

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

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

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)

E-mail: toshiyasu.miyoshi@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

³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)

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)

風車の大型化に加えて、日本では地震荷重の影響も考慮する必要があるため、洋上風車モノパイル式基礎（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、工場製作などが課題になっている。そこで、本研究では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して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する。提案する構造の地震時挙動を確認するために、地盤あり・なしの条件で水中振動台実験を実施した。実験の結果、提案する構造の耐震性能は、風車の2次モードに対して特に高いことがわかった。また、制震版内の液面変動によって、構造物に作用する水の抵抗力が大きくなることも示された。

Key Words : *underwater seismic control panel, cross-sectional force reduction effect, offshore wind turbine monopile foundation, 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）の断面力は大きくなり、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。さらにSEP船での施工やハンマー打撃、工場製作などが課題になっている。MPは単杭構造であるため強地震動に対する耐震性能として「地震による損傷が無いこと」や、「健全性を失わないこと」が挙げられるため地震時断面力低減が必要と考えられる。したがって、MP外径と重量を適正なものとするために、断面力を低減させる構造形式の開発が日本の洋上風力事業において重要になると考えられる。

本研究では、中原ら¹が提案する栈橋上部工に設置する制震版を参考にし、MPの周囲を覆う円筒形の水中制震版

（以下、制震版）を一部没水させて設置し、地震作用時に制震版とMPが水平方向に振動することによる水との相互作用により、MPの断面力を低減させる構造を提案する。本研究では、提案する構造の地震時挙動を確認するために、地盤あり・なし、制震版あり・なしの条件で水中振動台実験を実施した。実験結果に基づき耐震性能を評価する指標の1つとなる「制震版による地震時断面力低減効果」について考察した。

2. 水中振動台実験

(1) 実験概要

本研究では、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験を実施した。実験対象モデルは図-1に示すように、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。

地盤の影響を調べるために、実験は地盤ありと地盤なしの条件で実施し、それぞれ表-1 に示す 1G 場の相似則²⁾と表-2 に示すフルード則³⁾を適用した。制震版のサイズと設置位置は現場での施工を想定して決めた。実験装置の制約上、地盤ありの実験では模型縮尺 $\lambda=28$ とし、制震版は直径 12m、高さ 15m とし、地中部 MP の $2.4/\beta$ の範囲までモデル化した。地盤なしの実験では模型縮尺 $\lambda=20$ とし、制震版は直径 12m、高さ 20m とし、地中部 MP の $1/\beta$ (仮想固定点) の範囲までモデル化した。MP 下端の境界条件は、地盤ありの実験ではピン結合とし、地盤なしの実験では固定とした。模型地盤では、東北珪砂 6号を使用し、水中落下法で相対密度 80%を目標に作成した。地盤ありの実験の実施状況を図-2 に示す。

