

洋上風力発電ジャケット基礎の地震時の地盤減衰評価*

Evaluation of Soil Damping for Offshore Wind Turbine with Jacket Foundation during Earthquakes

石尾 将大** 吉岡 健** 正月 俊行*** 内山 不二男*** 石原 孟****

Shota ISHIO Takeshi YOSHIOKA Toshiyuki MASATSUKI Fujio UCHIYAMA Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

洋上風力発電では近年、風車の大型化が目覚ましく、これに伴い支持構造物の設計において極稀地震時の応答が支配的となり得る。地震応答低減のためには地盤の減衰効果を最大限考慮したいが、土木学会指針¹⁾では全体1次固有振動数 f_1 が地盤の1次固有振動数 f_g よりも小さい場合、1次応答には地盤の逸散減衰を考慮しない規定であることに留意が必要である。大型洋上風車の場合 f_1 が小さくなるため、ほとんどの地点で $f_1 < f_g$ に当てはまるものと考えられる²⁾。

そこで本研究では10MW級風車のジャケット基礎を対象として減衰特性を評価した上で、2次モード以上のみ逸散減衰を簡易に考慮できる設定方法（以下、簡易設定法）を検討した。加えて、簡易設定法モデルによる地震応答解析を実施し、土木学会指針式（以下、指針式）および薄層要素法モデルの応答と比較するとともに、各式を適用する際の注意点を述べる。

2. 減衰特性の比較

まずFig.1に示すジャケット基礎とモノパイル基礎の解析モデルを用い、逸散減衰あり／なしの影響を比較する。構造減衰は0.2%とし、杭部分は地盤のばねとダッシュポットを有するWinklerモデルとしている。逸散減衰ありの場合は、ダッシュポットに地盤の材料+履歴減衰項に加え、指針式（Gazetas式）による逸散減衰項を加える。Fig.2とFig.3は、全体1次固有周期 T_1 の自由減衰振動解析結果である。AIJ理論式による1次モード減衰の各成分の寄与率はTable 1示す。これより、ジャケット基礎は1次モードに対して逸散減衰が寄与していないが、モノパイル基礎は逸散減衰によって1次モード減衰比 ζ_1 が有意に増加していることが分かる。

このことは、Ishihara and Wang⁴⁾が重力式基礎とモノパイル基礎の応答特性の考察に用いたAIJ理論式(1)からも説明できる。

$$\zeta_1 = \zeta_{struc,1st} \left(\frac{T_{struc,1st}}{T_1} \right)^3 + \zeta_s \left(\frac{T_s}{T_1} \right)^3 + \zeta_R \left(\frac{T_R}{T_1} \right)^3 \quad (1)$$

すなわち、ジャケット基礎の場合はタワー応答がトラス効果によって軸力に変換されるため杭頭変位が小さくロッキング成分が寄与しないが、モノパイル基礎の

場合は杭頭変位が大きくロッキング成分が寄与するため、1次モードにも逸散減衰効果が表れている。

3. 簡易設定法による逸散減衰のモデル化

第2章の結果から、指針式にて逸散減衰を考慮した場合、モノパイル基礎にて1次モードに逸散減衰効果が表れ、減衰を過大評価することが分かる。そこで、2次モード以上のみ逸散減衰効果を考慮することがで

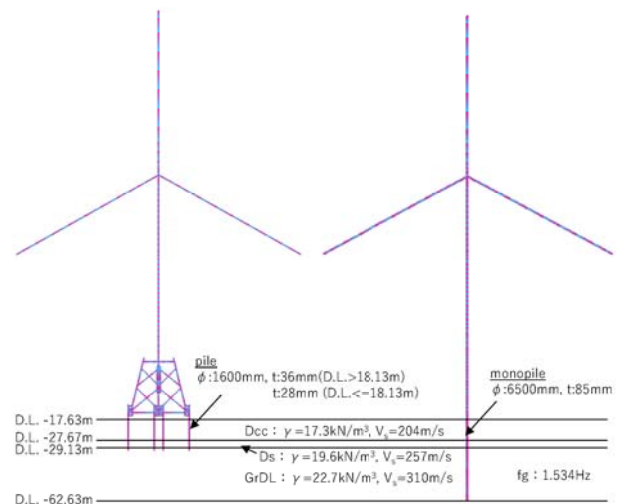
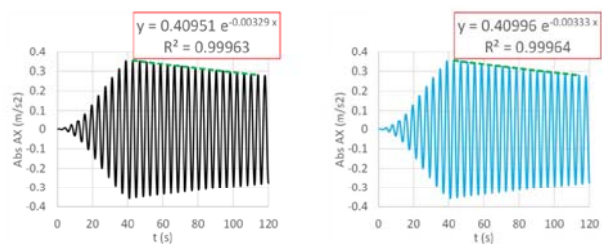
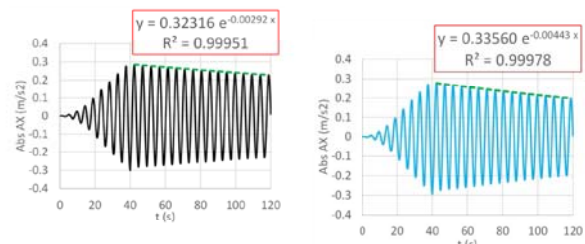


