土木学会論文集, Vol. 81, No. 18, 25-18063, 2025.

# 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液状化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]

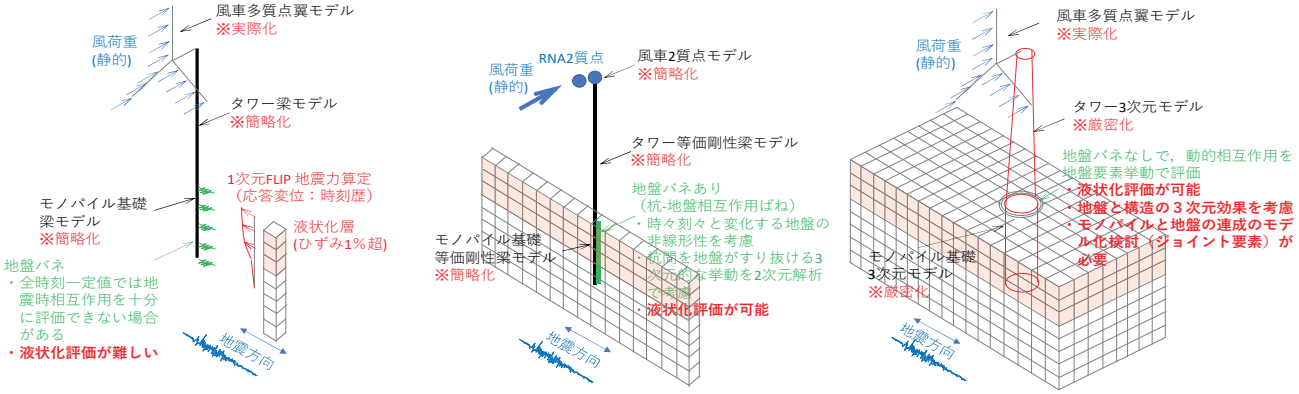
[1] 正会員　五洋建設（株）土木部門　土木本部　土木設計部
（〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8）
E-mail: seiji.igawa@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)
[2] 正会員　京都大学　防災研究所　地盤防災解析分野（〒661-0011 京都府宇治市五ケ庄）
[3] 正会員　五洋建設（株）土木部門　土木本部　土木設計部
（〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8）
[4] 正会員　五洋建設（株）土木部門　洋上風力事業本部　技術部
（〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8）

本研究では，10MW 級洋上風車を対象とした大型水中振動台による模型振動実験を行い，モノパイル式基礎（MP）と液状化地盤と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「FLIP ROSE 3D（FLIP3D）」による再現解析を行った．FLIP3D によって，固有振動数や加振実験の応答値が概ね再現され，地震時評価手法としての適用性を確認した．液状化する地盤では，一般的な梁ばね構造解析モデルでは実験値を過大に評価したが，FLIP3D によって，MP の最大曲げモーメントの実験値が概ね再現され，液状化時の解析精度が高まり MP 構造諸元を適正に設定できる可能性が示された．また，実験では表層地盤の液状化により MP の応答値が低減すること，MP に対する地盤の液状化による影響は限定的となることが確認され，FLIP3D による再現解析によって，実験と同様の傾向を確認した．

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

## 1.　はじめに

地震が多発する日本国内で洋上ウィンドファーム開発を推進するために，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．洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説[1]等によればMPの構造設計では，風や波等の荷重に対しては，骨組解析やFEM解析等による設計を実施して，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の特徴と課題を**図-1**[2]に示す.




(a) 現状解析モデル　(b) FLIP2D（等価２次元解析モデル）　(c) FLIP3D（３次元一体解析モデル）

**図-1**　モノパイル式基礎の地震応答解析モデルの説明図[2]

現状の地震応答解析モデル（以下，現状解析モデル）は，構造全体の振動特性を再現するために，基礎部，タワー，RNA（風車）からなる全体系をモデル化する事例が多い（**図-1(a)**参照）．現状解析モデルでは，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構造解析モデルの地盤バネに入力するのが一般である．また，１次元地盤応答解析では等価線形化手法を基本とするが，その適用範囲（地盤ひずみ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．ただし，地盤バネは全時刻で一定値とするため，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ず，液状化の影響は地盤剛性に低減率を乗じる方法が多く用いられるが，液状化の影響を十分に評価できない等の課題を有する．