タワーおよび MP は、三好ら⁴⁾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。

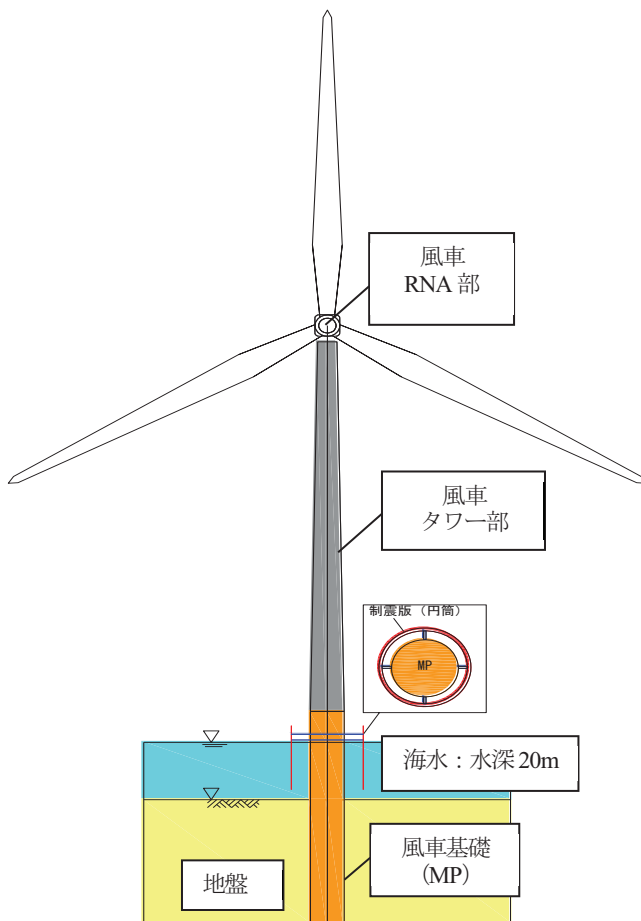


図-1 実験対象モデル

表-1 相似則 (地盤あり)²⁾

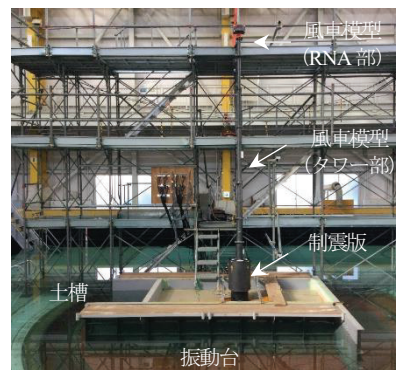
物理量	記号	実物/模型	縮尺
長さ	L	λ	28
時間	T	$\lambda^{0.75}$	12.17
ひずみ	ε	$\lambda^{0.5}$	5.29
質量	M	λ^3	21,952
曲げ剛性	EI	$\lambda^{4.5}$	3,252,454

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、動水圧による影響を適切に考慮した。

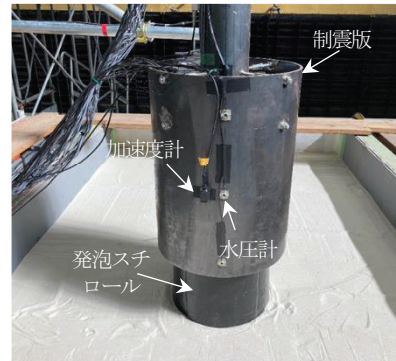
風車 RNA 部は重量を再現できるように、鋼板の組合せでモデル化した。

(2) 実験ケース

実験ケースを表-3 に示す。実験に用いた試験体は地盤あり、制震版なしの Case1、地盤あり、制震版ありの Case2、地盤なし、制震版なしの Case3、地盤なし、制震版ありの Case4 の計 4 体である。



(a) 模型全景



(b) 制震版近傍

図-2 実験の実施状況 (地盤あり)

表-3 実験ケース

ケース名	地盤	制震版
Case1	あり	なし
Case2	あり	あり
Case3	なし	なし
Case4	なし	あり

表-2 相似則 (地盤なし)³⁾

物理量	記号	実物/模型	縮尺
長さ	L	λ	20
時間	T	$\lambda^{0.5}$	4.47
ひずみ	ε	1	1.00
質量	M	λ^3	8,000
曲げ剛性	EI	λ^5	3,200,000

(3) 加振条件

加振条件を表-4に示す。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、正弦波加振およ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（図-3）。

(4) 計測項目

模型断面図を図-4に示す。同図に示すように、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、および制震版の内外に作用する水圧である。地盤ありの実験では、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。後者を確認した結果、液状化は発生していなかった。

表-4 加振ケース

No.	加振波	加振目的	加振条件	
			地盤あり	地盤なし
1	パルス波	伝達関数の取得 風車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0.7~70Hz	
3	正弦波	1次モードの断面力 低減効果の確認	最大加速度0.3m/s ² , 振動数 f=2.5Hz	最大加速度0.3m/s ² , 振動数 f=1Hz
4	正弦波	2次モードの断面力 低減効果の確認	最大加速度0.5m/s ² , 振動数 f=15Hz	最大加速度1.0m/s ² , 振動数 f=7Hz
5	不規則波	地震時断面力低減 効果の確認	極稀告示スペクトル適合波3波（地域別地震係数Z=1.0）	

