

洋上風車モノパイル式基礎の三次元有効応力解析による地震時挙動評価に関する研究

井川 誠二¹・上田 恭平²・中原 知洋³・
三好 俊康⁴・白 可⁴

¹ 正会員 五洋建設株式会社(株) 土木部門 土木本部 土木設計部
(〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

E-mail: seiji.igawa@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

² 正会員 京都大学 防災研究所 地盤防災解析分野 (〒661-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³ 正会員 五洋建設株式会社(株) 土木部門 土木本部 土木設計部
(〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

⁴ 正会員 五洋建設株式会社(株) 土木部門 洋上風力事業本部 技術部
(〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

再生可能エネルギーの安定供給を通じて持続的な社会経済活動を構築するために、洋上風力発電の海洋開発が進められている。地震国である日本国内で開発を推進するためには、地震に対する安全性を確保しつつ、構造の合理化によるコスト削減等に資する、耐震設計手法の確立が望まれている。本研究では、大型水中振動台による模型振動実験を行い、モノパイル基礎と飽和砂地盤の動的相互作用を考慮した地震時挙動を確認し、3次元有効応力解析手法「解析コードFLIP ROSE 3D」による再現解析を行い、地震時評価手法としての適用性を確認した。解析の結果、FLIP 3Dで模型振動台実験のモノパイルの土中部及び気中部の曲げモーメント、杭頭の応答加速度及び応答変位を概ね再現しており地震時評価手法としての適用性を確認した。

Key Words : offshore wind turbine monopile foundation, seismic response analysis, underwater shaking table test

1. はじめに

現在、日本では数多くの洋上ウィンドファームが計画され、発電コスト削減や事業性確保のために、風車の大型化が進んでいる。しかし、風車大型化に伴い洋上風車の主要な基礎形式であるモノパイル（以下、MP）の断面は大きくなり、特に日本では地震荷重の影響によりMPが大型化する傾向にある。地震国である日本国内で開発を推進するためには、地震に対する安全性を確保しつつ、構造の合理化によるコスト削減等に資する、耐震設計手法の確立が望まれている。

MPの構造設計は、洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説¹⁾等を参照できる。風や波等の荷重に対しては、骨組解析やFEM解析等による構造解析を実施して、国際・国内基準により性能照査を実施することが説明されている。一方、地震荷重に対しては、実挙動を適切に評価できる解析による性能照査を行うこととされているが、具体的な構造解析及び照査手法は説明されていない。

MP式基礎の現状および本研究で対象とする地震応答

解析モデルを図-1に示す。現状の地震応答解析モデルを図-1(a)に示す。この現状解析モデルは、構造全体の振動特性を表現するために、基礎部、タワー、風車からなる全体モデルが使用される事例が多い。全体モデルでは構造物に作用する地震力と地盤の増幅特性を同時に考慮するために、1次元地盤応答解析で得られた地盤変位を解析モデルの地盤バネを介してMPに入力するのが一般である。しかしながら、現状の地震応答解析モデルでは、耐震設計手法として以下の課題を有すると考えられる。

1次元地盤応答解析には等価線形化手法が用いられ、その適用範囲（せん断ひずみ1%以下）を超える場合には、非線形モデルを用いた評価が必要となる。1次元地盤応答解析に基づく地盤バネは全時刻で一定値となり、地震中に時々刻々と変化する地盤剛性や履歴減衰、MPと地盤の動的相互作用を十分に評価できない。等価線形化手法では、地盤剛性に低減率を乗じて液状化の影響を考慮するが、液状化の影響を十分に評価できない等の課題である。

前述の課題の解決策として、有効応力解析手法の適用が考えられる。2次元液状化解析プログラム「FLIP

ROSE2D²⁾」(以下, FLIP2D) による解析モデルを図-1(b)に示す. 既往の研究においても, FLIP2DによるMPの地震応答解析手法に関する検討が進められている. 大矢³⁾により, 港湾施設の杭式構造物の耐震性能照査手法として用いられるFLIP2Dに組み込まれた杭-地盤相互作用ばね⁴⁾を用いた解析モデルを基に, 相互作用ばねを精緻にモデル化することで, 現状モデル(図-1(a))より断面力が小さくなり, より合理的な設計に繋がる可能性が示唆されている. なお, その他の有効応力解析手法を用いた, MP基礎の地震時挙動の数値解析に関する研究について調査を行ったが, サクシオンバケット基礎⁵⁾の論文はあるものの, MP基礎については確認できなかった.