現状解析モデルの課題解決策として，有効応力解析の適用が考えられる．2次元液状化解析プログラム「FLIP ROSE 2D[3]」（以下，FLIP2D）の解析モデルを**図-1(b)**に示す．

FLIP2Dに組み込まれた杭−地盤相互作用ばね[4]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，港湾構造物の桟橋などの適用事例がある．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ー相対変位関係としてモデル化される． しかしながら，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．

そこで，FLIP2Dの課題の解決策として，３次元液状化プログラム「FLIP ROSE 3D[5]」（以下，FLIP3D）の適用が考えられる．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．また，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が期待できる．

本研究では，表層地盤の液状化なし・ありの条件で模型振動実験を行い，MP式基礎の地震時挙動を確認した．また，実験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，現状解析モデルとFLIP2Dによる解析と比較し，FLIP3Dの有意性について考察を行った．

## 2. 水中振動台実験

### (1) 実験概要

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た．実験用模型は風車機種 10 MW 級で，MP は直径 8.5 m，板厚 90 mm を想定した．

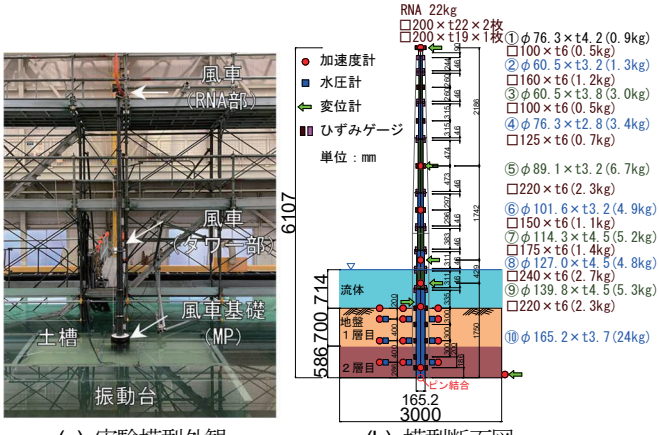
**表-1** に示す 1G 場の相似則[6]による模型を使用し，模型縮尺 $\lambda$=28 とした．MP の地中部は，曲げ剛性 EI と地盤ばね反力とから算定される杭の特性値 $\beta$ より $2.4/\beta$ の範囲をモデル化し，下端の境界条件はピン結合とした．模型地盤は，東北珪砂 6 号を使用し，水中落下法で相対密度 $D_r$=60 %の液状化地盤，$D_r$=80 %の非液状化地盤を作製した．実験模型を**図-2(a)**，断面図を**図-2(b)**に示す．

CsA（液状化なし）では，地盤 1 層目，2 層目ともに非液状化地盤とした．CsB（液状化あり）では，地盤 1 層目を液状化地盤，地盤 2 層目を非液状化地盤とした．

タワーおよび MP は，三好ら[7]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．風車は鋼板を用い重量を再現した．

**表-1** 相似則[6]

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




(a) 実験模型外観　　(b) 模型断面図

**図-2** 実験模型外観および断面図

### (2) 加振条件

実験では，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（**表-2** 参照）．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$^2$<br>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$^2$<br>振動数範囲0.7～70Hz |
| 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<br>（地域別地震係数Z=1.0）<br>**図-3**に時刻歴波形を記載 |

