

免震効果を有する洋上風車基礎に関する 1g 場模型振動実験*

Shaking table tests in 1g gravitational field on a new foundation model
with seismic isolator for offshore wind turbines

宮野 展宏** 中山 義紀** 吉岡 健*** 石原 孟****

Nobuhiro MIYANO Yoshinori NAKAYAMA Takeshi YOSHIOKA Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

日本沿岸域には硬質な岩盤が浅く分布する地点が多く存在する。岩盤が浅い地点の場合、着床式洋上風車によく用いられるモノパイル式基礎は効率良く岩盤を削孔する機械が存在せず施工が困難であるため、ジャケット式基礎の採用が一般的である。一方、我が国の風車基礎設計にあたっては極稀地震時に対する耐震設計が必要とされるが、ジャケット式はトラス構造であるため剛性が高く、モノパイル基礎に比べて地盤の減衰効果が小さいと指摘されている¹⁾。

本研究では岩盤が浅い地点でも施工可能で、かつ地盤の減衰効果を期待する新基礎形式「フレキシブル・トリパイル（以下FTP）」を考案し、FTPの動的応答特性を把握するため1g場の模型振動実験を行った。

2. 考案した基礎形式

(1) 新基礎形式の概要

FTPの概念図を図1に示す。FTPは3本の杭及び主管からなる「組杭」構造を基本とし、連結する構造として、底版部の免震フーチング装置（角鋼管、鋼板）、杭頭コンクリートフーチング及びワイヤロープ（以下ワイヤ）からなるものである。角鋼管及び鋼板は変形を許容することで地盤の変動に追従するフレキシブルな構造とし、底版の免震効果（地盤減衰効果）を得ることを期待している。角鋼管の内部には、復元力を得るため、砂材を充填している。杭頭コンクリートフーチングについては勝山ら²⁾が示すように、杭・下部構造のグラウト接合部周囲がコンクリートで覆われることで、鞘管フーチング接合の高剛結度、剥離防止効果を見込んでいる。主管を斜めに支える構造については、免震フーチング装置全体がよく動き底版からの地盤減衰効果を大きく得ることを期待しワイヤとしている。

(2) 検証に用いる実物の諸元

FTPの実物の諸元として設置海域の水位を+1.6m,

*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)土木建築部土木技術室
〒104-8165 東京都中央区銀座6-15-1

*** 会員 電源開発(株)洋上風力事業部付(ひびきウインドエナジー(株)出向)

**** 会員 東京大学大学院工学系研究科教授

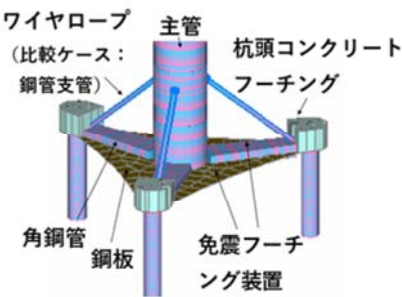


図1 フレキシブル・トリパイル概念図

海底面を-20.0m、堆積層の厚さを4.2mと設定した。風車は10MW級を想定し、試解析モデルとしてタワー基部からの高さを95mと設定した。

3. 実験条件

(1) 模型の諸元

模型の長さの縮尺は1/20とし、1g場におけるIai³⁾の相似則を適用し、模型の縮尺を表1に示す。三好ら⁴⁾を参考にタワー模型を製作することとし、タワー模型の解析モデルが実物のモード形状をおおむね再現できることを確認した(図2)。模型の全体図及び計器測定位置、底版写真を図3に、模型の全体写真を図4に示す。RNA重量を再現するため、タワー模型の最上部には60.1kgの鋼板を設置した。実験ケースについては主管と杭頭部を鋼管で接続したCase1(支管ケース)とFTPをモデル化したCase2(ワイヤケース)の2ケースとした。

(2) 地盤及び模型の設置について

地盤は土槽(加振方向4m、加振直角方向2m)内に

表1 模型の縮尺

パラメータ	実物/模型	縮尺
長さ	λ	20
密度	1	1
ひずみ	$\lambda^{0.5}$	4.47
時間	$\lambda^{0.75}$	9.46
曲げ剛性	$\lambda^{4.5}$	715542
軸剛性	$\lambda^{2.5}$	1789

表3 砂層のせん断波速度

項目	Vs(m/s)	計算方法
パルス加振	28	地盤内の加速度計の到達時間の差
スイープ加振	34	砂層の卓越振動数40Hzと層厚に1/4波長則適用

表4 固有振動数（スイープ加振）

単位：	Case1	Case2
Hz	支管ケース	ワイヤケース
1次	1.69	1.53
2次	10.86	9.43

(2) 自由減衰振動実験結果

自由減衰振動実験結果のうち1次の波形を図6に、2次の波形を図7に示す。いずれも明瞭な減衰波形であり、卓越振動数はスイープ加振結果（表4）と良く一致している。図中右下には、フィルタ処理を行った波形に対して、対数減衰率により計算した減衰定数 ξ を示している。