Fig.1 解析モデルおよび地盤物性値



(a) 指針式逸散減衰なし (b) 指針式逸散減衰あり

Fig.2 ジャケット基礎の1次モードの自由減衰



(a) 指針式逸散減衰なし (b) 指針式逸散減衰あり

Fig.3 モノパイル基礎の1次モードの自由減衰

*令和5年12月1日第45回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

** 会員 電源開発(株) (ひびきウインドエナジー(株) 出向)

〒104-8165 東京都中央区銀座6-15-1

*** 会員 (株) 構造計画研究所 〒164-0011 東京都中野区中央4-5-3

**** 会員 東京大学 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

Table 1 AIJ 理論式による 1 次モード減衰の寄与率

			1次モード減衰比	構造成分	スウェー成分	ロッキング成分
			ζ_1	$\zeta_1*(T_f/T_1)^3$	$\zeta_s*(T_s/T_1)^3$	$\zeta_R*(T_R/T_1)^3$
ジャケット基礎	逸散減衰なし	成分分解(%)	0.20	0.19	0.00	0.01
		寄与率		96%	0%	4%
	逸散減衰あり	成分分解(%)	0.21	0.19	0.00	0.02
		寄与率		92%	0%	8%
モノパイル基礎	逸散減衰なし	成分分解(%)	0.22	0.18	0.00	0.04
		寄与率		83%	0%	17%
	逸散減衰あり	成分分解(%)	0.33	0.18	0.01	0.14
		寄与率		56%	1%	43%