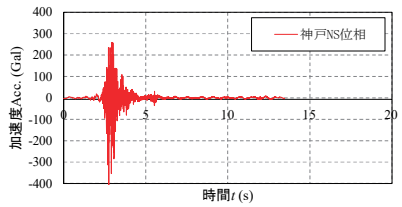



**図-3**　入力地震動（神戸 NS 成分位相波，模型スケール）

### (3)　計測項目

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．

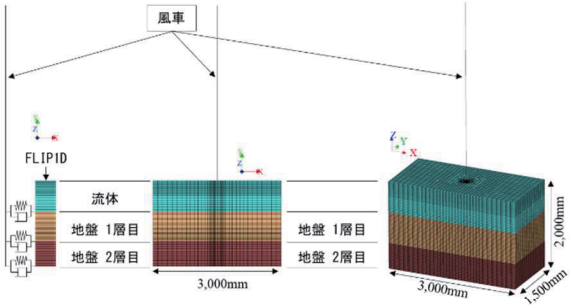
## 3.　解析モデル

### (1)　解析概要

解析モデルは，実験模型を模擬し，RNA，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．現状解析モデルを**図-4(a)**，FLIP2D の解析モデルを**図-4(b)**，FLIP3D の解析モデルを**図-4(c)**に示す．

**表-3**　解析モデルに用いた要素

| | | 現状解析モデル（FLIP1D） | FLIP2D | FLIP3D |
|---|---|---|---|---|
| 地盤 | | マルチスプリング | | |
| 流体 | | 流体 | | |
| 構造物 | 風車（タワー） | 線形はり | 線形はり | |
| | 基礎（MP） | 線形はり | 線形はり | 線形はり（魚骨ﾓﾃﾞﾙ） |
| 構造物と地盤の境界 | | 線形ばね<br>ダッシュポット | 杭-地盤相互作用ばね | ジョイント |
| 構造物と流体の境界 | | 節点集中質量 | 節点集中質量 | 流体-構造連成面 |




(a) 現状解析モデル　　(b) FLIP2D　　(c) FLIP3D

**図-4**　解析モデル

現状解析モデルでは，タワーと MP を線形はり要素でモデル化した．地盤は，土木学会指針 [8]の地盤ばね値で与え，線形ばねとダッシュポットを組み合わせてモデルした．解析プログラムは TDAPⅢを使用した．

### (2)　FLIP3D および FLIP2D の構成モデル

FLIP2D の地盤の構成則は，2 次元多重せん断モデル [3]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．FLIP 3D 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．

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

ここに，

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

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

$$\omega_i = (i-1)\Delta\omega \tag{4}$$

$$\Delta\omega = \pi/I \tag{5}$$

$\omega_i$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，$\tilde{p}$，$\tilde{q}^{(i)}$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]を**図-5** に示す．水平方向ばねは，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，鉛直方向ばねは，せん断応力$\tau_{xy}$とせん断ひずみ$\gamma_{xy}$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．

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 次元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．

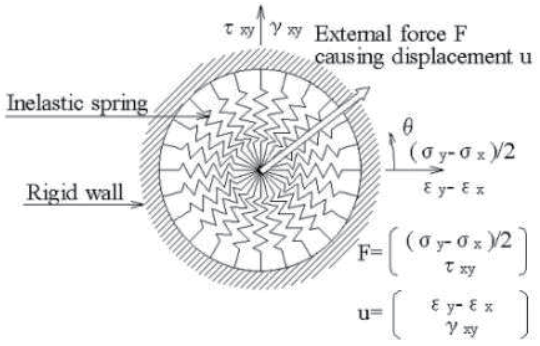



**図-5**　多重せん断ばねモデル [10]

### (3)　解析用物性値

#### a)　地盤

実験 CsA および CsB を対象とした解析用物性値については，土質試験結果およびパルス波加振実験結果より設定した．なお，実験 CsB の地盤 1 層目は液状化するため，液状化パラメータを設定した．地盤のモデル化に用いたマルチスプリング要素の解析用物性値を**表-4** に，液状化抵抗曲線を**図-6** に示す．