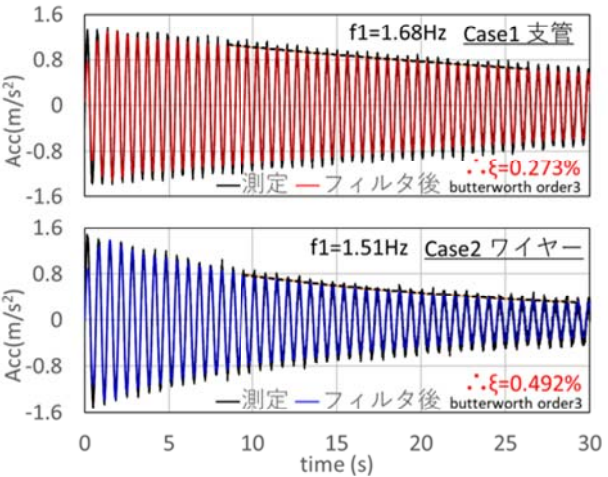


図6 自由減衰振動実験（1次，タワートップ）

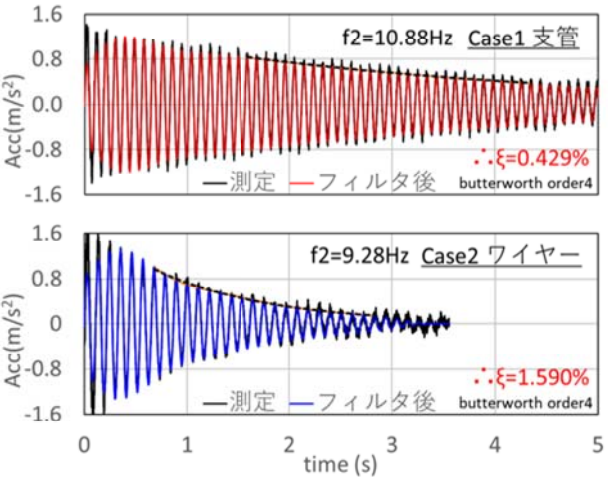


図7 自由減衰振動実験（2次，タワー中腹部）

1次振動数はCase1が0.273%に対しCase2が0.492%，2次振動数はCase1が0.429%に対しCase2が1.590%となった。この結果，Case2（ワイヤケース）の減衰定数が相対的に大きいため，FTPには地盤減衰効果が期待できるものと考えられる。

(3) 不規則波加振結果

不規則波加振結果のうちZ=0.8相当の結果について、タワートップ及び中腹部で得た応答加速度時刻歴及びフーリエスペクトルを図8～図11に示す。

これらによると、タワートップ及び中腹部ともに、最大加速度や1次・2次のスペクトルは、Case1より

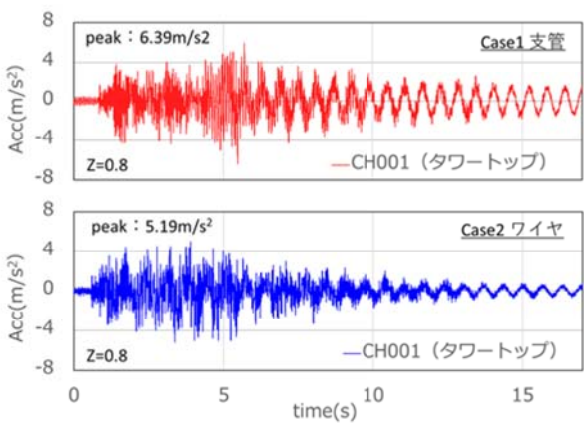


図8 加速度時刻歴（Z=0.8，タワートップ）

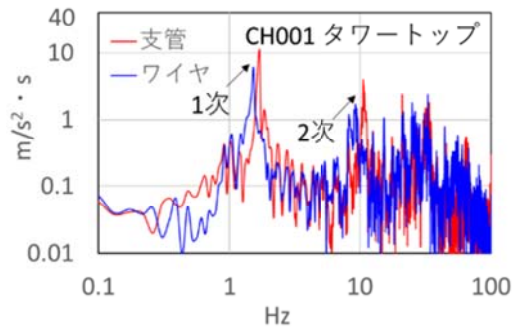


図9 フーリエスペクトル（Z=0.8，タワートップ）

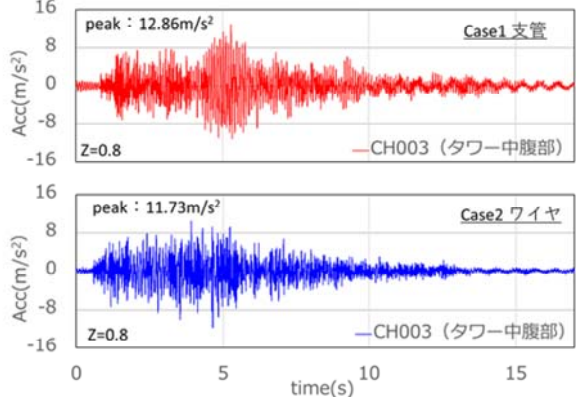


図10 加速度時刻歴（Z=0.8，タワー中腹部）

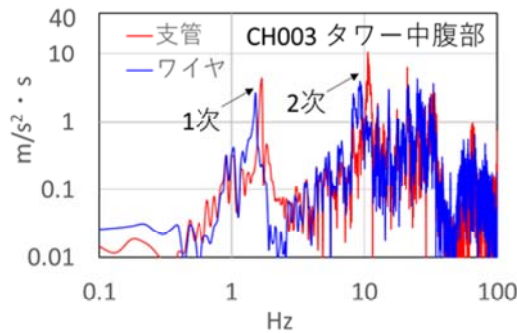


図 11 フーリエスペクトル (Z=0.8, タワー中腹部)

