

水中制震版を適用した洋上風車モノパイル式基礎を対象とした模型振動実験の再現解析

白 可¹・三好 俊康²・吉田 誠²・三浦 成久²・
松本 正一郎²・肥後 陽介³・音田 慎一郎³・澤村 康生⁴

¹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)

E-mail: ka.haku@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

²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)

³正会員 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻
(〒615-8246 京都府京都市西京区京都大学桂)

⁴正会員 京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻
(〒615-8246 京都府京都市西京区京都大学桂)

著者らは、洋上風車モノパイル式基礎（以下、MP）の周囲にひと回り大きな円筒形の水中制震版（以下、制震版）を一部水中に没水させて設置し、外力を受ける際に制震版が MP とともに水平方向に振動する際の制震版と水の相互作用により、MP の断面力を低減させる構造を提案している。水中振動台を用いた模型振動実験から、MP に作用する断面力が低減することが確認されているが、制震機構の一つと考えられる水による抵抗の定量的な評価方法は課題として残されている。そこで、本研究では水による外力をモリソン式で表現し、運動方程式の減衰項をダンパー要素で簡易的にモデル化し、梁ばねモデルによる模型振動実験結果の再現解析を行った。解析の結果、モリソン式を適用したモデル化方法は概ね実験結果を再現できることを確認した。

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

1. はじめに

近年、風車の大型化に加え、日本では地震荷重の影響も考慮する必要があるため、洋上風車の主要な基礎形式であるモノパイル（以下、MP）の外径は増大する傾向があり、SEP船での施工やハンマーでの打撃、工場製作などが困難になりつつある。

著者らは、Penzienら¹⁾の研究を参考にし、地震時の流体-構造物の相互作用に着目し、過去にMPの周囲にひと回り大きな円筒形の水中制震版（以下、制震版）を一部水中に没水させて設置し、外力を受ける際に制震版がMPとともに水平方向に振動する際の制震版と水の相互作用により、MPの断面力を低減させる構造を提案している²⁾。模型振動実験の結果から風車全体の曲げモーメントが低減し、特に2次モードに対して効果が高いことから、制震版の効果が示されている。一方、制震版の制震機構の一つと考えられる水による抵抗の定量的な評価方法は課題として残されている。

従来の海洋構造物の地震時応答に関する多くの研究では、付加質量の評価が重量視されてきたが^{3),4)}、付加減衰すなわち動水減衰も構造物の動的応答において重要である⁵⁾。本研究では、金ら⁶⁾と田村ら⁷⁾の手法を参考にし、制震版に働く水による外力をモリソン式で表現し、全体系の運動方程式に適用した。水による抵抗である減衰項をダンパー要素で簡易的にモデル化し、模型振動実験結果の梁ばねモデルによる再現解析を実施し、その妥当性の検証を行った。

2. 検討内容と解析条件

(1) 検討対象

再現解析の対象は、高さ約 6m、幅 3m、 I_{ai} ⁸⁾が提案した 1G 場の相似則を適用した縮尺比 1/28 の大型模型実験である。図-1 に模型寸法とセンサーの配置を示す。

実験対象モデルは、風車機種 10MW 級で、水深 20m と

し、MP は直径 8.5m、板厚 90mm を想定した。模型地盤は、東北珪砂 6 号を使用し、相対密度 $Dr=80\%$ を目標に作成した。実験模型の設置状況を図-2 に示す。

タワー及び MP は、三好ら⁹⁾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。鋼管の周囲に軽量かつ鋼管曲げ剛性に影響しない材料として発泡スチロールを設置することで、幾何学縮尺での MP 水中部の断面積を再現して、動水圧