表-4　マルチスプリング要素解析用物性値

| 分類 | 項目 | 記号 | 単位 | CsA | CsB | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 地盤 1層目<br>地盤 2層目 | 地盤 1層目 | 地盤 2層目 |
| | | | | $D_r$=80% | $D_r$=60% | $D_r$=80% |
| 物理特性 | 飽和密度 | $\rho_{sat}$ | t/m$^3$ | 2.03 | 1.98 | 2.03 |
| | 間隙率 | $n$ | | 0.375 | 0.405 | 0.375 |
| 動的変形特性 | 基準平均有効応力 | $\sigma'_{ma}$ | kN/m$^2$ | 4.34<br>(4.89) | 2.25<br>(2.53) | 6.48<br>(7.29) |
| | 初期せん断剛性 | $G_{ma}$ | kN/m$^2$ | 14,300 | 7,600 | 34,400 |
| | 体積弾性係数 | $K_{ma}$ | kN/m$^2$ | 37,400 | 19,900 | 89,600 |
| | 拘束圧依存性パラメータ | $m_G$ | | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| | ポアソン比 | $\nu$ | | 0.33 | 0.33 | 0.33 |
| | 粘着力 | $c$ | kN/m$^2$ | 0 | 0 | 0 |
| | せん断抵抗角 | $\phi$ | ° | 40.3 | 37.4 | 40.3 |
| | 減衰定数の上限値 | $h_{max}$ | | 0.40 | 0.45 | 0.32 |
| 液状化特性 | 変相角 | $\phi'_p$ | ° | | 28 | |
| | 全体を規定するﾊﾟﾗﾒｰﾀ | $w_1$ | | | 3.4 | |
| | 前半を規定するﾊﾟﾗﾒｰﾀ | $p_1$ | | | 0.5 | |
| | 後半を規定するﾊﾟﾗﾒｰﾀ | $p_2$ | | | 1.139 | |
| | 下限値を規定するﾊﾟﾗﾒｰﾀ | $c_1$ | | | 2.2 | |
| | 終局状態を規定するﾊﾟﾗﾒｰﾀ | $S_1$ | | | 0.005 | |

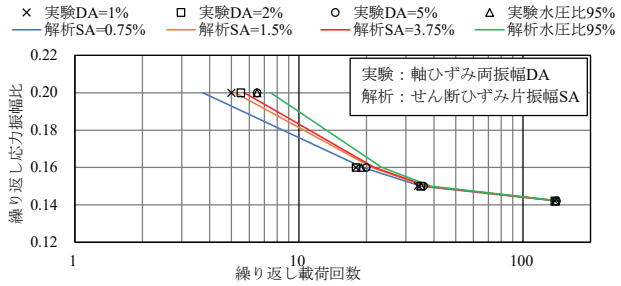



図-6　液状化抵抗曲線（CsB 地盤 1 層目）

b)　流体

FLIP3DおよびFLIP2Dともに非圧縮性流体の流体要素でモデル化する．流体の質量密度$\rho$=1.0 t/m$^3$とした．

c)　構造物

FLIP3D では風車のタワー部は線形はり要素のみでモデル化した．MP 部は，応答値算定用の線形はり要素と 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 では物性値を付与した線形はり要素のみでモデル化した．

d)　構造物と地盤のインターフェイス

FLIP3D ではジョイント要素を用い，はり要素の垂直方向の圧縮力を伝達し，引張力は伝達しない設定として剥離を考慮した．また，はり要素平行方向の摩擦については，粘着力$c_f$=0 kN/m$^2$，摩擦角$\phi_f$=15°を設定して摩擦を考慮した．なお，ジョイント要素法線方向および接線方向の剛性は1.0×10$^6$ kN/m$^2$の一般値を用いた．

FLIP2D では杭ー地盤相互作用ばね要素を用いて，地盤のすり抜けを考慮した．模型地盤奥行 1,500 mm を杭間隔とし，MP の直径 165.2 mm から杭間隔比を算定し，相互作用ばね値を設定した．

e)　構造物と流体の境界

FLIP3D では流体ー構造連成面要素を用いた．FLIP2D では円筒構造物に作用する動水圧を考慮するために，後藤・土岐の式[11]で算出した動水圧分布から節点集中質量を設定した．

(4)　解析条件

解析の時間間隔は，入力地震動と同じΔt=0.001 s とした．レーリー減衰は，質量比例係数を$\alpha$=0 とし，剛性比例係数$\beta$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と減衰定数 1 %を用いて設定した．CsA は一次固有振動数 19 Hz から$\beta$=0.00017 を，CsB では一次固有振動数 21 Hz から$\beta$=0.00015 を設定した．