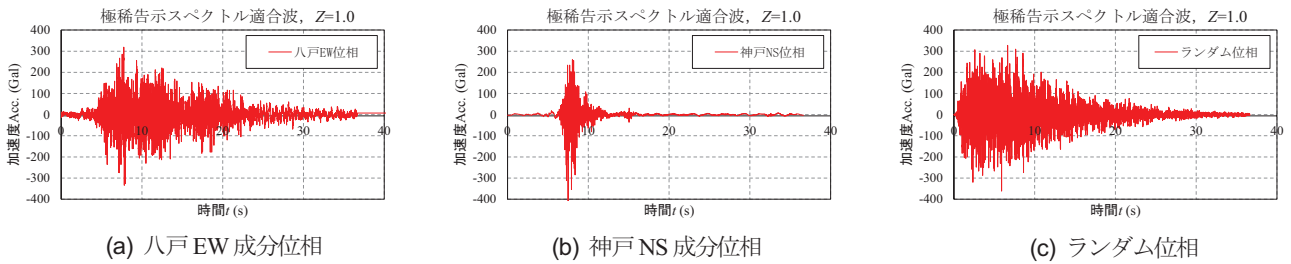


図-3 入力地震動

[単位：mm]

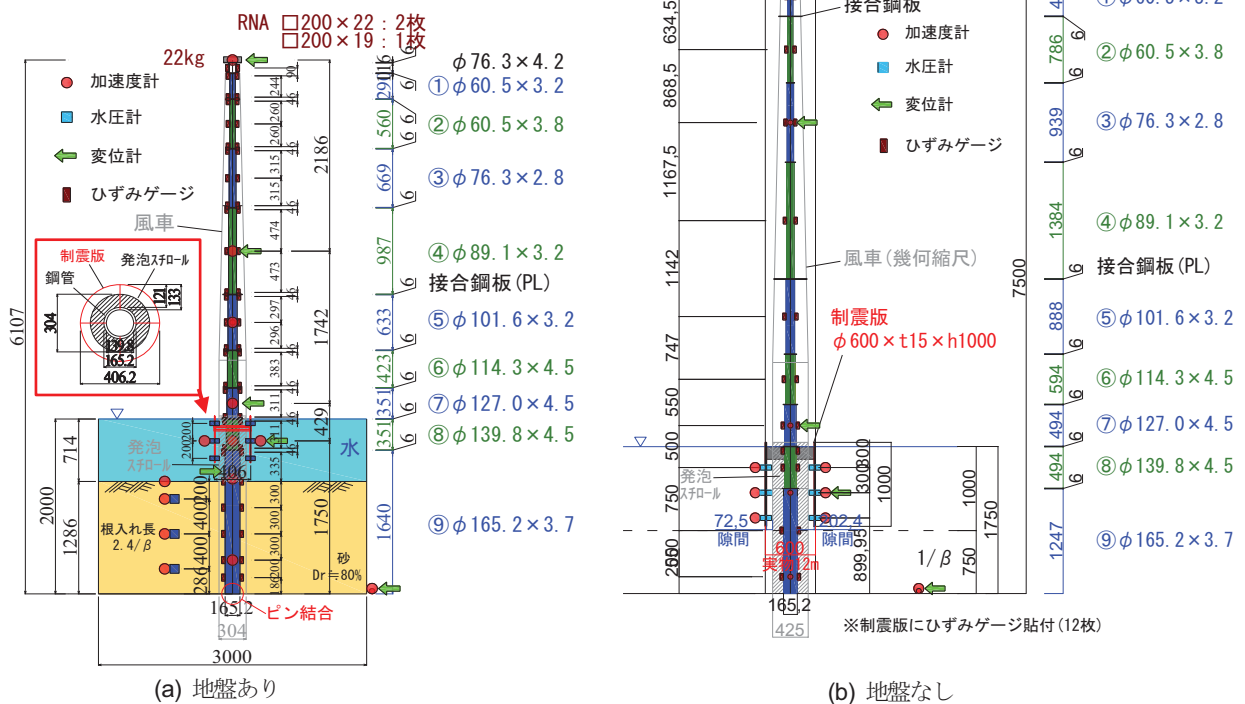


図-4 模型断面図

3. 実験結果および考察

(1) 不規則波加振による風車の曲げモーメント

不規則波加振による風車の各位置における最大曲げモーメント分布を図-5,6に示す。なお、以下に示す曲げモーメントは実物スケールに変換したものである。図-5によると、不規則波加振3波において地盤ありの実験では、地表面付近で曲げモーメントが最大となっており、2次モード以上の高次モードの影響が大きいと考えられる。さらに、Case1と比べてCase2の曲げモーメントが各位置で低減（最大低減率は15%~24%）されていることから、制震版が有効である結果が示された。一方、図-6から、地盤なしの実験では、地盤による抵抗がないため、2次以上のモードより1次モードの影響が支配的で、制震版による明確な断面力低減効果が見られなかった。

これは図-7に示す模型（地盤なし）の固有値解析で得られた風車のモード形状と関係すると考えられ、2次、3次モードのように制震版設置範囲内でより大きく変位する方が制震版の低減効果を発揮できると推測される。