FLIP2Dに組み込まれた杭-地盤相互作用ばねは, 2次元平面モデルにおいて, 杭間を地盤がすり抜ける3次元的な挙動を, 2次元FEM解析で考慮するためのモデルである. 地盤のみの2次元解析における地盤変形挙動に対して, 杭が自由度を有して追従する現象としてモデル化し, 杭と地盤の相互作用は, 杭と地盤を結合する地盤ばねの荷重-相対変位関係としてモデル化される. 杭と地盤からなる全体系解析を行うことなく, 杭位置の地盤の構成則に基づいたせん断応力-せん断ひずみ関係を基に, 地盤条件, 杭径および杭間隔に応じた補正を施して地盤ばね値を算定し, 地震中に時々刻々と変化する杭荷重-相対変位関係を評価する手法である. このためFLIP2Dによる解析では, 地盤の非線形性や液状化特性が杭の応答に及ぼす影響は考慮できるが, 杭が大口径化するMPでは杭が地盤中に占める体積が大きくなり, 杭の存在による地盤応答の抑制や, 杭本体の応答もさらに抑制される等の, 杭と地盤間の動的相互作用の効果を十分に評価できない可能性がある.

以上の背景から, 3次元液状化プログラム「FLIPROSE 3D⁶⁾」(以下, FLIP3D)を用いた, MPと地盤の3次元一体解析モデルの適用性と, その効果を確認することを目的とした研究を行った. FLIP3Dの解析モデルを図-1(c)に示す. この手法では, MPと地盤の動的相互作用は, 杭

に接する地盤要素の構成則と地震中の非線形性や液状化特性に直接的に関連付けた評価が可能となる. 地盤ばねを介した評価は不要となり, MP本体と地盤との動的相互作用の効果を精緻に評価できること, さらにMPと地盤要素間にはジョイント要素を配置することで, MPと地盤の滑りや剥離といった実現象をモデル化することで, MP構造の合理化に繋がる解析手法となることを期待した.

本研究では, 大型水中振動台による模型振動実験の実施で得た, MP基礎と飽和砂地盤の動的相互作用を考慮した地震時挙動を対象とした再現解析を行い, FLIP3DのMP式基礎の地震時評価手法としての適用性とその効果を確認した. 併せてFLIP2Dによる解析と比較を行い, FLIP3Dの有意性について定量的な考察を行った.

2. 水中振動台実験

(1) 実験概要

本研究で解析対象とした実験は, 直径 5.5m のテーブルを有する大型水中振動台を使用して実施し, 風車機種 10 MW 級で, MP は直径 8.5 m, 板厚 90 mm を想定した.

実験では表-1 に示す 1G 場の相似則⁷⁾によるモデルを使用し, 実験装置の制約上, 模型縮尺 $\lambda=28$ とした. MP の地中部は, 曲げ剛性 EI と地盤ばね反力とから算定される杭の特性値 β より $2.4/\beta$ の範囲をモデル化し, 下端の境界条件はピン結合とした. 模型地盤は, 東北珪砂 6 号を使用し, 水中落下法で相対密度を 80% とした. 実験の実施状況を図-2(a), 模型の断面図を図-2(b)に示す.

タワーおよび MP は, 三好ら⁸⁾の方法を参考にし, 曲げ剛性 EI の相似則にしたがって市販鋼管でモデル化した. 鋼管の直径が変化する箇所は, 接合鋼板を介して溶接により結合した. 風車は重量を再現するために, 鋼板の組合せでモデル化した.

