

水中制震版を適用した洋上風車モノパイル式基礎の液面動揺による制震効果に関する実験的検討

吉田 誠¹・白 可²・三好 俊康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: makoto.yoshida@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の周囲にひと回り大きな円筒形的水中制震版を一部没水させて設置する制震構造を提案している。本構造は、振動時の水との相互作用によりモノパイルに生じる地震時断面力の低減を期待するものであり、水中振動台実験によりその効果が確認されている。しかし、その制震メカニズムは十分には明らかにされていない。そこで本研究では、制震機構の一つとして水中制震版ーモノパイル間の水の液面動揺に着目し、制震版の周辺を抽出した模型振動実験を実施して液面動揺による振動特性について検討した。検討結果より、液面動揺による流体力が地震時抵抗力として寄与すること、数値解析において液面揺動による流体力を質点、ばねおよびダンパーでモデル化できる可能性があることを明らかにした。

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

1. はじめに

地球温暖化対策としてカーボンニュートラルの実現に向けた取り組みが世界中で行われており、その1つとして再生可能エネルギーである風力発電の導入が進められている。特に周囲が海に囲まれている日本は洋上風力発電のポテンシャルが高く、政府は2030年までに10GW、2040年までに30～40GWの案件形成を目指している¹⁾。一方、洋上風車に適用される基礎として経済性に優れたモノパイル（以下、MPと称す）が用いられることが多いが、近年の風車大型化にともない、MPの大口径化が進んでいる。そのため、MPの製作工場が限定され、作業船や施工機械の大型化が求められるようになり、MPの製作および施工が困難な状況になりつつある。

著者らは、MPの大口径化対策として、図-1に示すように洋上風車モノパイル式基礎の周囲にひと回り大きな円筒形的水中制震版（以下、制震版と称す）を一部没水させて設置する制震構造を提案している。本構造は、振動

時の水との相互作用によりモノパイルに生じる地震時断面力の低減を期待するものである。その効果を確認するため、白ら²⁾は風車全体をモデル化した1G場の水中振動台実験を実施し、制震版を設置することで風車全体の曲

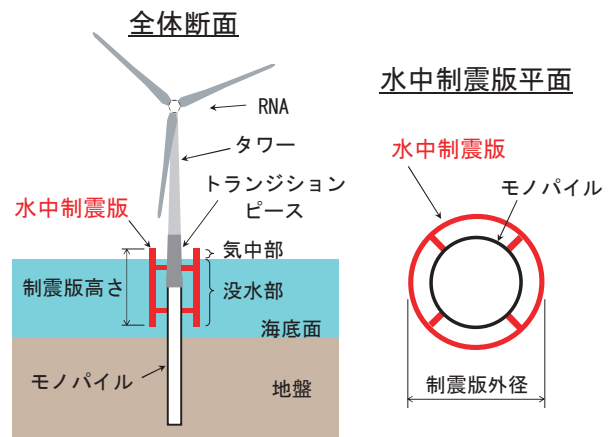


図-1 水中制震版による制震構造の概念

げモーメントが低減し、特に風車の2次モードに対して効果が高いことを明らかにしている。このことは、風車の水面付近に制震版を設置することで、当該位置でのMP変位が抑制され、2次モードの振動が小さくなった結果であると推測される。振動時の水との相互作用による制震機構として、図-2に示すように、制震版と水との相対速度に依存する、制震版外面に作用する流体力(制震機構1)、制震版-MP間の付加質量による抵抗力および風車全体の長周期化(制震機構2)、制震版-MP間の水の液面動揺による流体力(制震機構3)の3つを想定しているが、その制震メカニズムは十分には明らかにされていない。

水中制震版に関する研究として、中原³⁾や三藤⁴⁾は、栈橋式岸壁の上部工に制震版を一部没水させて設置し、制震版と水の連成効果により地震時慣性力を低減させる構造を提案している。その制震効果を把握するため模型振動実験を実施し、制震版の設置により栈橋上部工変位や杭頭ひずみが大幅に低減すること、さらに中原らは減衰が大きくなること、付加質量効果により栈橋の固有周期が長くなることを明らかにしている。