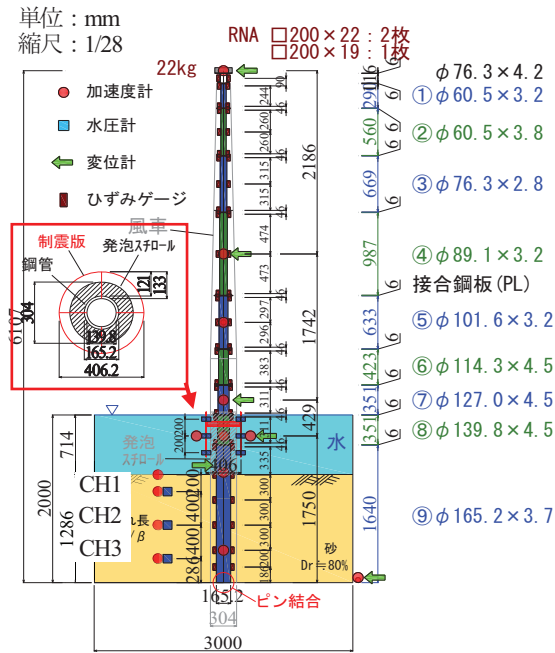
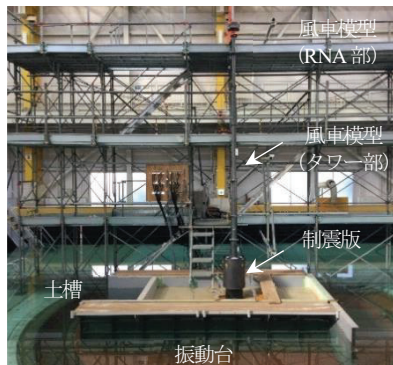
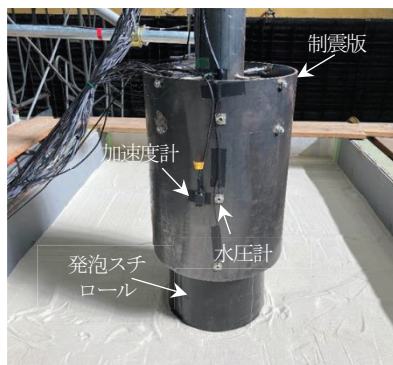


図-1 模型断面図



(a) 模型全景



(b) 制震版近傍

図-2 模型の設置状況

による影響を考慮した。風車 RNA 部は重量を再現できるように、鋼板の組合せでモデル化した。

風車の固有振動数と断面力低減効果の確認を行うため、パルス波加振、スイープ波加振、正弦波加振及び不規則波加振の順に実施した。不規則波加振は八戸 EW 成分位相、神戸 NS 成分位相、ランダム位相の極稀告示スペクトル適合波 3 波 (地域別地震係数 $Z=1.0$) を使用した。再現解析は不規則波加振のケースを対象とした。

(2) 解析手法

洋上風力施設を対象とする動的解析の手法は既往研究から基礎形式によって変わる。三好ら⁹⁾は重力式基礎を対象に、SR モデルを適用した。大嶽ら¹⁰⁾はジャケット式基礎を対象に、押込み支持力及び引抜き抵抗力を評価するために、鉛直方向の地盤ばねを設置した。大矢¹¹⁾は MP を対象に、多点入力 of 解析手法として、地盤応答解析を事前に実施し、地盤の時刻歴波形を水平方向の地盤ばねを介して風車モデルへ入力した。

本研究の解析手法は大矢¹¹⁾の研究を参考にし、図-3 に示すように 2 つのステップに分かれている。ステップ 1: 地盤の影響を考慮するために、解析コード FLIP¹²⁾を用いて土槽内の地盤のみを対象とした 2 次元 FEM 解析を実施する。ステップ 2: 2 次元 FEM 解析で得られた地盤の時刻歴応答変位を深度方向の各節点位置に設置する地盤ばねに入力する。それと同時に多質点系梁ばねモデルを対象に、振動台テーブル上で収録した応答加速度をモデル全体に入力し、時刻歴応答解析を実施する。