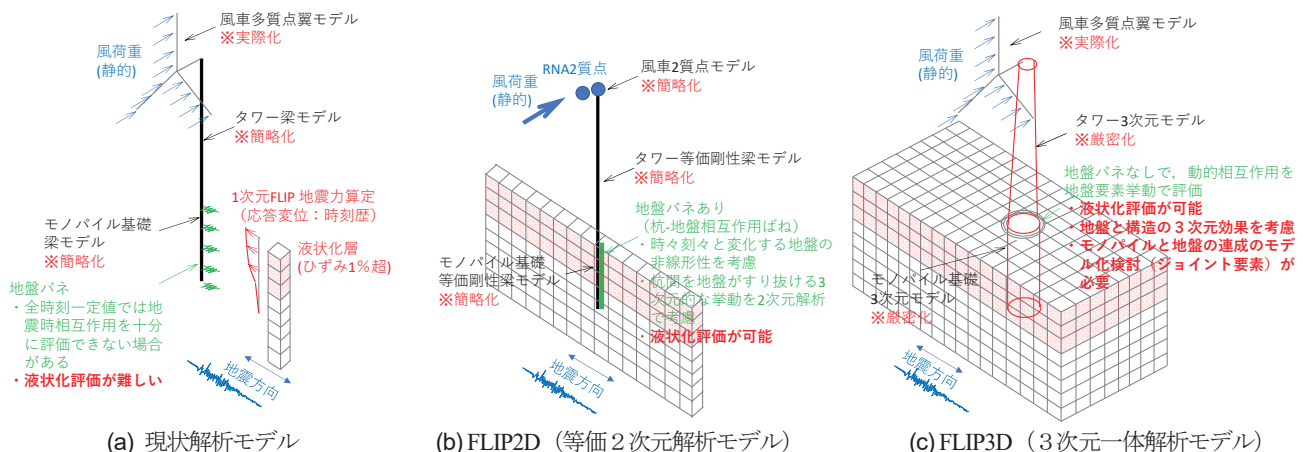


図-1 モノパイル式基礎の地震応答解析モデルの説明図

表-1 相似則⁷⁾

物理量	記号	実物/模型	縮尺
長さ	L	λ	28
時間	T	$\lambda^{0.75}$	12.17
ひずみ	ε	$\lambda^{0.5}$	5.29
質量	M	λ^3	21,952
曲げ剛性	EI	$\lambda^{4.5}$	3,252,454

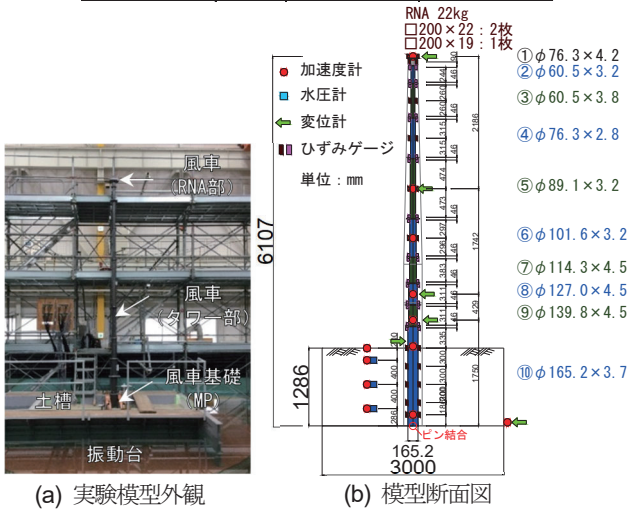


図-2 実験模型外観および断面図

(2) 加振条件

加振条件を表-2に示す。地盤および風車の固有振動数と地震時挙動の確認を行うため、パルス波加振、スイープ波加振および不規則波加振の順に実施した。不規則波加振に用いる地震動波形は、工学的基盤面における基準化加速度応答スペクトル(極めて稀に発生する地震動、地域別地震係数 $Z=1.0$)¹⁾を目標スペクトルとして、1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台での観測記録のNS成分位相を用いて作成した(図-3)。

表-2 加振ケース

No.	加振波	加振目的	加振条件
1	パルス波	地盤の固有振動数の把握	最大加速度 1.5m/s^2 5波
2	スイープ波	風車の固有振動数の把握	最大加速度 0.3m/s^2 振動数範囲 $0.7 \sim 70\text{Hz}$
3	不規則波	地震時挙動の確認	極稀告示スペクトル適合波1波 (地域別地震係数 $Z=1.0$) 図-3に時刻歴波形を記載

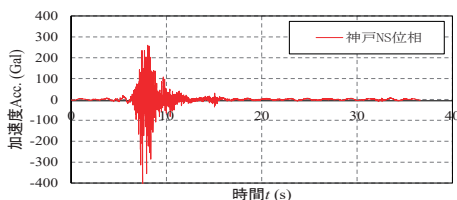


図-3 入力地震動

(3) 計測項目

模型断面図を図-2(b)に示す。主な計測項目は振動台テーブルおよび風車模型の各位置における加速度、変位、ひずみである。また、地中部の加速度および過剰間隙水圧についても計測を行った。実験では水圧の上昇を確認したものの、液状化が発生しなかったことを確認した。

3. 解析モデル

(1) 解析概要

解析モデルは、実験模型を模擬して、タワー、MPおよび地盤で構成した。解析モデルに用いた要素を表-3に示す。FLIP3Dの解析モデルを図-4(a)、FLIP2Dの解析モデルを図-4(b)に示す。

表-3 解析に用いた要素

	FLIP3D	FLIP2D
地盤	マルチスプリング	
構造物	風車(タワー)	線形はり
	風車(MP)	線形はり(魚骨モデル)
構造物と地盤の境界	ジョイント	杭-地盤相互作用ばね