一方、液面動揺に関する研究として、若原および大築⁵⁾は超高層建築物に適用するTuned Liquid Damper (以下、TLDと称す)の振動台実験を実施している。TLDは、容器に入れた液体のスロッシング現象を利用し、外力を受けた建物の振動を抑制する制震構造である。同実験によると、計測された液面動揺による流体力を流体質量による慣性力で除した周波数応答関数が、1質点系の周波数応答で近似できることを明らかにしている。また、二重円筒部の地震時の液面動揺に関する研究として、藤田⁶⁾は模型振動実験、速度ポテンシャルによる解析解の導出および3次元FEMを実施し、二重円筒部のスロッシング挙動を明らかにするとともに、解析による応答波高および圧力が実験値と良い対応を示し、解析手法が信頼性を有していることを確認している。

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制震機構の一つとして制震版-MP間の水の液面動揺に着目し、制震版周辺を抽出した水中振動台実験を実施して液面動揺による振動特性について検討した。

2. 水中振動台実験の概要

(1) 実験装置

加振装置は、15m×15mの大型水槽の底面に直径5.5mの振動台を設置した大型水中振動台であり、水中に構築される構造物の模型振動実験が可能である。3次元6自由度の加振性能を有し、最大積載重量は60tである。定格積載重量20t以下の場合、最大加速度は±2Gであり、このときの最大変位は±200mmである。

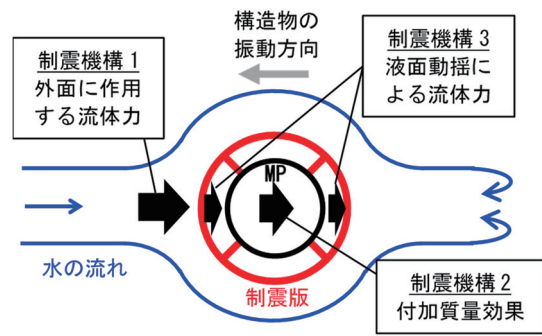


図-2 振動時の水との相互作用による制震機構の概念

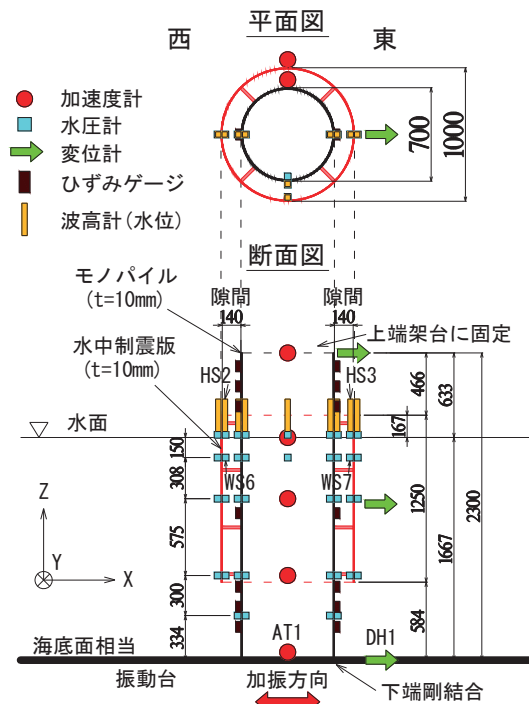


図-3 実験模型断面図(制震版あり)

表-1 相似則

物理量	実物/模型	縮尺
長さ	λ	12
時間	$\lambda^{0.5}$	3.46
ひずみ	1	1
質量	λ^3	1,728
曲げ剛性	λ^5	248,832

(2) 実験対象モデルおよび実験断面

実験対象モデルは10MW級洋上風車とし、水深20mを想定した。MP外径は8.5mとし、制震版は外径12m、高さは15mのうち13m没水するものとした。実験模型断面を図-3に示す。模型の縮尺は大型水中振動台の大きさを考慮して1/12とし、相似則はフルード則を適用した(表