解析での入力地震動は，振動台テーブルで計測した加速度時刻歴の主要動を用いた．

## 4.　実験再現解析による FLIP3D 適用性検討

(1)　固有振動モードと固有値解析

MP の地震時挙動は，タワートップの振動が卓越する 1 次振動モードに加えて，土中部の振動が卓越する 2 次や 3 次の高次振動モードの影響が大きいことが特徴となる．この特徴的な振動モードを解析で再現できることが地震時評価手法として必要な条件となることから，各解析手法で固有値解析を行い，FLIP3D の適用性を確認した．

スイープ波加振時におけるタワートップ，標高 2m，標高 1m, 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固有振動数を，各解析手法の固有値解析結果とともに**図-7** に示す．また，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-8** に示す．

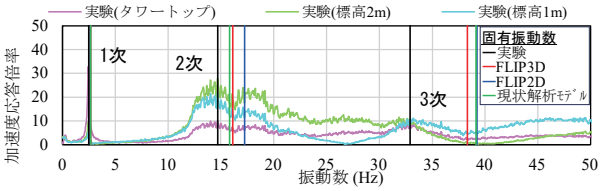



図-7　構造物の振動特性（CsB）

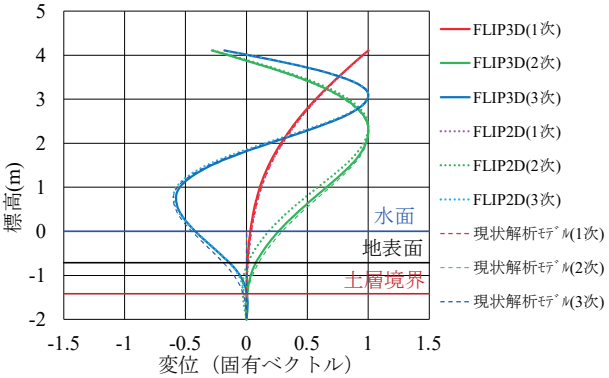
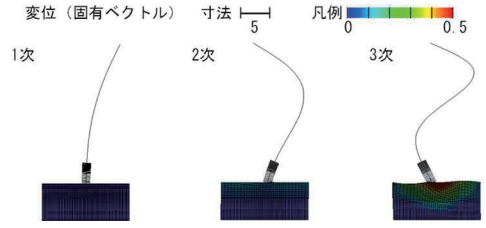


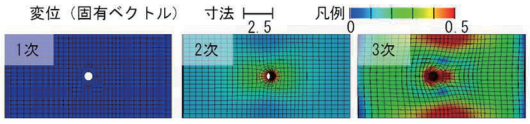

図-8　固有振動モード比較（CsB）

**図-7** より，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，FLIP2D および現状解析モデルで模型実験の振動特性を再現している．

2 次モードに対しては，現状解析モデルと FLIP3D が FLIP2D より実験値に近い値となり，3 次モードに対しては FLIP3D が現状解析モデルと FLIP2D より実験値に近い値となった．解析では地盤の初期剛性に応じた固有値を算定したため，2 次や 3 次の高次モードでは実験値より解析値が高い振動数を与える結果となった．

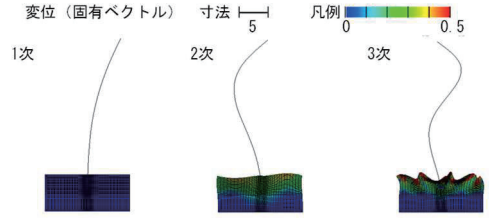



(a) MP と地盤




(b) 地表面（上空より）

図-9　FLIP3D 構造物の固有振動モード（CsB:液状化あり）




MP と地盤

図-10　FLIP2D 構造物の固有振動モード（CsB:液状化あり）

FLIP3D と FLIP2D の MP と地盤の固有振動モードを**図-9**，**図-10** に示す．FLIP3D による，MP と地盤の一体解析モデルを用いた固有値解析では，**図-9** 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．一方，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-10** に示すように，3 次モードでは MP 位置の地盤とその周囲の地盤で不自然な形状が示されている．よって，FLIP3D による高次振動モードの再現性は FLIP2D と比較して高いことを確認できた．