ステップ 1: 模型地盤を対象にした 2 次元 FEM 解析



ステップ 2: 風車模型を対象にした時刻歴応答解析

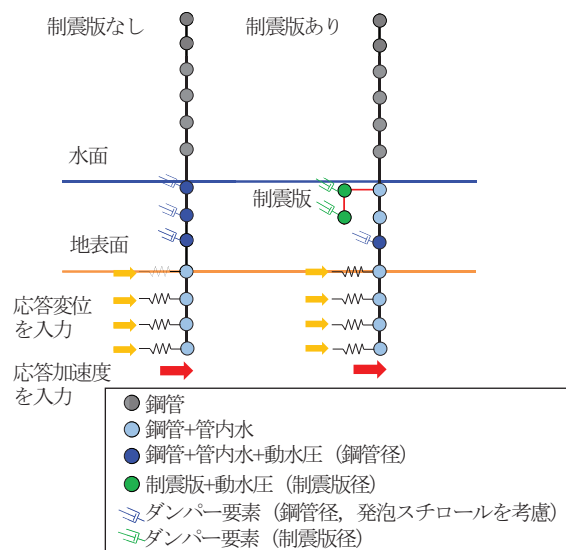


図-3 解析手法の概要

(3) 2次元FEM解析

2次元FEM解析は鋼製枠タイプである土槽内の高さ1.286m、幅3mの地盤を対象に、メッシュサイズが実物スケールで1m×1m、模型スケールで約0.036m×0.036mとなるようにメッシュを分割した。解析の境界条件として、底面は固定で、側面は粘性境界を模擬する線形ばねをつけた。なお、ばね値は土槽の挙動を再現できるように逆解析により設定した。1次元地盤の固有振動数は模型振動実験で得られたせん断波速度から1/4波長則で設定し、減衰が1%となるように初期剛性比例型のレイリー減衰の係数 $\beta=0.00019$ と設定した。地盤パラメータの一覧を表-1に示す。地盤内に設置した加速度計及びMP位置にある各深度に対応した節点の加速度と変位の時刻歴を出力した。過剰間隙水圧の上昇を確認し、液状化が発生しなかったため、液状化パラメータを設定しなかった。

(4) 時刻歴応答解析

風車模型を対象に実施した時刻歴応答解析は図-1に示す模型寸法より梁要素の断面特性を設定した。制震版は剛梁でモデル化した。各節点に入力する質量について、図-3に示すように、水面より上の節点は鋼管のみの質量で、地表面より下は鋼管とその内径分の管内水の合計とした。水面と地表面の間の節点に、鋼管と制震版の質量とその中に囲まれている管内水のほか、鋼管（発泡スチロール径を考慮）と制震版外径分の動水圧は水の付加質量として入力した。地盤ばねは図-4に示すように、別途実施した水平載荷試験の荷重-変位関係から地盤中央の地盤反力係数 k_h を設定した。また、有効上載圧の影響を考慮し、実物スケール1mピッチで深度方向に変化させ、道路橋示方書の手法¹³⁾を参考に設定した。鋼管下端の境界条件は実験と同様にピン結合とした。

解析モデルの概要を図-5に示す。金ら⁶⁾と田村ら⁷⁾の研究を参考にし、水による外力をモリソン式で表現すると、地震時における運動方程式は式(1)のように表される。

$$[M]\{\ddot{x} + a_g\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = (C_M - 1)\rho[V]\{-\ddot{x} - a_g\} + 0.5C_D\rho A_P\{(-\dot{x} - v_g)|-\dot{x} - v_g|\} \quad (1)$$

ここで、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ ：構造物の質量、減衰、剛性マトリクス、 $\{x\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 、 $\{\ddot{x}\}$ ：構造物節点の変位、速度、加速度、 C_M ：質量係数、 ρ ：水密度、 C_D ：抗力係数、 $[V]$ ：排水体積、 A_P ：投影面積、 a_g 、 v_g ：振動台テーブルの応答加速度、速度である。

式(1)の右辺第二項を近似し、 $\dot{x}^2$ を無視すると、以下の式(2)が得られる。

$$(-\dot{x} - v_g)|-\dot{x} - v_g| \approx -2|v_g|\dot{x} - v_g|v_g| \quad (2)$$

以下に示す式(3)、式(4)、式(5)ならびに式(2)を式(1)に代入し、整理すると図-5に示す支配方程式である式(6)が得られる。

$$[M_H] = (C_M - 1)\rho[V] \quad (3)$$

$$[C_H^A] = C_D\rho A_P|v_g| \quad (4)$$

$$\{F(t)\} = -([M] + [M_H])\{a_g\} - 0.5C_D\rho A_P v_g|v_g| \quad (5)$$

$$([M] + [M_H])\{\ddot{x}\} + ([C] + [C_H^A])\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (6)$$

ここで、 $[M_H]$ ：付加質量マトリクス、 $[C_H^A]$ ：動水減衰マトリクス、 $\{F(t)\}$ ：構造物に作用する外力である。

表-1 地盤パラメータ一覧

Y座標 (m)	層厚 Δl (m)	湿潤単位 体積重量 γ_t (kN/m ³)	水中単位 体積重量 γ' (kN/m ³)	密度 ρ (t/m ³)	有効 上載圧 σ_v' (kN/m ²)	基準 拘束圧 σ_{ma}' (kN/m ²)	S波 速度 V_s (m/s)	ポアソン比 ν	P波 速度 V_p (m/s)	せん断 弾性係数 G_{ma} (kN/m ²)	体積 弾性係数 K_{ma} (kN/m ²)	比例 定数 m_g m_k	間隙率 n	減衰 定数 最大値 b_{max}	粘着力 C (kN/m ²)	内部 摩擦角 ϕ_f (度)
0.000 -1.286	1.286	19.7	9.884	2.01	6.4	4.8	86.0	0.33	-	14,850	38,727	0.5	0.39	0.24	0.0	40.3