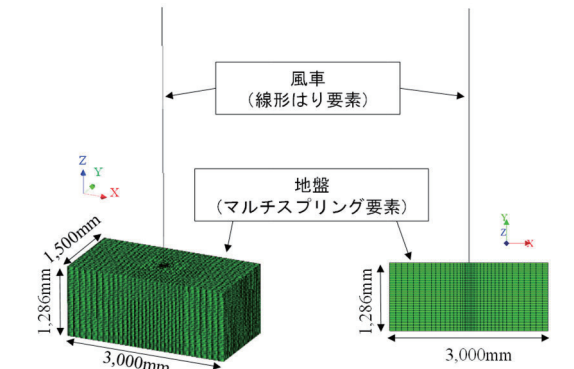


図-4 解析モデル

(2) 構成モデル

FLIP2Dの地盤の構成則は、2次元多重せん断モデル²⁾に基づき与えられる。その積分形構成式は式(1)~(5)で示される。FLIP3Dの構成則は、2次元多重せん断モデルを3次元に拡張したモデル⁹⁾を使用する。

$$\bar{\sigma}' = -\bar{p}\bar{\mathbf{n}}^{(0)} + \sum_{i=1}^I \bar{q}^{(i)}\bar{\mathbf{n}}^{(i)}\Delta\omega \quad (1)$$

ここに、

$$\bar{\mathbf{n}}^{(0)T} = (1 \quad 1 \quad 0) \quad (2)$$

$$\bar{\mathbf{n}}^{(i)T} = (\cos\omega_i \quad -\cos\omega_i \quad \sin\omega_i) \quad (\text{for } i = 1, \dots, I) \quad (3)$$

$$\omega_i = (i-1)\Delta\omega \quad (4)$$

$$\Delta\omega = \pi/I \quad (5)$$

ω_i は、各仮想単純せん断面($I = 1 \sim I$)の方向、 $\Delta\omega$ はモデル化した仮想単純せん断面の間隔、 $\bar{p}$ 、 $\bar{q}^{(i)}$ はそれぞれ応力の平均成分と偏差成分(仮想単純せん断応力)である。

多重せん断ばねモデル¹⁰⁾は図-5のように図示される。水平方向性のばねは、軸差応力 $(\sigma_x - \sigma_y)/2$ と軸差ひずみ $(\varepsilon_x - \varepsilon_y)$ の関係である軸差せん断を評価し、鉛直方向のばねは、せん断応力 τ_{xy} とせん断ひずみ γ_{xy} の関係である単純せん断を評価する。任意方向にばねを配置して、単純せん断や軸差せん断に寄与する割合を考慮して、地震時に変化するせん断方向を考慮して、土全体の挙動を表現するモデルである。

2次元モデルのせん断面は、奥行き方向に向いた軸の周りを回転するように定義される。3次元モデルのせん断面は、3次的に種々の方向に向いた軸の周りを回転するように定義される。

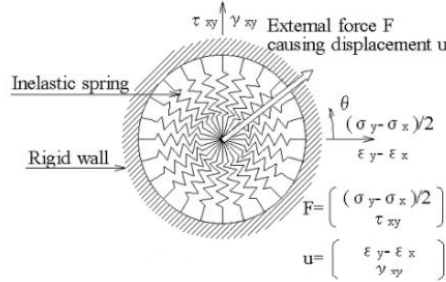


図-5 多重せん断ばねモデル¹⁰⁾

(3) 解析用物性値

a) 地盤

マルチスプリング要素の解析用物性値を表-4に示す。土質試験結果およびパルス波の実験結果から解析用物性値を算定した。また、実験では液化化は発生しないため、液化化パラメータは使用しない。

表-4 マルチスプリング要素解析用物性値

項目	記号	単位	数値	備考
飽和密度	ρ_{sat}	t/m^3	2.03	土粒子の密度と間隙比から算出
間隙率	n		0.375	土の繰返し非排水三軸試験から算出
基準平均有効応力	σ'_{ma}	kN/m^2	4.34	土層中央における平均有効応力 FLIP2Dの場合は、 $4.88kN/m^2$ を設定
初期せん断剛性	G_{ma}	kN/m^2	14,300	パルス波の加速度時刻歴からせん断波速度 V_s を算出、 $G=\rho V_s^2$ で設定
体積弾性係数	K_{ma}	kN/m^2	37,400	$K_{ma}=(2(1+\nu))/(3(1-2\nu))G_{ma}$ で設定
拘束圧依存性パラメータ	m_G, m_K		0.5	一般値を使用
ポアソン比	ν		0.33	一般値を使用
粘着力	c	kN/m^2	0	
せん断抵抗角	ϕ	$^\circ$	40.3	土の三軸圧縮試験 (CD) から設定
減衰定数の上限値	h_{max}		0.4	中空ねじり変形試験の減衰定数 h のひずみ依存性にフィッティング

b) 構造物

FLIP3Dでは風車のタワー部は鉛直方向の線形はり要素でモデル化する。MP部は、応答値算定用の梁要素（鉛直方向の線形はり要素）とMPと地盤の相互作用を評価するための仮想梁要素（水平方向に放射状に設けた剛はり要素）でモデル化し、応答値算定用の梁要素に物性値を与えた（以下、魚骨モデル）。FLIP2Dでは鉛直方向の線形はり要素のみでモデル化し、物性値を与えた。

c) 構造物と地盤の境界

FLIP3Dではジョイント要素を用いた、はり要素の垂直方向の圧縮力は作用、引張力は作用しない設定として剥離を考慮した。はり要素に平行な方向の降伏せん断強度を考慮するために、粘着力 $c_f=0kN/m^2$ 、摩擦角 $\phi_f=15^\circ$ を設定して、降伏せん断強度以上になる場合には滑るように摩擦を考慮した。なお、法線方向および接線方向の剛性は $1.0 \times 10^6 kN/m^2$ の一般値を用いた。