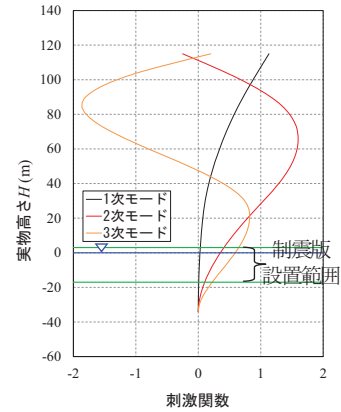


図-7 風車模型のモード形状（地盤なし）

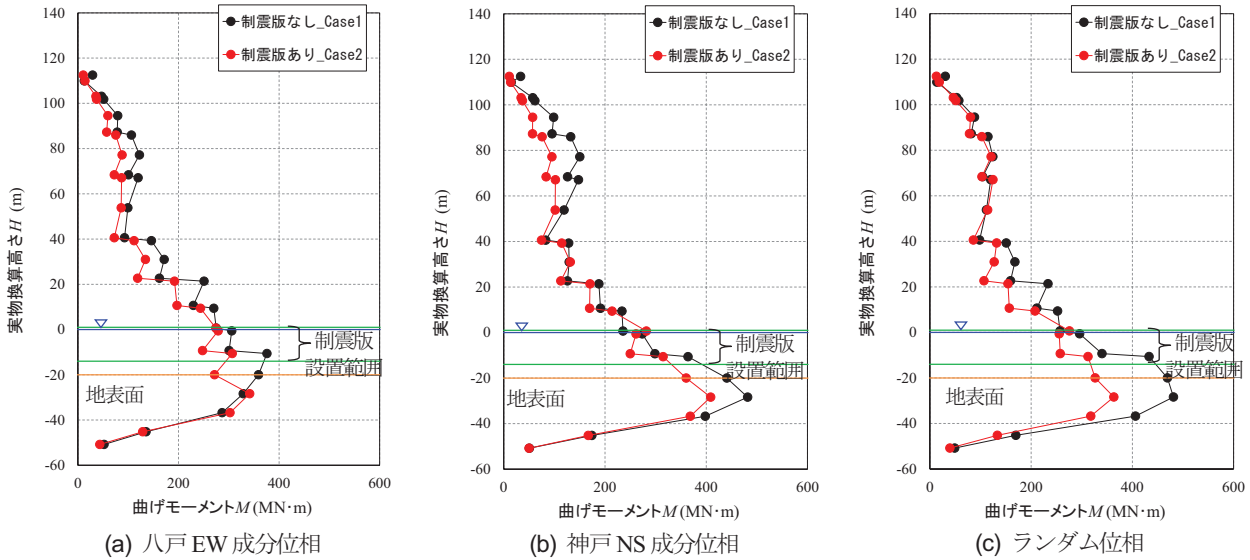


図-5 風車の曲げモーメント分布（地盤あり）

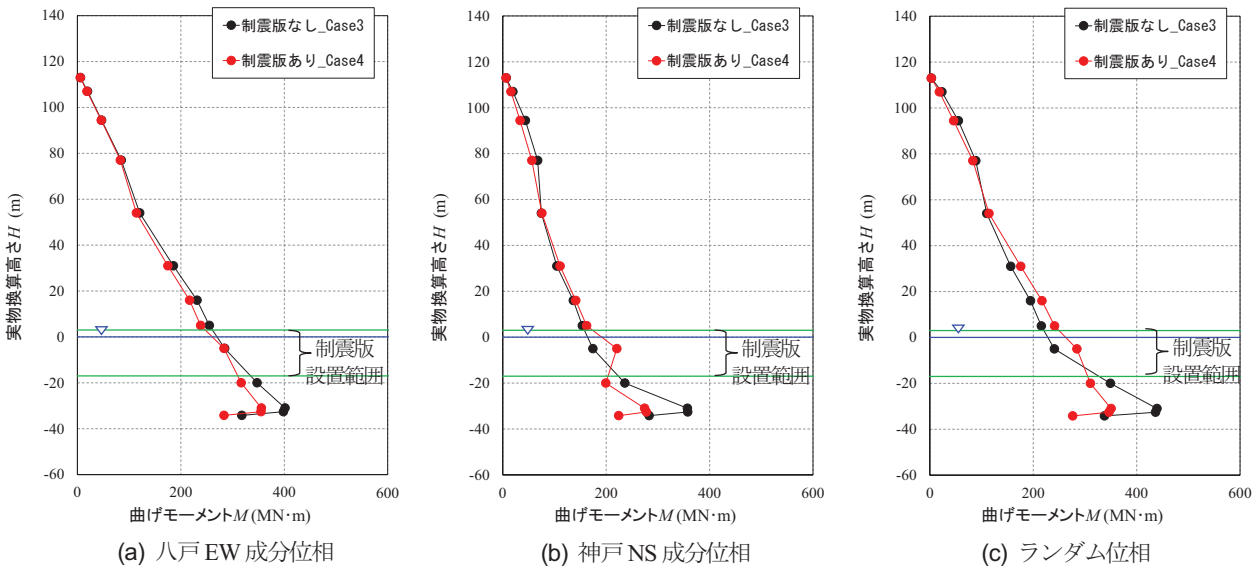


図-6 風車の曲げモーメント分布（地盤なし）

(2) 不規則波加振による風車のひずみ振幅スペクトル

不規則波加振による曲げモーメントの周期特性を確認するため、各ケースの曲げモーメント最大位置でのひずみ時刻歴をフーリエ変換し、得られた振幅スペクトルを図-8, 9に示す。図-8に示すように、地盤なしの実験では、1次モードが支配的であり、2次モードはそれに比べて極めて小さく、約1%程度であることがわかった。