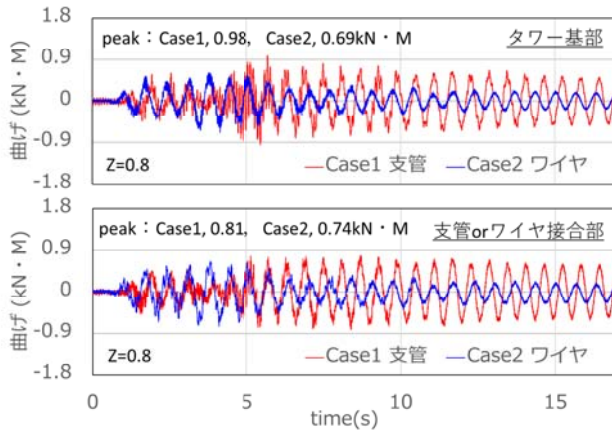


図 12 タワー基部と接合部の曲げ応答 (Z=0.8)

も Case2 の方が応答は小さく、前述の減衰定数に関する結果と調和的であった。なお、Z=1.0, 1.2 の結果も同様であったことを確認している。

次に、タワー基部（高さ+0.995）及び支管又はワイヤ接合部（高さ-0.493）で得られたひずみ応答より求めた曲げ応答を図 12 に示す。いずれの位置においても Case1 に比べて Case2 の方が曲げ応答は小さい結果となった。

以上の結果から、Case2 である FTP では減衰効果が大きく、地震応答を低減できることがわかった。

(4) 地盤の液状化

不規則波加振のうち Z=1.2 における地盤内に設置した間隙水圧計の応答を図 13 に示す。本実験では地盤が液状化した際の挙動を把握するために Z=1.2 までの加振を行ったが、各ケースとも間隙水圧の上昇が確認されない、又は確認されても概ね有効土圧以下となり、明瞭な地盤の液状化を再現するには至らなかった。

今回の実験では、底板が地盤に対する変形追従性を有していたことでタワー重量が多く伝達され、これにより地盤の液状化が抑制されたものと考えられるが、結果として FTP の液状化に対する耐性の確認には至らなかったことから、今後の検討課題としたい。

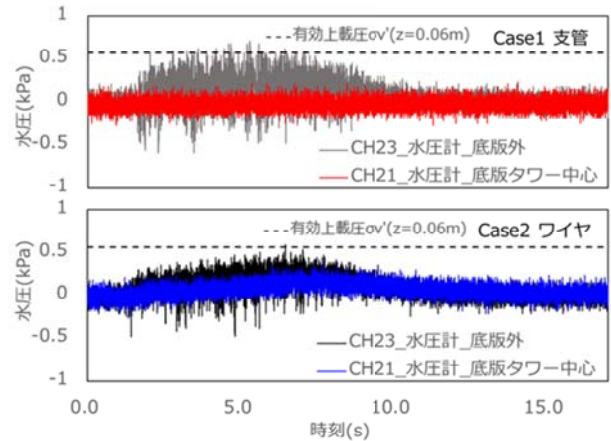


図 13 Case1 と Case2 の間隙水圧計の応答 (Z=1.2)

5. まとめ

本研究では、着床式洋上風車の新基礎形式としてワイヤ及び免震フーチング装置等から構成される FTP を考案し、1g 場の模型振動実験を行うことにより、以下の結論を得た。

- ① 本研究で考案した FTP は、自由減衰振動実験結果から、従来式の鋼管（支管）接続モデルに比べて大きな減衰定数が得られた。
- ② 不規則波加振においても、自由減衰振動実験と同様、減衰効果が大きく、地震応答を低減できることがわかった。

今後は、薄層法を用いて本実験の地盤減衰効果を評価し、FTP が有する耐震性能を明らかにするとともに、地盤の液状化が FTP に与える影響についても検討する予定である。

謝辞 本実験では五洋建設株式会社が所有する水中振動台を使用した。関係各位に記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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～, 令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回学術講演会, I-329, 2022.
- 2) 勝山真規, 菅沼久忠, 吉岡健, 三好俊康: 洋上風力発電設備基礎における海中グラウト接合部の安全性評価, 土木学会構造工学論文集 Vol. 68A, pp. 793-803, 2022.
- 3) Iai, S: Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, Soils and Foundations, 1989.
- 4) 三好俊康, 熊谷隆弘, 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, Vol. 75, No. 4, pp. I_10-I-24, 2019.