FLIP2Dでは杭-地盤相互作用ばね要素を用いた。加振直交方向の地盤奥行き $1,500mm$ を杭間隔とし、MP基礎の直径 $165.2mm$ から杭間隔比を算定し、地盤のすり抜けを考慮した。はり要素の平行な方向はFLIP3Dのジョイント要素と同じ設定をして、摩擦を考慮した。

(4) 境界条件

解析モデルの境界条件は、実験模型を模擬して、地盤の側面は水平方向を拘束し、底面は全固定とした。またMP下端の境界条件はピン結合とした。

(5) 入力地震動

入力地震動は、振動台テーブルで計測した加速度時刻歴の主要動を対象とした（図-6）。

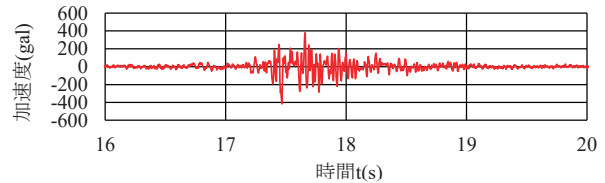


図-6 解析用入力地震動（実験計測値）

(6) 解析条件

解析の時間間隔は、入力地震動と同じ $0.002s$ とした。レーリー減衰は、質量比例係数を 0 とし、剛性比例係数は固有値解析により算出した模型地盤の一次固有振動数 $16Hz$ における減衰定数を 1% として 0.00019 と設定した。

4. 実験と解析の比較

(1) 固有値解析

模型実験でのスイープ波加振時におけるタワートップとテーブルの加速度時刻歴から算出した加速度応答倍率とFLIP3DとFLIP2Dによる固有値解析を図-7に示す。FLIP3Dの固有値解析は、1次の固有振動数を再現し、2次および3次の固有振動数を概ね再現する。FLIP2Dの固有値解析は、1次の固有振動数を再現するものの、2次および3次の固有振動数はFLIP3Dより乖離する結果となった。

FLIP3DおよびFLIP2DのMPと地盤の固有振動モードを図-8、図-9に示す。MPのみの固有振動モードの形状を比較するために、最大変位を 1 とした固有振動モードを図-10に示す。1次の固有振動モードは、MPの振動モードが支配的となるため、地盤のモデル化の影響に拠らず、FLIP3DおよびFLIP2Dで模型実験の振動特性を再現できたと考えられる。その一方で、2次および3次と高次モードになるに従い、MPの土中部の振動モードが顕著となるため、MPと地盤の相互作用のモデル化に応じて、再現性が異なる結果となった。FLIP3Dを用いたMPと地盤の一体解析モデルを用いた固有値解析では、図-8(c)に示すとおり、MPと地盤の相互作用により地盤の変位量が大きいことを示す赤色の領域が1次、2次、3次モードの順で、MPを中心として周囲に影響範囲が拡大する。FLIP2Dによる相互作用ばねモデルを用いた固有値解析では、図-9(b)において、3次モードではMP位置の地盤

のみならず周囲の地盤も不自然な形状を示している。

以上のことより, FLIP3D を用いた MP と地盤の一体解析モデルを用いた固有値解析で, 模型実験断面の固有振動数ならびに固有振動モードが FLIP2D と比較して再現性が高いことを確認した。

