

洋上風力モノパイル基礎の減衰の設定に関する検証

清水建設（株） 正会員 ○和田 智之

清水建設（株） 正会員 田中 佑樹

清水建設（株） 正会員 メンチャカソサ アルトゥーロ

1. はじめに

洋上風力発電の設計では、風波荷重を算出する際に、風車の運転と、風と波の同時作用を考慮した時刻歴解析を実施する必要がある。この時刻歴解析において、風車全体の減衰比の設定は応答値に大きな影響を与えるため、これを適切に評価する必要がある。

本研究では、既往の論文から算出される減衰比と自由減衰振動解析による減衰比を比較し、減衰比の設定方法について検証した。

2. 減衰の設定

着床式洋上風力の設計で考慮できる減衰には、主に構造減衰、水力減衰、地盤減衰、空力減衰があり、これらの減衰の足し合わせからレイリー減衰モデルに基づいて全体系の減衰比を設定する。本研究では、簡便のため水力減衰と空力減衰については省略する。

各減衰の算出方法は多くの文献に記載されている。例えば、地盤減衰は M.F.Cook and J.Kim Vandiver¹⁾より、以下の式より算出できる。

$$\zeta_{\text{地盤}} = \frac{\zeta_{\text{smd}}}{M\omega^2} \sum_{j=1}^n K_s(z_j) \psi(z_j)^2 \quad (1)$$

ここに、 ζ_{smd} は地盤の材料減衰比、 M 、 ω 、 K_s 、 ψ はそれぞれ 1 次モードの正規化質量、円振動数、地盤ばね剛性、モード形状を示す。構造減衰は、「風力発電所の設置又は変更の工事計画の審査に関する実施要領」より、以下の式より算出できる。

$$\zeta_{\text{構造}} = \max(2.0e^{-1.3T_1} + 0.15, 0.2) \quad (2)$$

ここに、 T_1 は 1 次モードの固有周期を示す。

3. 自由減衰振動解析

上記の論文ベースの地盤減衰の妥当性を評価するために、自由減衰振動解析を実施し、1 次モード及び 2 次モードのモーダル減衰比を算出した。本解析では、Ishihara and Wang²⁾を参照し、洋上風車のモードと同じ振動数を有する正弦波でタワーを加振し、過渡振動を低減させた後、加えた力を除去して洋上風車を自由振動

させた。加振振動モードのモーダル減衰比は下式に示す包絡線関数を用いて推定した。

$$g(t) = A \exp(-\omega \xi_j t) \quad (3)$$

ここに、 A は振幅、 ω は円振動数、 ξ_j は減衰比、 t は時間を示す。

解析対象は 3MW 風車とし、モノパイル基礎及び風車は図 1 に示すように、Winkler モデルによってモデル化した。Winkler モデルでは RNA は集中質量でモデル化し、剛梁でタワートップに接続した。タワーとモノパイルは梁ばね要素とし、地盤-構造物の相互作用は、地盤ばねとダッシュポットでモデル化した。なお、1 次モードの構造減衰比は(2)式より算出し、2 次モードの構造減衰比は 1 次モードと同じとした。

地盤ばねは、大口径杭の 3 次元効果を考慮し、回転方向のばねを有する PISA-1D モデル³⁾を採用した。また、比較対象として、Vesic⁴⁾の地盤ばねを用いた場合の減

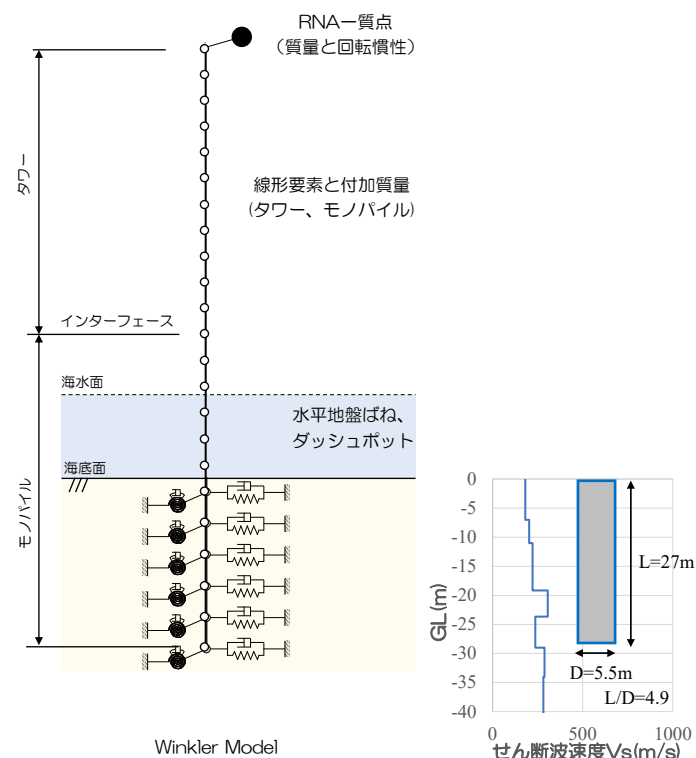


図 1 モノパイル基礎及び風車のモデル図

キーワード 洋上風力、着床式、モノパイル、減衰、自由振動

連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋 2-16-1 清水建設（株） TEL 03-3561-1372