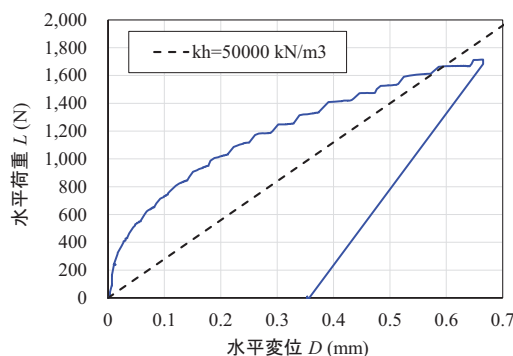


図-4 水平載荷試験の荷重-変位関係

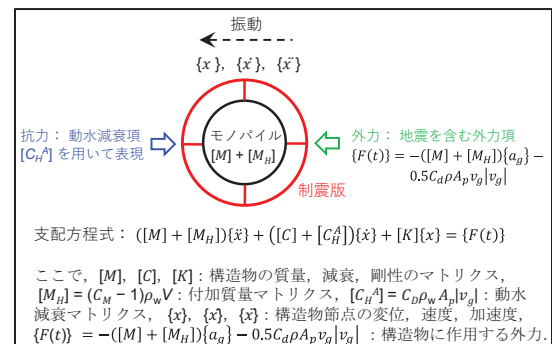


図-5 解析モデルの概要

式(6)で表される支配方程式を時刻歴応答解析で解くにあたり、式(3)、(4)、(5)に示す質量項、減衰項、外力項を設定する必要がある。式(3)に示す質量項の一部である付加質量マトリクス $[M_H]$ は、先述したように、水の付加質量として考慮し、質量係数 C_M は2.0と設定した。式(4)に示す減衰項の一部である動水減衰マトリクスは振動台テーブルの応答速度の絶対値 $|v_g|$ に比例するもので、時間によって変化するが、本研究では解析コードの都合上、一定である振動台テーブルの応答速度の絶対値平均値 $|\bar{v}_g|$ を設定することで一定値と仮定し、図-3に示す実物スケール1mピッチのダンパー要素で簡易的に表現した。式(4)に示す投影面積 A_p は構造物の外径とダンパー要素の分担幅を乗じて算出し、制震版の有無により制震版径と発泡スチロールを考慮した鋼管径で計算した。なお、抗力係数 C_D を1.0と設定した。減衰項のうち、構造物の減衰 $[C]$ は構造物の節点と要素にレイリー減衰を設定して表現した。係数 α と β は図-6に示すスイープ波加振の結果で得られた加速度応答倍率から、 $1/\sqrt{2}$ 法¹⁴⁾を適用して算定した。式(5)に示す外力項について、右辺の第一項は図-7に示す振動台テーブルの加速度を入力し、第二項は水中の各節点に投影面積 A_p と応答速度の絶対値 $|v_g|$ および応答速度 v_g に比例する節点力の時刻歴を入力した。