一方、図-9によると、地盤ありの実験では、2次モードは約1次モードの半分程度で、地盤なしの実験に比べて割合が大きくなっていることがわかった。このため、地盤ありの実験では制震版の効果が大きいことが考えられる。

(3) 正弦波加振による風車の曲げモーメント分布

図-10に正弦波加振による風車の曲げモーメント分布を示す。2次固有振動数で加振したため、地盤なしの実験においてCase3よりCase4の曲げモーメントが65%低減されていることが確認でき、制震版の効果が示された。

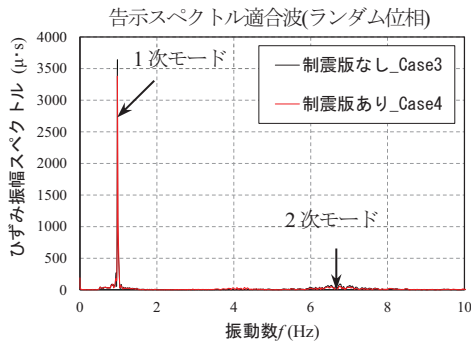


図-8 風車のモード形状 (地盤なし)

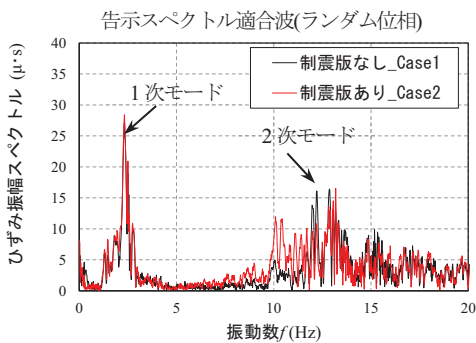


図-9 風車のモード形状 (地盤あり)