-1). 制震版-MP 間の水の液面動揺に着目するため、実験では海底面から制震版を含む高さまでを抽出し、剛な模型を想定した。液面動揺の挙動を目視確認するため、MP および制震版は市販の透明なアクリルパイプによる円筒模型とし、厚さはそれぞれ 10mm とした。MP 下端部はリブで補強したフランジを設けて振動台にボルトで固定し剛結合した。MP 上端部は、周囲に設置したアルミフレーム架台にボルトで固定し剛結合した。

(3) 実験ケース

実験ケースは、制震版有無および液面動揺有無の違いについて検討するため、表-2に示す3ケースとした。実験の様子を写真-1に示す。なお、CASE2では液面動揺が生じないように、写真-2に示すように制震版-MP間の水面に発泡スチロールを設置した。

表-2 実験ケース

ケース	水中制震版	液面動揺
CASE1	なし	—
CASE2	あり	なし
CASE3	あり	あり

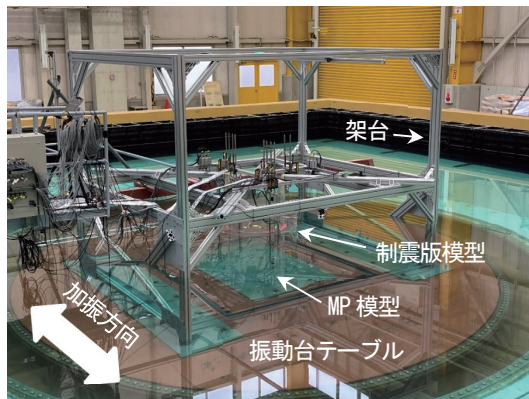


写真-1 実験の様子 (CASE3)

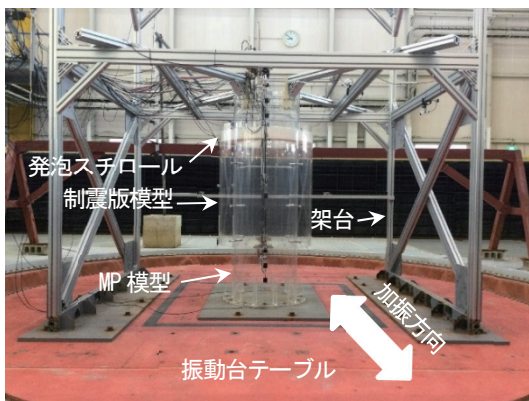


写真-2 発泡スチロール設置状況 (CASE2)

表-3 加振条件

加振波	振動数(Hz)	加速度(Gal)
スイープ波	0.7~70 (加振中漸増)	30
正弦波	0.71, 0.76, 0.79, 0.84, 0.96	10, 20, 30, 50
不規則波	八戸位相波	334
	神戸位相波	428
	ランダム位相波	362

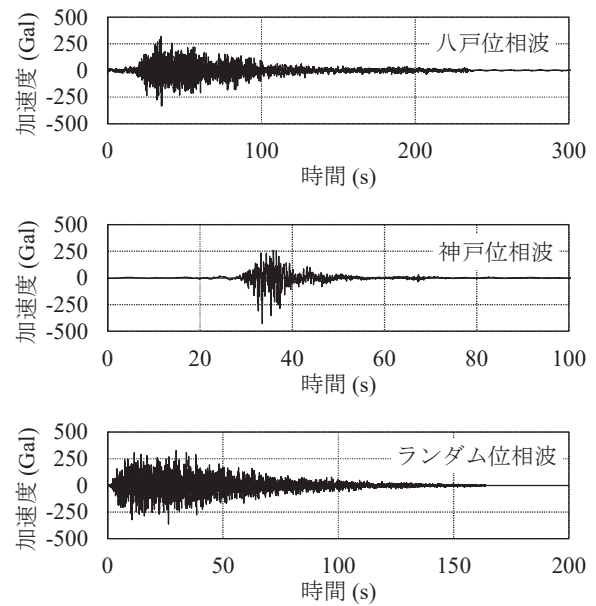


図-4 不規則波の時刻歴波形 (実物スケール)