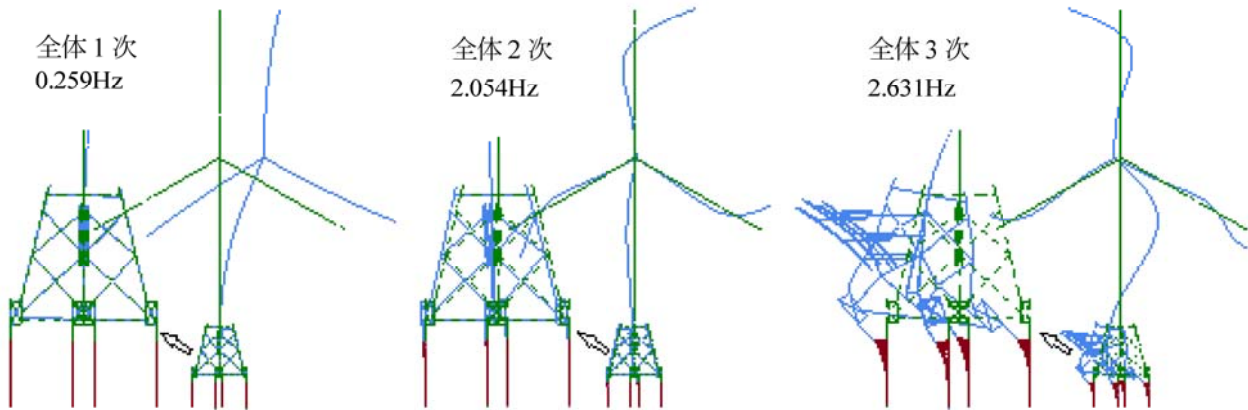


Fig.4 ジャケット基礎モデルの各モード形状

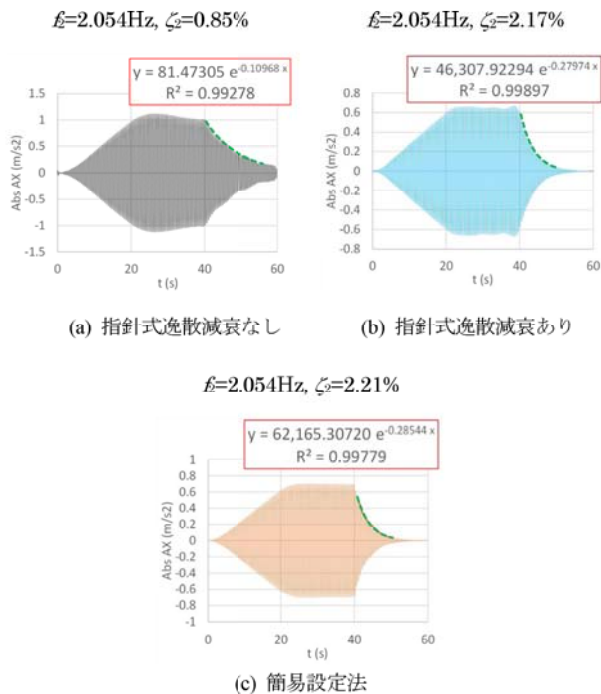


Fig.5 2 次モードの自由減衰振動解析結果

き、モノパイル基礎にも適用可能な簡易設定法を検討する。簡易設定法は Wang and Ishihara ⁵⁾が地盤の初期減

衰（材料減衰）を考慮するために用いた手法を応用したものであり、その設定フローは以下の通りである。

- ① 逸散減衰係数は指針式 (Gazetas 式) より算定する。
- ② 2 次モードの自由減衰振動解析を実施し、逸散減衰のありとなしによるモード減衰比の増加分 α を評価するとともに、④に示すレーリー減衰の 2 次モード減衰に追加する。
- ③ 地盤のダッシュポットに設定する減衰係数は、逸散減衰なしによる値を設定する。すなわち、地盤応答解析による材料減衰＋履歴減衰のみを考慮する。
- ④ 式(2)に示す構造のレーリー減衰評価に用いる 2 次モード減衰比に、②の増加分を加えて算定する。

$$C = a_1[M] + a_2[K]$$

(2)

$$a_1 = \frac{2\omega_1\omega_2(\omega_2\zeta_1 - \omega_1\zeta_2)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}, \quad a_2 = \frac{2(\omega_2\zeta_2 - \omega_1\zeta_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}$$

すなわち、 $\zeta_1 = 0.2\%, \zeta_2 = 0.2\% + \alpha, \omega = 2\pi f$

4. 簡易設定法の検証

ジャケット基礎を対象に簡易設定法の妥当性を検証する。参考として、ジャケット基礎モデルの各モード形状図を Fig.4 に示す。まず、逸散減衰ありとなしで 2 次モードの自由減衰振動解析を実施し、逸散減衰効果による 2 次モード減衰の増分 α は 1.32%であることが分かったため、

Table 2 指針式逸散減衰なし、ありと簡易設定法における地震応答解析結果の比較

		1.指針式逸散減衰なし	2.指針式逸散減衰あり	3.簡易設定法
固有振動数(Hz)	f_1	0.259	0.259	0.259
	f_2	2.054	2.054	2.054
モード減衰(%)	ζ_1	0.20	0.20	0.20
	ζ_2	0.20	0.20	1.52
レーリー減衰	a_1	0.0058	0.0058	0.0003
	a_2	0.0003	0.0003	0.0024
曲げモーメント最大 (side-side方向) (kNm)	タワートップ	6,369	3,286	3,937
	タワー高60m	173,326	110,979	126,933
	タワー高30m	102,174	88,218	87,224
	タワー基部	357,377	234,932	262,195