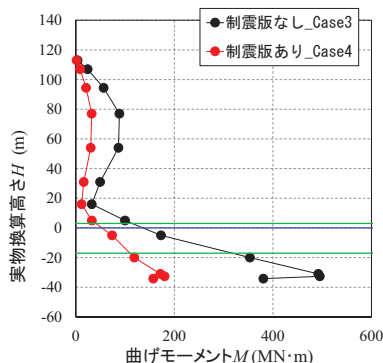


図-10 風車の曲げモーメント分布 (地盤なし)

(4) MPの挙動と制震版に作用する水圧

正弦波加振による振動台テーブルに対するMPの相対変位、相対速度、および制震版に作用する水圧の時刻歴を図-11, 12に示す。なお、相対速度は計測した相対変位から微分で求めており、変位および水圧の方向は図-13に示すように、MPが矢印の向きに変位した場合に正値を示し、水圧計に圧縮力が作用した場合に正値を示す。図-11によると、MPの変位に対して制震版外側に作用する水圧は位相がずれており、約90°程度であることがわかった。生じた位相差は制震版による減衰に寄与すると推測される。図-12によると、MPの速度が制震版外側の水圧と同じ位相であり、制震版内側の水圧と逆位相であるため、MPの動きに対して、水圧が抵抗していることが示された。また、図-11, 12に示すように、制震版内側に作用する水圧が外側より大きいことがわかった。その理由は制震版の遮蔽効果により、制震版内の液面変動が発生したからと考えられる。

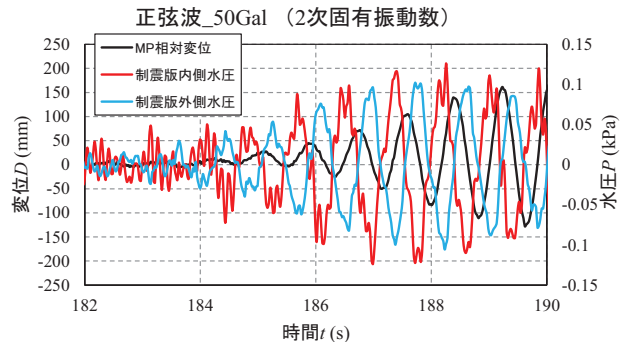


図-11 MP変位と水圧の時刻歴

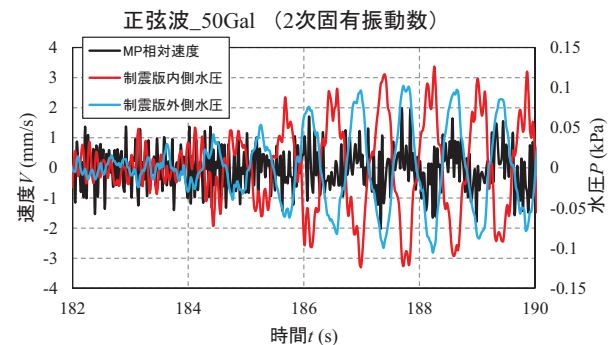


図-12 MP速度と水圧の時刻歴

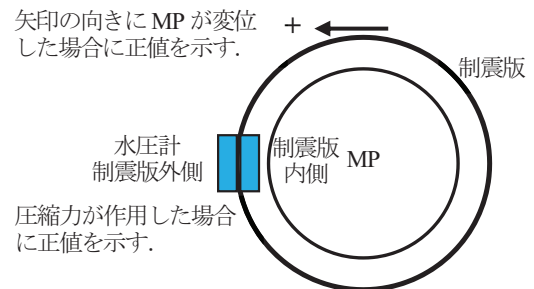


図-13 MP変位と制震版に作用する水圧の方向

(5) MP に作用する水の抵抗力

(4)の結果より, MP の変位に対して制震版に作用する水圧は抵抗していることから, 制震版の有無により MP に作用する単位高さあたりの水の抵抗力 F_p (制震版あり), F_m (制震版なし) を以下の式(1), (2)で試算した. なお, 式(1)と(2)ともに, 水の抵抗力を構造物に作用する水圧に断面積を乗じて算出した. MP の中心に対して水圧は対称であると仮定し, 2 を乗じている. また, 式(1)では制震版と MP の間の水面変動が直線分布であると仮定した. その結果, 図-14 に示すように, 制震版がある場合, MP と制震版の一体構造は水との接触面積が大きくなり, より大きな水の抵抗力を受けていることが考えられる.

