} -M_1\omega^2 + jC_1\omega + K_1 + \\ + \sum_{i=2}^3 \frac{-M_i\omega^2(jC_i\omega + K_i)}{-M_i\omega^2 + jC_i\omega + K_i} \end{vmatrix} \quad (5)$$

ここに、 $M_2=M_3$ であり、 j は $\sqrt{-1}$ 。

$\begin{vmatrix} x_1 \\ x_{st} \end{vmatrix}$ が最小となるようにばね定数 K_i および減衰係

数 C_i を求めた($i=2\sim 3$)。

2重TMDの周波数応答($h=2\%$)を図-9に示す。図-9の共振付近(0.3Hz付近)は図-7と比べるとより平滑であることがわかるとともに、2重TMD固定と2重TMD作動を比べると、同程度、振動振幅を抑制できることが確認できた。

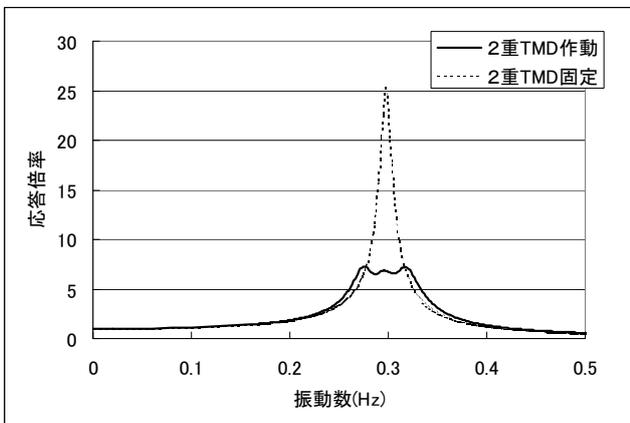


図-9 周波数応答 ($h=2\%$, 2重TMD)

今回検討した、風車のナセル部の重量は全体重量の約3割程度を占める、トップヘビーな構造物である。仮に減衰が低い場合においても、吸収すべきエネルギーが大きいため、TMDの重量を増やさないと、TMDの振動子の移動量が非常に大きくなる。今回は振動子の移動量は検討していないが、実際の設計においては振動子の移動量を十分検討してTMDを選定する必要がある。

4. おわりに

国内の洋上風力発電施設の施工実績は少なく、疲労などが問題になっていないように見受けられるが、経年に伴う疲労の蓄積を考えると、前もって風や波浪などによる疲労問題を検討しておく必要がある。

今後の課題として以下の事項が挙げられる。

- 1) TMDを付加することによる疲労寿命の予測
- 2) 風車本体のモデル化を多質点系で行い、高次モードの影響を考慮すべきであること
- 3) ブレードの回転運動によって生じる振動の検討
- 4) 減衰定数は構造物の振動特性において重要な要素である。そのため、洋上風力発電施設における減衰定数の観測データを取得する必要があること

参考文献

- 1) Satoru SHIRAIISHI, Kinji SEKITA, Takuya OGO, Shunzo OKA, Motohisa HARA, Shigeo YOKOYAMA: Experimental Fatigue Analysis of an Offshore Wind Power Generation Facility, The 5th World Wind Energy conference, WWEC2006, 2006.
- 2) 成瀬英治, 関田欣治, 西和宏, 岡俊蔵, 原基久, 横山茂生: 洋上風力発電施設における疲労解析例, 海洋開発論文集, vol. 22, pp. 881-886, 2006.
- 3) 社団法人 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, P. 739, 1999
- 4) 関田欣治, 石川裕和, 林辰樹, 山下篤, 矢後清和: 洋上風力発電施設に作用する風抗力及び減衰定数に関する風洞装置を用いた基礎的実験, 海洋開発論文集, Vol. 18, pp. 725-730, 2002.
- 5) 背戸一登, 松本幸人: パソコンで解く振動の制御, 丸善株式会社, 1999.