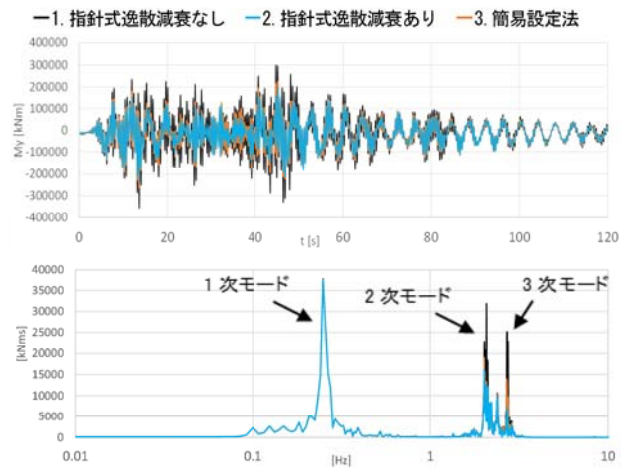


Fig.6 指針式逸散減衰なし、ありと簡易設定法におけるタワー基部曲げモーメント時刻歴とフーリエスペクトルの比較

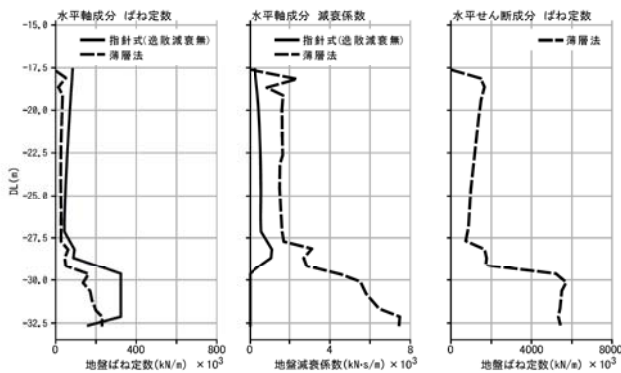


Fig.7 動的地盤ばねの鉛直分布

その増分をレーリー減衰の2次モード減衰に追加し、同様に簡易設定法モデルにて2次の自由減衰振動解析を実施し、Fig.5に示した。その結果、指針式逸散減衰あり(Fig.5(b))と簡易設定法(Fig.5(c))で概ね同等の2次モード減衰が得られた。

これらのモデルについて、極稀地震時のスペクトル適合波のランダム位相、Side-Side方向加振にて地震応答解析を実施し、Table 2とFig.6に示した。その結果、タ

ワー基部曲げモーメントのフーリエスペクトルから分かるように、指針式逸散減衰ありと簡易設定法では1次、2次モードは同等の結果が得られた。これは地盤バネ・減衰を等価値で線形化近似していることが要因であると考えられる。一方、3次モードでは簡易設定法が指針式逸散減衰ありよりも若干高い応答が示された。これは簡易設定法で用いたレーリー減衰では、3次モード減衰を正確に考慮していないためである。

本洋上風車の場合、1次モード減衰が小さいためレーリー減衰はほぼ剛性比例型となり、振動数に応じて減衰比が線形に増加するが、地盤のダッシュポットで減衰を考慮する場合は、振動数に応じて非線形に増加する傾向があるためこのような差が生じたものと考えられる。しかしながら、Table 2から分かるように、簡易設定法は指針式逸散減衰なしよりもタワー応答が有意に低減し、かつ指針式逸散減衰ありよりも保守側であることから、実用的であると考えられる。なお、山本ら⁹⁾はモノパイル基礎に対して同様の検討を行い、簡易設定法の有用性を示している。

5. 薄層法モデルとの比較

簡易設定法の追加検証として、薄層要素法と宮本ら⁷⁾の方法(以下、薄層法)を適用したモデルにて地震応答解析を実施した。モデルは、前章で使用したWinklerモデルを薄層法にて算定した地盤ばねと減衰値に変更したものを適用した。荷重条件についても前章と同様とした。

Fig.7に地盤ばね値の鉛直分布を示す。薄層法により地盤の逸散減衰を考慮した結果、D.L.-29m以浅において水平方向の減衰係数は指針式逸散減衰なし(≡簡易設定法)に比べ約2.5倍となった。D.L.-29m以深の岩盤層においても減衰係数に大きな差があるが、岩盤では杭の水平変位がほとんど発生しないため応答低減には貢献しない。