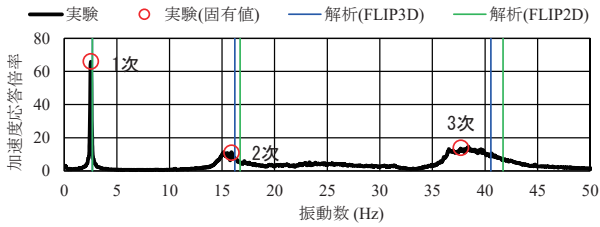


図-7 構造物の振動特性

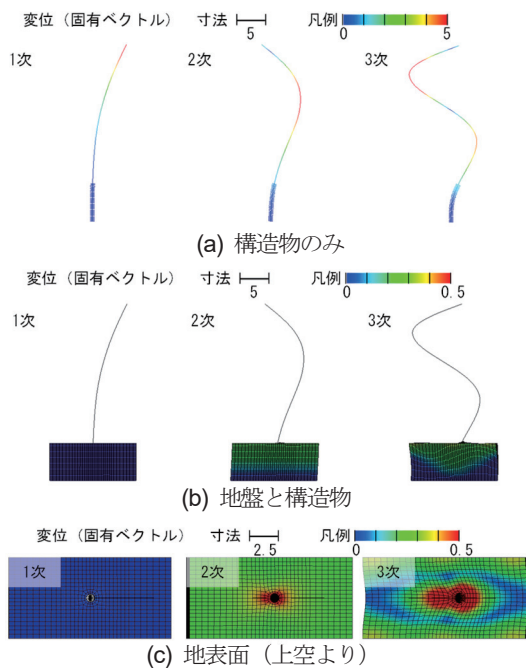


図-8 FLIP3D による構造物の固有振動モード

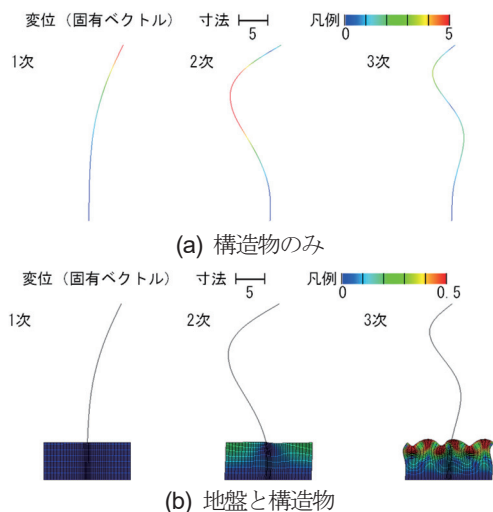


図-9 FLIP2D による構造物の固有振動モード

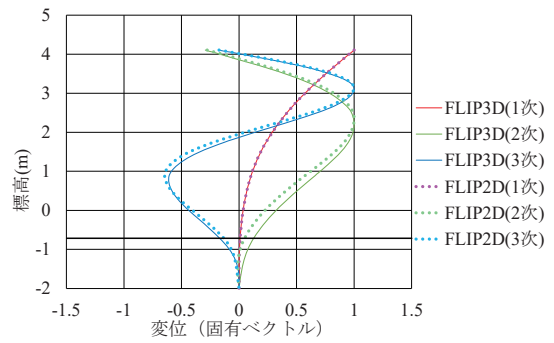


図-10 固有振動モード比較

(2) MP 構造物の応答比較

MP の最大曲げモーメントは図-11 に示すように, FLIP3D の解析結果は, 実験結果を概ね再現する結果となった. タワートップの水平加速度は図-12(a)(b)に示すように, FLIP3D の解析結果は, 実験結果を概ね再現する結果となった. タワートップの水平変位は図-12(c)に示すように, FLIP3D の解析結果は, 主要動部では実験結果を概ね再現した. 17.5 秒~18.0 秒の水平変位の最大振幅の実験結果と FLIP3D の差は 10%程度である. 最大水平変位量は模型スケールで 6mm であり, 実物換算で 889mm になり, 加振によるタワーの勾配は 0.5%となる. 一方, 主要動部以降では実験結果と FLIP3D の解析結果に差異が認められる. 今後, 解析モデルの信頼性を高めるために, MP の構造減衰, 地盤の履歴減衰, 自由振動モードを含めた減衰の与え方の検討を行う必要がある。

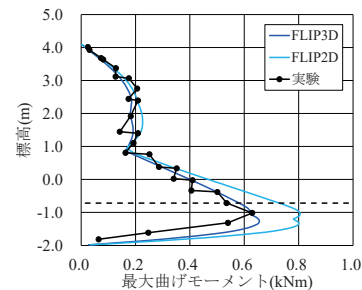


図-11 最大曲げモーメント

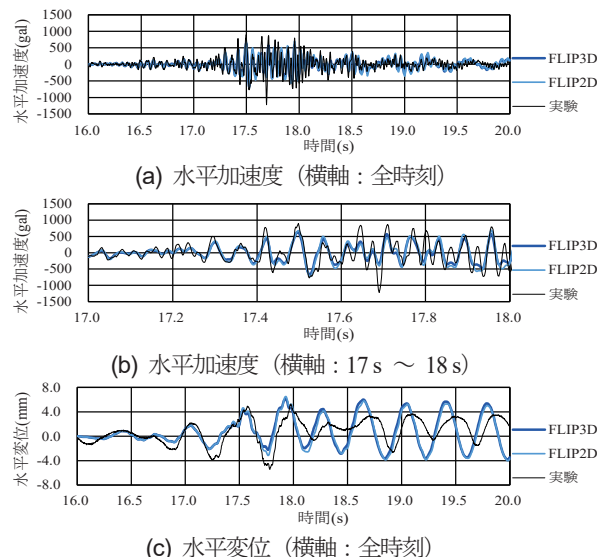


図-12 タワートップの応答加速度および応答変位

(3) FLIP3D と FLIP2D の比較

模型実験の MP の最大曲げモーメントは、FLIP3D では概ね再現したが、FLIP2D では模型実験および FLIP3D より約 3 割大きく評価する結果となった。その要因を以下に考察する。