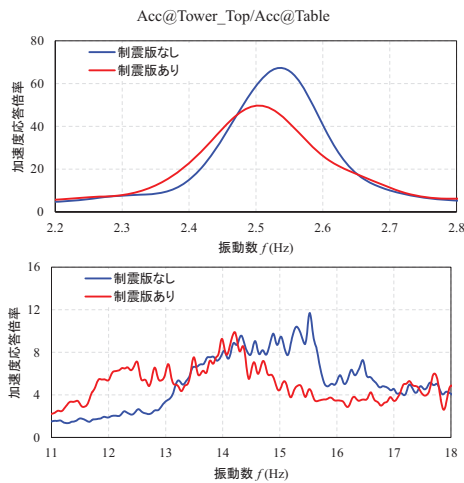


図-6 加速度応答倍率

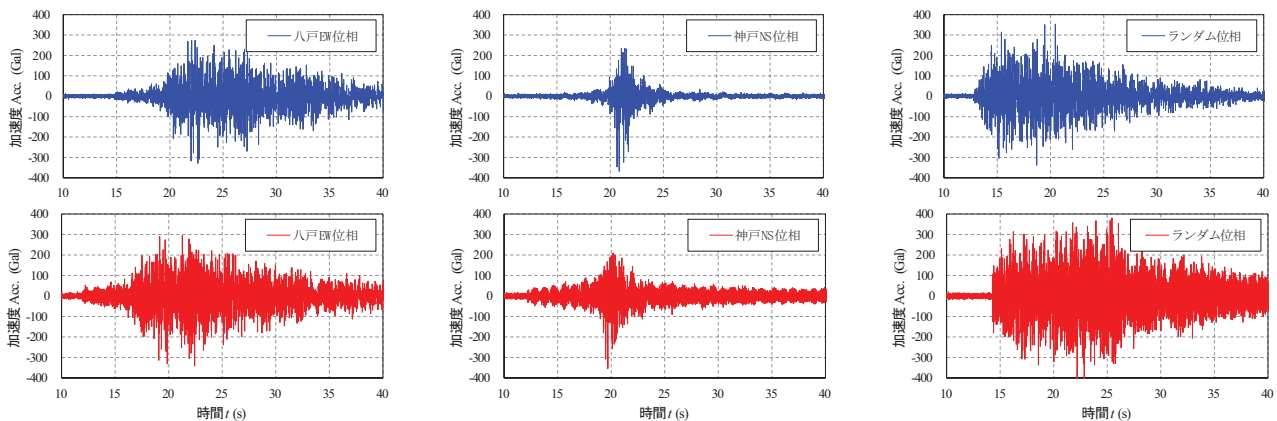


図-7 振動台テーブルにおける応答加速度時刻歴（青線：制震版なし、赤線：制震版あり）

3. 解析結果

(1) 2次元FEM解析の結果

模型地盤を対象に実施した2次元FEM解析結果の例として、制震版なしの八戸EW成分位相波入力にかかる、振動台テーブルに対する地中部CH1～CH3の相対変位時刻歴を図-8に示す。黒線で示す実験の相対変位時刻歴は各位置における応答加速度時刻歴を2回積分して振動台テーブルの変位を引いて算出したものである。実験と比べてCH1～CH3における青線で示す解析の位相と振幅が概ね一致することから、地盤の振動性状を適切に評価できていると考えられる。紙面上割愛するが、他のケースも同様な傾向を示している。先述したように、これらの相対変位を地盤ばねに入力し、構造物に対する地盤の影響を考慮している。

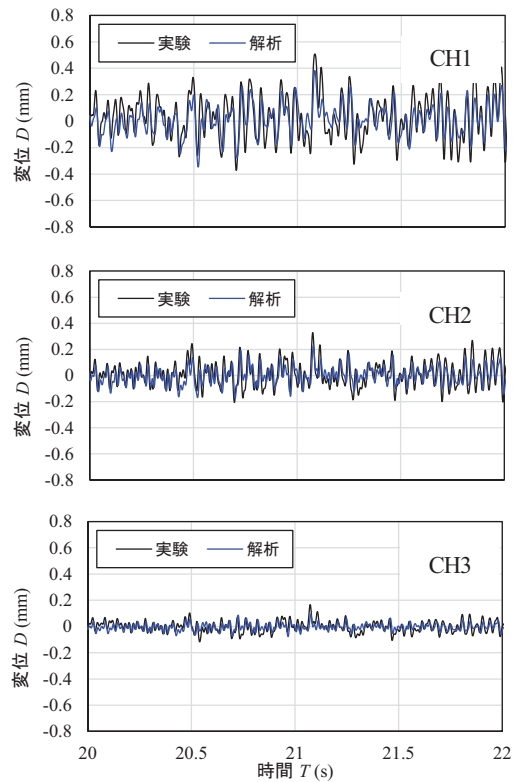


図-8 振動台テーブルに対する相対変位時刻歴

(2) 時刻歴応答解析の結果

時刻歴応答解析と実験の比較結果を図-9, 10, 11に示す。曲げモーメントは図-1に示す鋼管の両側に設置したひずみゲージから曲げひずみを算出し、鋼管の断面係数とヤング率を乗じて実物スケールに変換したものである。なお、鋼管の最大ひずみは約 100μ であり、弾性域での挙動であることを確認した。図-9, 10には動水減衰を考慮した解析結果に加え、緑線で示す動水減衰を考慮していない結果も示している。図-9に示すように、動水減衰を考慮した赤線の解析結果は緑線より全体的に実験と近づ

いている傾向となっており、実験と同様に地表面より約8mの深度で（グラフ上点線で示す）最大となり、最大応答値も実験と概ね一致している。水面と地表面の間に設置する動水減衰を表すダンパー要素の働きで赤線の応答が全体的に抑えられていると考えられる。また、前章の式(4)に示すように、動水減衰に入力波の速度に依存する項があるため、断面力の低減効果は入力波の種類によって異なっていることも示されている。動水減衰を考慮することで、解析上曲げモーメントの最大応答値は20%～50%低減されていることがわかる。