以上より，固有値解析を通じて，FLIP3D は MP に特有な振動特性を評価できることを確認した．

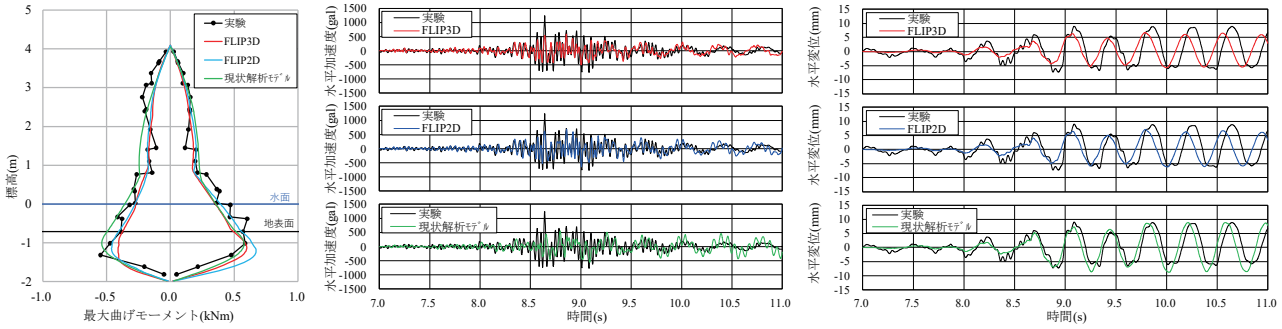
### (2)　MP の地震時挙動と再現解析による評価

不規則波加振実験の結果と再現解析の結果を，CsA（液状化なし）について**図-11**，CsB（液状化あり）について**図-12** に示す．

土中部の最大曲げモーメントおよびタワートップ（模型頂部）の応答加速度と応答変位の値を**表-5** に示す．

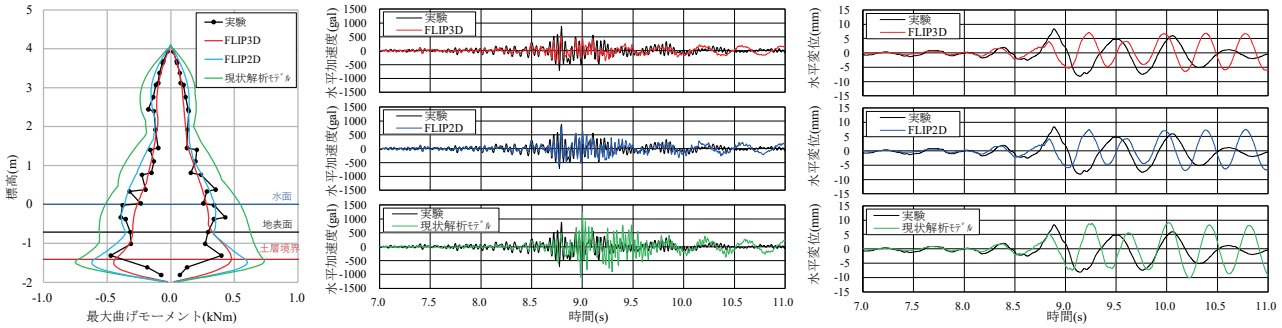
**表-5**　不規則波加振実験の応答値

| | CsA | | | | | | | CsB | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 曲げモーメント (kNm) | | | 加速度 (gal) | | 変位 (mm) | | 曲げモーメント (kNm) | | | 加速度 (gal) | | 変位 (mm) | |
| | 最大 | 最小 | **絶対値** | 最大 | 最小 | 最大 | 最小 | 最大 | 最小 | **絶対値** | 最大 | 最小 | 最大 | 最小 |
| 実験 | 0.59 | -0.55 | **0.59** | 1,236 | -773 | 9.0 | -7.3 | 0.40 | -0.47 | **0.47** | 867 | -717 | 8.4 | -8.2 |
| FLIP3D | 0.60 | -0.41 | **0.60** | 587 | -495 | 6.7 | -5.8 | 0.48 | -0.45 | **0.48** | 512 | -463 | 7.1 | -6.4 |
| FLIP2D | 0.67 | -0.46 | **0.67** | 687 | -647 | 7.1 | -6.2 | 0.60 | -0.62 | **0.62** | 806 | -575 | 7.5 | -6.8 |
| 現状解析ﾓﾃﾞﾙ | 0.58 | -0.54 | **0.58** | 554 | -556 | 8.9 | -8.8 | 0.74 | -0.75 | **0.75** | 1,232 | -1,100 | 9.1 | -10.1 |