FLIP3D および FLIP2D の最大曲げモーメント発生時刻の曲げモーメントの応答値を図-13(a)に示す。土中部での差異が大きく、気中部はほぼ同等である。最大曲げモーメント発生時刻の MP に作用するせん断力の応答値を図-13(b)に示す。曲げモーメントが最大となる地表面下 1.2m 付近のせん断力は、FLIP3D および FLIP2D とともにゼロとなるが、その深度を中心とした正のせん断力、負のせん断力ともに FLIP3D の方が FLIP2D より低減することが、曲げモーメントが小さくなる要因である。

せん断力は、MP と地盤の相互作用を通して MP に作用する水平力と等価と見做すことができる。FLIP3D では MP と接する地盤要素の構成則と地震中の非線形性による直接的な相互作用力、FLIP2D では MP と結合する地盤ばねの荷重-相対変位関係による相互作用力に起因して水平力が考慮される。

MP と地盤の相対変位の関係を図-13(c)に示す。FLIP3D では、MP 梁要素と接する地盤要素との相対変位はほとんど発生せず、MP 梁要素と地盤要素の節点は同じ挙動を示す。一方、FLIP2D では相互作用ばね要素を用いているため、MP 梁要素と相互作用ばねの相対変位の基準点となる地盤要素の節点との間に相対変位差が生じ、地表面に近づくほど相対変位差が大きくなる。

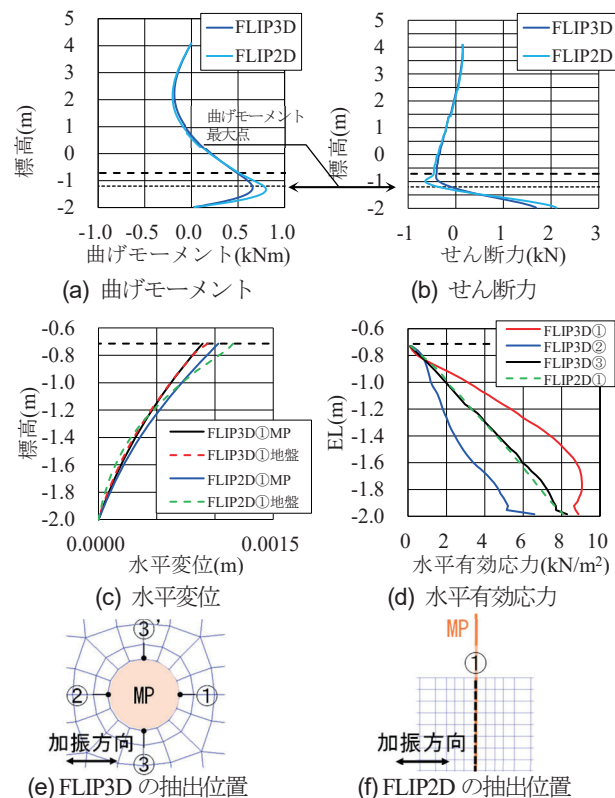


図-13 最大曲げモーメント発生時刻の応答値

MP と地盤の水平有効応力の関係を図-13(d)に示す。

FLIP3D では、加振方向では MP により地盤が圧縮される要素 (図中 FLIP3D①) では受働土圧状態となり水平有効応力が增大し、MP が地盤から遠ざかる要素 (図中 FLIP3D②) では主働土圧状態となり水平有効応力が減少する。また、FLIP3D での MP 奥行方向での中心位置の節点 (図中 FLIP3D③) は、FLIP2D の相互作用ばねの変位基準点 (図中 FLIP2D①) に相当し、FLIP3D③と FLIP2D①の水平有効応力は等しい。FLIP3D では、加振方向の MP と地盤要素間に、杭の地盤への影響を考慮した水平有効応力が発生し、加振直角方向の MP と地盤要素間では、FLIP2D と同様に杭の地盤への影響が軽微な地盤挙動のみによる水平有効応力が解析で評価されていると考えられる。以上のことから、FLIP3D では地盤の杭への影響に加えて、杭の地盤に対する影響を考慮した、地盤と MP の相互作用を直接的に考慮することができるため、FLIP2D より精緻な解析が可能となり、MP に作用する水平有効応力が抑制されたことにより、せん断力が低減し、曲げモーメントが低下したと考えられる。