Fig.8に地震応答解析によるタワーの曲げモーメントの時系列変化とフーリエスペクトルを示す。薄層法のスペクトルを見ると、1次モードは指針式逸散減衰なし

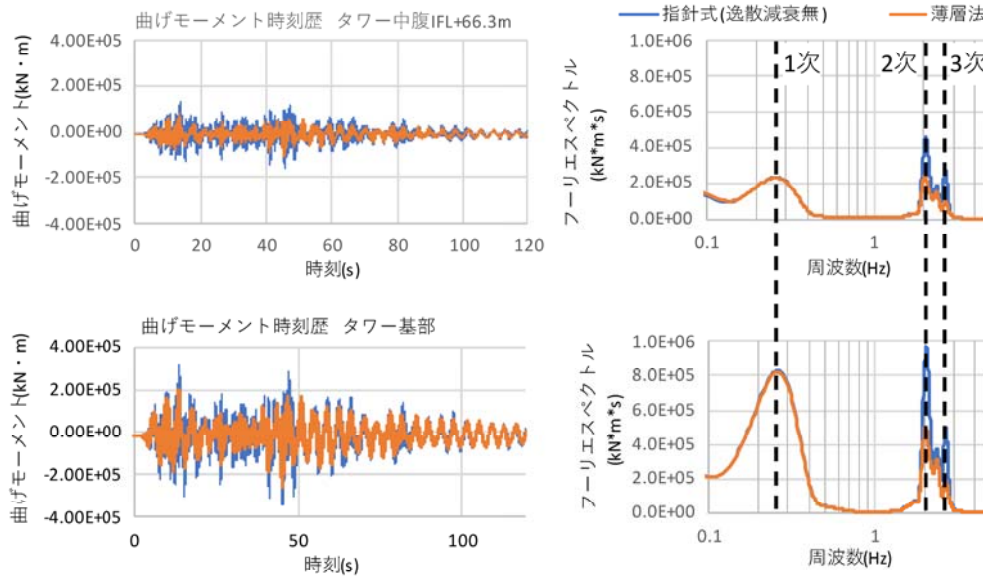


Fig.8 指針式逸散減衰なしと薄層法のタワー曲げモーメントの時刻歴とフーリエスペクトルの比較

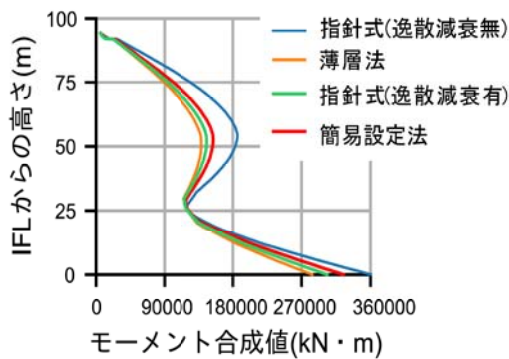


Fig.9 タワー最大曲げモーメントの鉛直分布

とほぼ同じ応答を示しており、2次モード、3次モードについては薄層法の方が小さい応答を示した。これは、先述の通り、トラス効果によって1次モードにおいて杭の水平変位がほとんど発生せず、モード変位として軸方向変位が支配的であるためである。

Fig.9に指針式逸散減衰ありと簡易設定法の結果を加えたタワー最大曲げモーメントの鉛直分布を示す。図から分かるように、高次モード応答の低減により、指針式逸散減衰なしに比べ薄層法の応答は大きく低減している。また、簡易設定法では薄層法に近い結果が得られた。

6. おわりに

本研究では、逸散減衰による2次モード減衰の増分をレーリー減衰に加えることにより、2次モードのみ逸散減衰を考慮する簡易設定法を提案し、2次モードに起因する地震応答を低減できることを示した。また薄層法の適用により、高次モードに起因する地震応答を低減できる場合があることを示した。本簡易設定法はジ

ャケット基礎に限らず、モノパイル基礎にも適用可能である。なお、指針式逸散減衰ありをモノパイル基礎に適用する場合、1次モード減衰を逸散減衰により過大評価してしまう可能性があり、注意が必要である。

参考文献

- 1) 土木学会:風力発電設備支持物構造設計指針, 2010.
- 2) 吉岡健, 石尾将大, 正月俊行, 内山不二男, 石原孟:洋上風力発電ジャケット基礎の地震応答解析～その1 逸散減衰効果の検証～, JSCE 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会, I-329, 2022.
- 3) 倉本龍, 正月俊行, 内山不二男, 吉岡健, 石尾将大, 石原孟:洋上風力発電ジャケット基礎の地震応答解析～その2 薄層法の適用～, JSCE 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会, I-330, 2022.
- 4) T. Ishihara, L. Wang: A Study of Modal Damping for Offshore Wind Turbines Considering Soil Properties and Foundation Types, Wind Energy, Vol. 22, Issue 12, pp.1760-1778, 2019.
- 5) L. Wang, T. Ishihara, A study of the effects of foundation uplift on the seismic loading of wind turbine tower and shallow foundation using a new dynamic Winkler model, Engineering Structures, Vol. 219, pp.1-16, 2020.
- 6) 山本康之, 新田康男, 池田竜介, 河本悠歩, 石原孟:洋上風力発電モノパイル基礎の地震時の地盤減衰評価(その1:逸散減衰効果の検討), JSCE 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会, I-334, 2023.
- 7) 宮本裕司, 酒向裕司, 喜多村英司, 三浦賢治:非線形、液状化地盤における杭基礎の地震応答性状に関する研究, 建築学会構造系論文集 No.471, 1995.