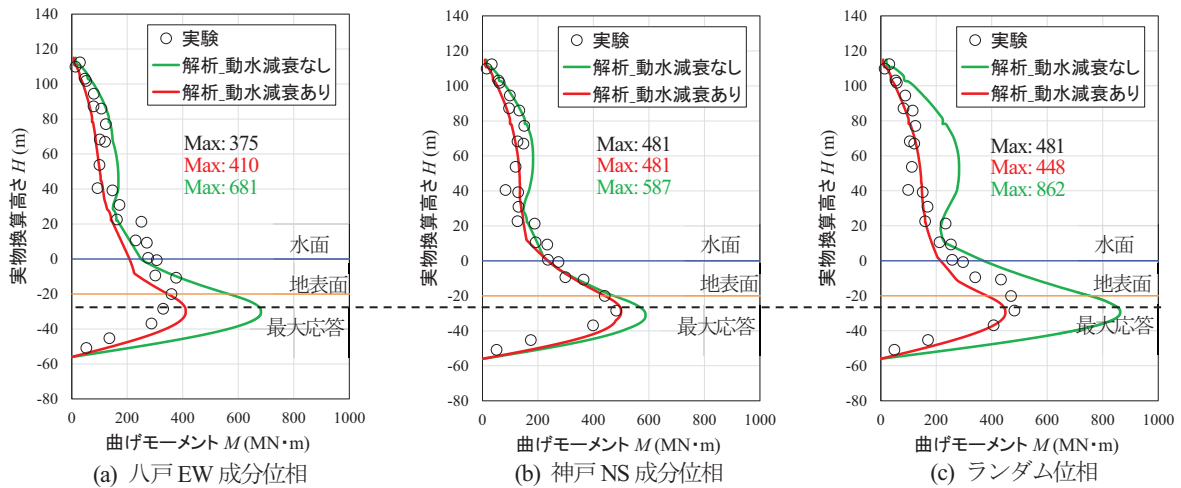


図-9 曲げモーメントの最大応答値の深度方向分布（制震版なし）

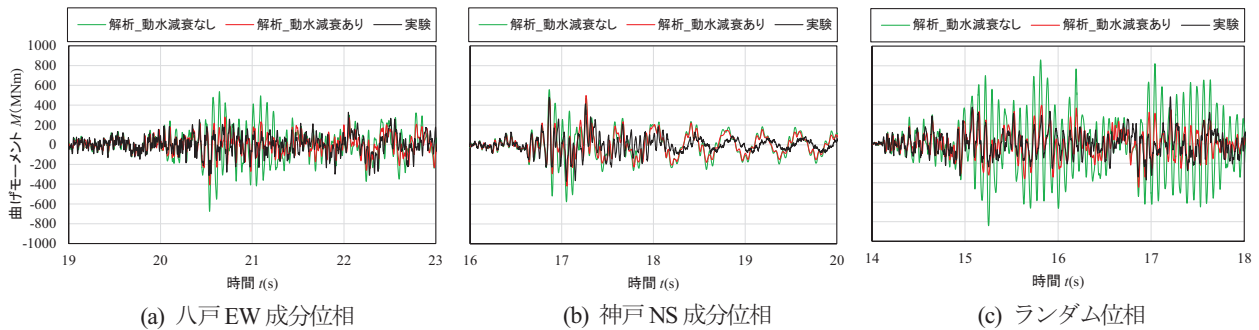


図-10 最大曲げモーメント発生位置の曲げモーメント時刻歴（制震版なし）

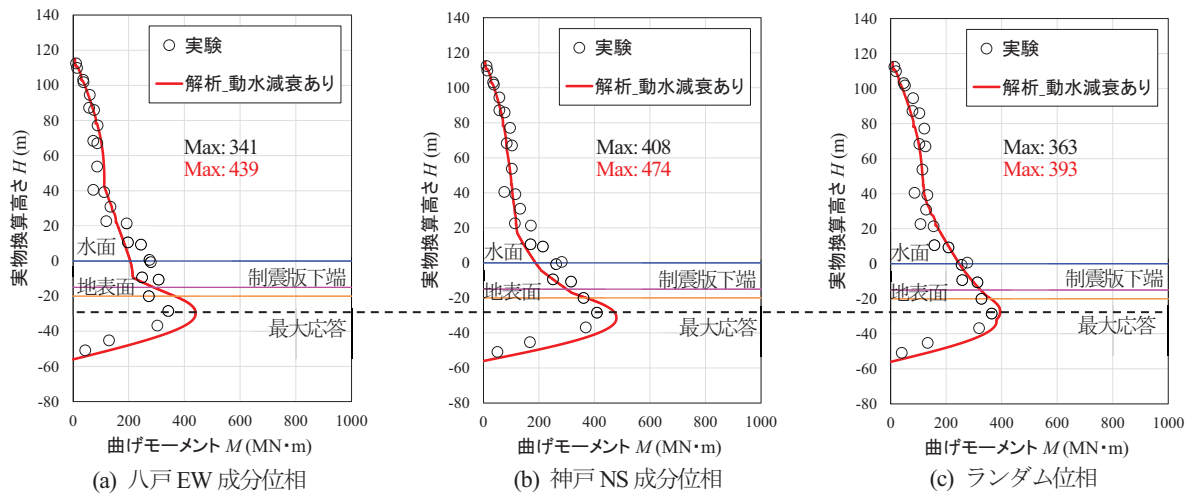


図-11 曲げモーメントの最大応答値の深度方向分布（制震版あり）

最大曲げモーメント発生位置の曲げモーメント時刻歴を図-10 に示す. 赤線に示す動水減衰を考慮する解析結果は図-9 で若干最大応答の発生位置が異なっている八戸 EW 成分位相波でも概ね実験結果を再現できていることがわかる.

制震版ありの解析と実験の比較結果を図-11 に示す. 図-9 に示す制震版なしの実験結果に対して, 制震版ありの曲げモーメントの最大応答は約 10%~20%低減し, 制震版による断面力低減効果が示されている. 一方, 図-9 に示す制震版なしの解析結果に対して, 図-11 に示す制震版ありの曲げモーメントの計算結果は低減がほとんど見られず, また, 実験結果に比べて解析の方が若干大きくなっている. その理由の一つは前章の(4)に記載されているように, 本研究は解析コードの都合上, 振動台テーブルの応答速度の絶対値平均値 $|\bar{v}_g|$ を設定することで一定値と仮定したため, 減衰項に影響する応答速度の時刻歴変化を再現できないためと考えられる. 