衰比についても算出した．ここで，Vesic の地盤ばねを用いる場合は回転方向のばねは考慮しないこととした．ダッシュポットは Gazetas and Dobry⁵⁾のモデルを用い，逸散減衰は 1Hz 以下の振動数の場合は無視した．M.F.Cook の地盤減衰を考慮する場合はダッシュポットをモデル化せず，モーダル減衰として考慮した．

次に，地盤減衰を算出するための荷重レベルを表 1 に示す．これらの荷重を作用させ，以下に示す Kagawa and Kraft⁶⁾の式を用いて，杭の水平変位からひずみを算出し，地盤の h-γ 曲線から履歴減衰比を算出した．

$$\gamma(z) = \frac{1+\nu(z)}{2.5D} y(z) \tag{4}$$

ここに， $\gamma(z)$ はひずみ， $\nu(z)$ はポアソン比， D は杭径， $y(z)$ は変位を示す．なお，FLS 荷重レベルの履歴減衰比には，風力発電設備支持物構造設計指針 同解説（土木学会，2010）に記載の最小値の 2%を用いた．

4. 減衰比の比較

ULS 荷重レベルのモーダル減衰比の比較結果を図 2 及び表 2 に示す．Case3 の地盤ばね剛性は Case2 よりも大きく，固有振動数を大きく評価し，モーダル減衰を小さく評価している．また，Case1 のモーダル減衰は Case2 と比較し，1 次はモーダル減衰を大きく，2 次は小さく評価している．Case1 の 2 次のモーダル減衰が小さい理由として，地盤の逸散減衰が考慮されていないためと考えられる．

FLS 荷重レベルのモーダル減衰比の比較結果を表 3 に示す．Case6 は固有振動数を大きく評価しているものの，FLS では履歴減衰比を 2%で固定していることから，Case5 モデルよりもダッシュポットが大きい分，モーダル減衰比が大きく評価される結果となった．また，Case4 は Case5 と比較し，1 次・2 次ともにモーダル減衰を小さく評価している．

5. まとめ

M.F.Cook の地盤減衰は自由減衰振動解析の結果と比較して，荷重のレベルによっては 1 次で減衰を大きく評価する可能性があること，2 次は総じて小さく評価することから，取り扱いには十分に留意する必要がある．なお，1 次の減衰に関しては地盤条件や風車機種によって大小関係が変わる可能性があるため，条件に応じて確認する必要がある．

本研究にあたり，（株）ウェンティ・ジャパンの協力を得た．記して謝意を表する．

表 1 想定する荷重レベル

荷重レベル	風車条件	風速 (m/s)	履歴減衰比 (%)
ULS	定格風速	8.0	ひずみより算出
FLS	Vr-2m/s		一律 2%を採用

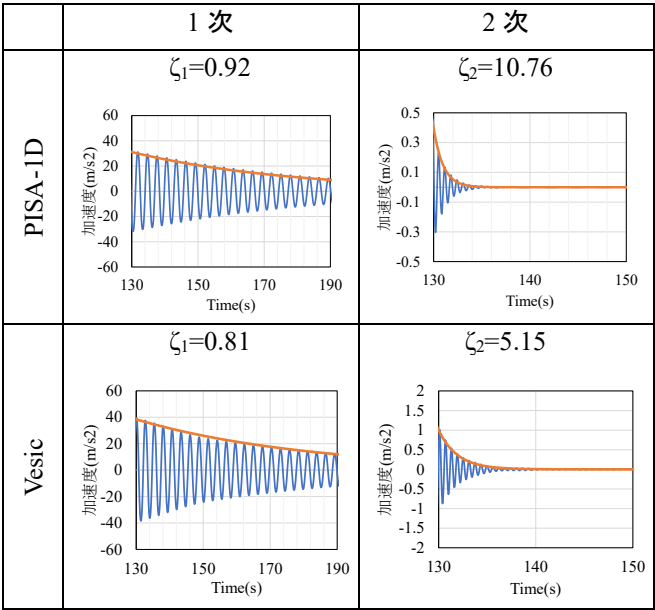


図 2 ULS 荷重レベルの自由減衰振動解析結果

表 2 ULS 荷重レベルの減衰比の比較結果

Case	地盤ばね	地盤減衰	固有振動数 (Hz)		モーダル減衰比 (%)	
			1 次	2 次	1 次	2 次
1	PISA	M.F.Cook	0.357	1.480	1.07	1.43
2	PISA	Gazetas	0.357	1.480	0.92	10.76
3	Vesic	Gazetas	0.379	1.601	0.81	5.15

表 3 FLS 荷重レベルの減衰比の比較結果

Case	地盤ばね	地盤減衰	固有振動数 (Hz)		モーダル減衰比 (%)	
			1 次	2 次	1 次	2 次
4	PISA	M.F.Cook	0.357	1.480	0.42	0.50
5	PISA	Gazetas	0.357	1.480	0.45	9.76
6	Vesic	Gazetas	0.379	1.601	0.51	4.55

参考文献

1) Michael F. Cook & J. Kim Vandiver, OTC4285, 1982.
2) T. Ishihara, L. Wang, Wind Energy, Volume 22, Issue 12. pp.1760-1778, 2019
3) Burd H.J ら; Géotechnique, vol.70, No. 11, pp.1048–1066, 2020.
4) Vesic A. B., Journal of the Engineering Mechanics Division, 87(2): 35-54, 1961.
5) Gazetas G. and Dobry R., Journal of Geotechnical engineering, 110(1): 20-40, 1984
6) Kagawa T. and Kraft L. M., Soils and Foundations, 20(4): 19-36, 1980.