$$F_p = 2 \times (P_{p,out} + P_{p,in}) \times D_p + 2 \times P_{p,in} \times D_m \quad (1)$$

$$F_m = 2 \times P_m \times D_m \quad (2)$$

ここに, $P_{p,out}$: 制震版外側に作用する水圧, $P_{p,in}$: 制震版内側に作用する水圧, D_p : 制震版外径, D_m : MP 外径, P_m : MP に作用する水圧である.

4. おわりに

本研究では, 水深 20m の 10MW 級風車を対象に, MP の周囲に円筒形の制震版を設置する構造を提案し, その耐震性能を確認するために水中振動台実験を実施した.

制震版を設置することにより, 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た. また, 制震版内に液面変動が発生し, 制震版の内側に発生する水圧は外側より大きいことを確認できた. MP および制震版に作用する抵抗力を水圧と構造物外径で乗じて試算を行ったが, より厳密な評価と検証は課題として残されている. 耐震性能に着目するのは本研究の目的ではあるが, 実用化に向けて制震版を設置する場所は既存の MP より径が大きくなるため, 波浪の作用を大きく受ける可能性があり, 今後は波浪の影響についても検討する必要がある.

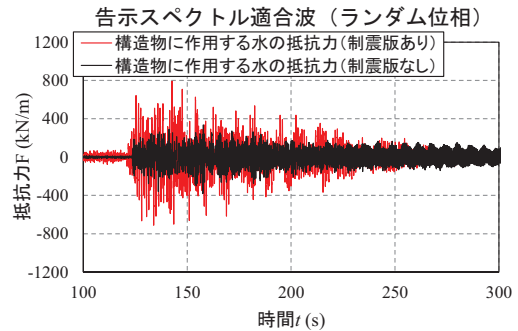


図-14 MP に作用する水の抵抗力

REFERENCES

- 1) 中原知洋, 上部達生, 三藤正明: 水の制震効果を付与した直杭式棧橋に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol.38, No.4, 1999. [Nakahara, T., Uwabe, T. and Mito, M.: A study on sea water seismic response control of pile-supported quay, *Transaction of Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol.38, No.4, 1999.]
- 2) 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.
- 3) 下迫 健一郎: 水理模型実験, コンクリート工学, Vol.39, No.9, pp.134-137, 2001. [Shimosako, K.: Hydraulic model experiment, *Transaction of Concrete Journal*, Vol.39, No.9, pp.134-137, 2001.]
- 4) 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.]

(Received February 9, 2023)

(Accepted May 11, 2023)

EXPERIMENTAL STUDY ON SEISMIC PERFORMANCE OF MONOPILE TYPE FOUNDATION OF OFFSHORE WIND TURBINE WITH UNDERWATER SEISMIC CONTROL PANEL

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

In addition to the increasing size of wind turbines, the outer diameter of monopile foundations tends to increase in Japan due to the need to consider the effects of seismic loading, which makes installation by SEP vessels, hammer blows, and factory fabrication a challenge. In this study, we propose a structure

in which a larger cylindrical underwater seismic control panel is installed around the monopile, partially submerged in water, and the panel vibrates horizontally with the monopile when subjected to external forces, reducing the cross-sectional force of the monopile through the interaction of the panel and water. To confirm the seismic behavior of the proposed structure, underwater shaking table experiments were conducted with and without ground. As a result, it was found that the seismic performance of the proposed structure is particularly high for the second-order mode of wind turbines. It is also shown that the water resistance force acting on the structure increases due to the water surface fluctuation within the seismic control panel.