制震版の径に比例する投影面積である A_p を大きく設定しても, 応答速度の絶対値平均値を一定値にすることで結果的に主要動の動水減衰を小さく評価した場合がある. また, 実験の実施状況から, 解析上考慮されていない MP と制震版の間にある液面動揺が, 模型全体の減衰に寄与することも推測されている.

4. まとめ

本研究では, 水中制震版を適用した洋上風車モノパイル式基礎の大型模型振動実験を対象に, 制震版の制震機構の一つである水による抵抗に着目した再現解析を実施した. 水の外力をモリソン式で表現し, 動水減衰をダンパー要素で考慮する簡易的なモデル化手法を提案し, 梁ばねモデルで制震版なしの模型振動実験の結果を概ね再現することができた.

洋上風車モノパイル式基礎のような大きな外径を持つ海洋構造物に対して, 解析上動水減衰を考慮することで地震時の最大曲げモーメントが 20~50%減少しており, より合理的な設計になる可能性が示唆された.

一方, 制震版ありのケースでは, 実験結果に比べて解析の結果の方が若干大きくなっていた. その理由の一つは解析コードの都合上, 振動台テーブルの応答速度の絶対値平均値を設定することで一定値と仮定したため, 減衰項に影響する応答速度の時刻歴変化を再現できないためと考えられる. また, モノパイルと制震版の間にある液面動揺が, 模型全体の減衰に寄与しているためと推測している. 時刻歴変化を考慮できるより厳密な動水減衰のモデル化とモノパイルと制震版の間の水のモデル化について今後検討する必要がある.