(a) 曲げモーメント　(b) 模型頂部の応答加速度　(c) 模型頂部の応答変位

図-11　解析結果と模型振動実験結果の比較（CsA：液状化なし，神戸 NS 成分位相波）




(a) 曲げモーメント　(b) 模型頂部の応答加速度　(c) 模型頂部の応答変位

図-12　解析結果と模型振動実験結果の比較（CsB：液状化あり，神戸 NS 成分位相波）

a) MP 最大曲げモーメントに及ぼす液状化の影響

MP の構造諸元は，発生する最大曲げモーメントを用いて構造設計を行うため，曲げモーメントは地震時挙動を評価するための重要な指標となる.

実験で計測された記録のうち，入力地震動の最大加速度を含む主要動区間に着目して整理した最大曲げモーメントの値を，CsA については**図-11(a)**に，CsB については**図-12(a)**に示す. CsA（液状化なし）と CsB（液状化あり）の実験値を比較すると，液状化が生じる CsB の方が MP およびタワー部の曲げモーメントが小さいことが確認できる．**表-5** の MP 土中部の曲げモーメントの絶対値最大値は，CsA の 0.59 kNm に対して，CsB では 0.47 kNm と実験値の約 0.8 倍まで低減する.

よって，今回の模型実験のように MP の支持力が確保されて液状化層が表層部に連続して存在する条件においては，液状化によって MP およびタワー部の曲げモーメントは低減することが実験で確認できた.

b) FLIP3D による MP 地震時挙動の評価

FLIP3D で MP の液状化時の挙動について評価を行えるか検討を行った.

CsA の解析値を**図-11(a)**に示す．FLIP3D の解析値を赤線，FLIP2D の解析値を青線，現状解析モデルの解析値を緑線で示す．CsB の解析値も同様の色線で**図-12(a)**に示す.

まず，CsA（液状化なし）の最大曲げモーメントに対しては，実験の絶対値最大値 0.59 kNm に対して，FLIP3D は 0.60 kNm, FLIP2D で 0.67 kNm, 現状解析モデルで 0.58 kNm と実験値に概ね近い結果が得られた.

CsB（液状化あり）の場合には，実験の絶対値最大値 0.47 kNm に対して，FLIP3D は 0.48 kNm とほぼ一致している．一方，FLIP2D で 0.62 kNm と実験値の 1.3 倍，現状解析モデルで 0.75 kNm と実験値の 1.6 倍と過大に評価する結果となった.

以上のことから，FLIP3D は，地盤が液状化する条件で MP 曲げモーメントの実験値をほぼ再現していることから，MP 液状化時の挙動を評価する手法として適用可能と考えられる．さらに，FLIP2D や現状解析モデルでは曲げモーメントを実験値より過大に評価する傾向にあり，FLIP3D は，液状化時の解析精度を高め，液状化する可能性のある地盤中に建設される MP 構造断面諸元を適切に設定できる可能性があることを示す結果となった.

c) FLIP3D によるタワートップの加速度と変位の評価

FLIP3D でタワートップの応答加速度および応答変位の挙動について評価可能かどうか検討を行った.

CsA のタワートップの水平加速度は**図-11(b)**に示すように，FLIP3D の解析値は FLIP2D と現状解析モデルと同様に，実験結果を概ね再現する結果となったが，最大値については，実験値 1,236 gal に対して，FLIP3D で 587gal と過小評価する結果となった．水平変位は**図-11(c)**に示すように，時刻 9.0s 以降の主要動後半から自由振動にかけて実験値と位相のずれがみられる．最大値は実験 9.0 mm に対して，FLIP3D の解析値は 6.7 mm と約 0.75 倍に過小評価する.