5. まとめ

本研究では、10MW 級風車を対象にした水中振動台実験の結果を FLIP3D による再現解析による検討を通して、地震時評価手法としての適用性を検討した。

水中振動台実験の結果と比較すると、FLIP3D 解析による曲げモーメント最大値は概ね一致しているが、FLIP2D 解析は約 3 割過大評価していることから、FLIP3D 解析の適用により、MP 式基礎の地震時挙動を適切に評価できる可能性を確認した。

今後は液状化地盤を対象として適用性を確認する予定である。

謝辞：本検討を行うにあたり、貴重な意見を賜りました関係各位に謝意を表します。

REFERENCES

- 1) 洋上風力発電施設検討委員会：洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説 (令和 2 年 3 月版), pp. 154-158, 2020. [Offshore Wind Power Generation Facilities Review Committee: *Unified Explanation of Technical Standards for Offshore Wind Power Generation Facilities (March 2020 edition)*, pp. 154-158, 2020]
- 2) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, 32(2), pp.1-15, 1992.
- 3) 大矢陽介：液状化地盤におけるモノパイル式洋上風力発電設備を対象とした風と地震の連成解析の基礎検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.78, No.2, 1-895-

- 1_900, 2022. [Ohya, Y.: Fundamental study of coupled wind and seismic analysis for monopile supported offshore wind turbine in liquefied ground, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Series B3 (Ocean Engineering)*, Vol.78, No.2, I-895-I_900, 2022.]
- 4) 小堤治, 溜幸生, 岡由剛, 井合進, 梅木康之: 2次元有効応力解析における杭と液状化地盤の動的相互作用のモデル化, 第58回土木学会年次学術講演会梗概集, 第三部門, pp.569-570, 2003. [Ozutsumi, O., Tamari, Y., Oaka, Y., Iai, S. and Umeki, Y.: Modeling of Dynamic Interaction between Pile and Liquefied Soil in Two-Dimensional Effective Stress Analysis, *Proc. 58th JSCE Annual Conference*, Division III, pp. 569-570, 2003, pp.569-570, 2003.]
- 5) Ueda, K., Uzuoka, R., Iai, S. and Okamura, T.: Centrifuge model tests and effective stress analyses of offshore wind turbine systems with a suction bucket foundation subject to seismic load, *Soils and Foundations*, 60(6), pp.1546-1569, 2020.
- 6) Iai, S. and Ozutsumi, O.: Yield and cyclic behaviour of a strain space multiple mechanism model for granular materials, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 29, pp. 417-442, 2005.
- 7) Iai, S.: Similitude for shaking table tests on soil-fluid model in 1g gravitational field, *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol.27, No.3, 1999.
- 8) 三好俊康, 熊谷隆宏, 清宮理, 松本正一郎: 重力式支持構造物を有する洋上風力発電タワーの動的安全性評価方法に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.75, No.4, I_10-I_24, 2019. [Miyoshi, T., Kumagai, T., Kiyomiya, O. and Matsumoto, S.: Experimental study on overturning stability for offshore wind-power generation tower with gravity-type platform under seismic load, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.75, No.4, I_10-I_24, 2019.]
- 9) Iai, S.: Three dimensional formulation and objectivity of a strain space multiple mechanism model for sand, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.1, pp.192-199, 1993.
- 10) Towhata, I. and Ishihara, K.: Modelling Soil Behavior under Principal Stress Axes Rotation, *Proc. of 5th International Conf. on Num. Methods in Geomechanics*, Nagoya, Vol.1, pp.523-530, 1985.

(Received February 6, 2024)

(Accepted May 13, 2024)

STUDY ON SEISMIC BEHAVIOR EVALUATION OF OFFSHORE WIND TURBINE MONOPILE FOUNDATIONS BY THREE-DIMENSIONAL EFFECTIVE STRESS ANALYSIS

Seiji IGAWA, Kyohei UEDA, Tomohiro NAKAHARA,
Toshiyasu MIYOSHI, Ke BAI

To construct sustainable socio-economic activities through the stable supply of renewable energy, ocean development for offshore wind power generation is being advanced. In Japan, a country prone to earthquakes, there is a need for the development of seismic design methods that not only ensure safety against earthquakes but also contribute to cost reduction through structural rationalization. This research conducted model vibration experiments using a large underwater shaking table to verify the seismic behavior considering the dynamic interaction between monopile foundations and saturated sandy soils, and performed reproduction analysis with the three-dimensional effective stress analysis method "analysis code FLIP ROSE 3D" to assess its applicability as a seismic evaluation method. The analysis results largely replicated the bending moments in the submerged and emerged parts of the monopile from the model shaking table experiments, as well as the response acceleration and displacement at the pile head, thereby confirming its applicability as a seismic evaluation method.