REFERENCES

- 1) Penzien, J. and Kaul, M. K., Response of offshore towers to strong motion earthquakes, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol.1, pp.55-68, 1972
- 2) 白可, 三好俊康, 吉田誠, 三浦成久, 松本正一郎, 肥後陽介, 澤村康生, 音田慎一郎: 水中制震版を適用した洋上風車モノパイル式基礎の耐震性能に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.79, No.18, 23-18018, 2023. [Bai, K., Miyoshi, T., Yoshida, M. Miura, N. Matsumoto, S., Higo Y., Sawamura, Y., and Onda, S.: Experimental study on seismic performance of monopile type foundation of offshore wind turbine with underwater seismic control panel, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.79, No.18, 23-18018, 2023.]
- 3) 喜岡渉: 大型海洋構造物に作用する地震時付加質量, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp.609-613, 1981. [Kikoka, W.: Seismic added mass acting on large offshore structures, *Transaction of the Proceedings of Coastal Engineering, JSCE*, Vol.28, pp.609-613, 1981.]
- 4) 清川哲志, 稲田裕: 大型軸対称構造物の地震時付加質量, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp.452-456, 1982. [Kiyokawa, T., Inada, H: Seismic added mass of large axisymmetric structures, *Transaction of the Proceedings of Coastal Engineering, JSCE*, Vol.29, pp.452-456, 1982.]
- 5) Haritos, N. and Yang, H.,: An investigation of hydrodynamic damping of vertical bottom-pivoted cylinders, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME*, Vol.114, pp.257-263, Nov.1992.
- 6) 金徳印, 松井徹哉: 海洋プラットフォームの地震応答における動水減衰影響の解析, 日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.10-2, pp.2039-2044, 1998. [Jin, D., and Matsui, T.: The influence of hydrodynamic damping on seismic response of jacket-type ocean plat-forms, *Transaction of the Earthquake Engineering Symposium Proceedings*, Vol.10-2, pp.2039-2044, 1998.]
- 7) 田村保, 岩佐貴史: 制震栈橋の耐震性能評価に関する検討, 地震工学研究発表会論文集, Vol.26, pp.1361-1364, 2001. [Tamura, T., and Iwasa, T.: Study on Evaluation of Seismic Performance of Seismic Damping Piers, *Transaction of the JSCE Earthquake Engineering Symposium*, Vol.26, pp.1361-1364, 2001.]
- 8) 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.
- 9) 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., 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.]
- 10) 大嶽 敦郎, 風野裕明, 森下和帆, 笹井綾乃, 加賀美暢一, 福田渚, 中野雄太, 藤士尚也: 洋上風力発電設備におけるジャケット構造の設計技術の確立~詳細設計における風波連成解析, 耐震設計手法及び設計留意

- 点について～, 日鉄エンジニアリング技報, Vol.14, pp.18-31, 2023. [Ootake, A., Kazeno, H., Morishita, K. Sasai, A. Kagami, Y., Fukuda N., Nakano, Y., and Toshi, N.: Establishment of jacket structure design technology for offshore wind farm～Coupling analysis for wind and wave loads, seismic design methods and design considerations in detailed design～, *Transaction of the Nippon Steel Engineering Co., Ltd. technical review*, Vol.14, pp.18-31, 2023.]
- 11) 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, Vol.78, No.2, I_895-I_900, 2022. [Ohya, Y.: Fundamental study of coupled wind and seismic analysis for monopile supported offshore wind turbine in liquefied ground, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.78, No.2, I_895-I_900, 2022.]
- 12) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 13) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, pp.76-81, 2012. [Japan Road Association: *Dorokyoshihosyo & Doukaisetsu V Taishinsekei-hen*, pp. 76-81, 2012.]
- 14) 日本建築学会: 建築物の減衰, pp.92-93, 2000. [Architectural Institute of Japan: *Damping in Buildings*, pp. 92-93, 2012.]

(Received February 6, 2024)

(Accepted May 13, 2024)

REPRODUCTION ANALYSIS OF SHAKING TABLE TEST ON MONOPILE TYPE FOUNDATION OF OFFSHORE WIND TURBINE WITH UNDERWATER SEISMIC CONTROL PLATE

Ke BAI, Toshiyasu MIYOSHI, Makoto YOSHIDA, Naruhisa MIURA, Shoichiro MATSUMOTO, Yosuke HIGO, Shinichiro ONDA and Yasuo SAWAMURA

The authors have proposed a structure in which a larger cylindrical underwater seismic control plate is partially submerged in water around the monopile foundation of an offshore wind turbine to reduce the cross-sectional force of the MP (hereinafter referred to as "MP") by the interaction between the seismic control plate and water when the MP and the seismic control plate vibrate horizontally when subjected to external forces. Although it has been confirmed from shaking table tests using an underwater seismic table that the cross-sectional force acting on the MP is reduced, a quantitative evaluation method for the resistance due to water, which is considered to be one of the seismic control mechanisms, remains an issue. In this study, the external force due to water was expressed by the Morrison equation, and the damping term of the equation of motion was modeled simply by using damper elements to reproduce the results of shaking table tests using a beam-spring model. The results of the analysis confirmed that the modeling method using the Morrison equation was generally able to reproduce the experimental results.