CsB のタワートップの水平加速度を**図-12(b)**に示す. 最大値は，実験値 867 gal に対して，FLIP3D は 512gal と過小評価する結果となった．FLIP2D では 806 gal と実験値を概ね再現する.一方，現状解析モデルでは 1,232 gal と実験値を過大評価する結果となった.水平変位は**図-12(c)**に示すように，液状化が発生して実験結果と位相のずれが大きくなる.最大値は実験 8.4 mm に対して，FLIP3D は 7.1 mm と約 0.85 倍と概ね再現する結果を得た.

## 5. まとめ

本研究では，10 MW 級風車を対象と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.

FLIP3D は, 固有振動数および加振実験の応答値を概ね再現して，地震時評価手法としての適用性を確認した. 液状化する地盤条件では, 現状解析モデルおよび FLIP2D では実験値を過大に評価する結果となったが, FLIP3D では，実験における MP の最大曲げモーメントを再現することができたため, FLIP3D による液状化地盤を対象とした解析精度を確認し，MP 構造諸元を適切に設定できる可能性があることがわかった．さらに，実験では地盤の液状化により MP の応答値は低減することから，表層地盤が液状化する条件下では MP に対する液状化の影響は限定的となることを確認するとともに, FLIP3D による再現解析でも同じ傾向を確認することができた.

ただし，MP およびタワー部の最大曲げモーメントに対して, FLIP3D は実験値を下回る箇所も認められたことや，タワートップの応答加速度や応答変位の値や位相に実験値と FLIP3D に差異がみられるなど課題も明らかになった．今後は，様々な条件や地震動に対して研究を行い，解析精度を高めていく必要がある．また，液状化が発生すると MP の曲げモーメントや応答値が低減する要因について，実験的および解析的な研究を進め，地震に対する安全性を確保しつつ MP 基礎構造の適正な設定よるコスト削減に資することを目的とした，耐震設計手法を確立していく必要がある.

**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) 井川誠二，上田恭平，中原知洋，三好俊康，白可：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，土木学会論文集特集号(海洋開発)，第 80 巻，18 号，24-18145，2024. [Igawa, S., Ueda, K., Nakahara, T., Miyoshi, T., and Bai, Ke.: Study on seismic behavior evaluation of offshore wind turbine monopile foundations by three-dimensional effective stress analysis, *Japanese J. Jpn. Soc. Civil Eng., Special Issue (Ocean Engineering)*, Vol. 80, Issue 18, 24-18145, 2024.]
3) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, 32(2), pp.1-15, 1992.
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) 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.
6) Iai, S.: Similitude for shaking table tests on soil-fluid model in 1g gravitational filed, *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol.27, No.3, 1999.
7) 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.]
8) 土木学会：風力発電設備支持物構造設計指針・同解説（2010 年版）, pp.180-181, 2010.[Japan Society of Civil Engineers: *Guidelines for Design of Wind Turbine Support Structures and Foundations (2010)* , pp.180-181, 2010.]
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.
11) Goto, H. and Toki, K.: Vibrational Characteristics and Aseismic Design of Sub-merged Bridge Piers, *Third World conf. on earthquake Engneering*, Auckland, Wellington, NewZealand, II , pp.107-122, 1965.

**(Received February 4, 2025)**
**(Accepted May 15, 2025)**

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

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

In this study, underwater shaking table tests targeting a 10MW class offshore wind turbine were conducted to investigate seismic behavior including dynamic interaction between a monopile foundation (MP) and liquefiable ground. The reproduction analysis was conducted using a 3D effective stress analysis method "FLIP ROSE 3D (FLIP3D)." FLIP3D generally reproduced eigenvalue and response values of shaking tests, confirming its basic applicability as a seismic evaluation method. Under liquefaction conditions, FLIP3D approximated maximum bending moment of the MP model, while Winkler model overestimated the moment. This indicates that FLIP3D improves the accuracy of liquefaction analysis, suggesting reasonable design of MP structures. Additionally, the experiments showed that the response values of the MP decreased due to liquefaction, confirming that the impact of liquefaction on the MP is limited. This trend was also reproduced using FLIP3D.