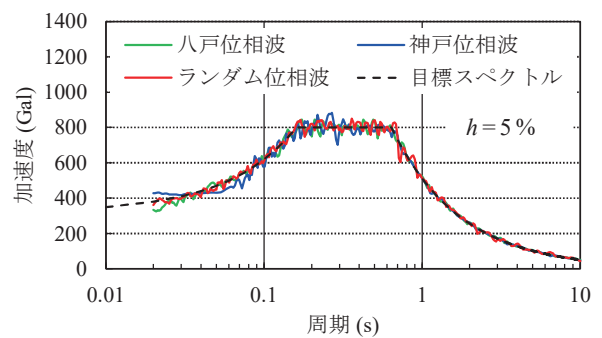


図-5 不規則波の加速度応答スペクトル (実物スケール)

(4) 加振波

加振波は、表-3に示すように液面動揺の固有振動数把握のためのスイープ波、基本的な振動特性把握のための正弦波および設計で用いられる不規則波とした。正弦波は波数20波(前後各5波のテーパ部を含めると30波)とし、振動数および加速度を変えて加振した。不規則波の時刻歴波形を図-4に、加速度応答スペクトルを図-5に示す。不規則波は、統一的解説⁷⁾に基づき、極めて稀に発生する地

震動の目標スペクトルに適合させたスペクトル適合波とし、八戸EW位相、神戸NS位相およびランダム位相の3波とした。なお実験では、相似則に従い時間軸を1/3.46に圧縮したものを加振波として使用した。

(5) 計測内容

図-3 に示す計測機器により、振動台の加速度・変位、MP および制震版の加速度・変位・ひずみ、MP および制震版に作用する水圧、MP および制震版の近傍の水位を計測した。なお、MP の曲げひずみを算出できるように、MP の同一高さの東西外面にひずみゲージを一枚ずつ貼り付けた。サンプリング周波数は、スイープ波加振では1,000Hz、正弦波および不規則波加振では500Hzとした。

3. 実験結果

(1) 液面動揺の固有振動数

CASE2 と CASE3 のスイープ波加振による制震版内側の水圧(W57)のフーリエスペクトルを図-6 に示す。同図によると、液面動揺なしに対して液面動揺ありでは0.76 Hzの成分が突出して現れている。吉田ら⁸⁾は速度ポテンシャル理論に基づき二重円筒構造物を対象とした二重円筒間の液面動揺による固有円振動数の算出方法を示しており、同方法により求めた1次固有振動数の理論値と前述の振動数0.76 Hzは一致する。

CASE3 の正弦波(0.76 Hz, 10 Gal)加振時における制震版—MP 間の水位分布を図-7 に示す。同図には、HS3 の水位ピーク時 ($t = 30.48$ s)、その1/4周期後 ($t = 30.81$ s)と1/2周期後 ($t = 31.14$ s)の水位分布をそれぞれ示している。同図によると、制震版—MP 間の水面は、概ね平面を保持したまま動揺していることがわかる。

以上より、制震版—MP 間の液面動揺は1次モードが卓越すると判断される。

(2) 正弦波加振時の時刻歴波形

CASE3 の正弦波(0.76 Hz, 10 Gal)加振時の時刻歴比較を図-8 に示す。同図によると、制震版—MP 間の制震版近傍の水位(HS2, HS3)および水圧(W56, W57)は、加振中も増加する傾向を示し、15波目程度(30.5s付近)でピークに達している。

水圧W57最大時(30.63s)に着目すると、西側の水位HS2が112 mm 下がり、水圧W56が-1.1 kPaであることから、水位低下によるその静水圧相当の圧力分だけ減少したと判断される。東側の水位HS3は148 mm 上昇しており、その静水圧相当の圧力は1.5 kPaとなるが、対して近傍の水圧W57は0.74 kPaであり5割程度の値となった。

一方、水圧W57最大時の振動台水平変位はほぼゼロで

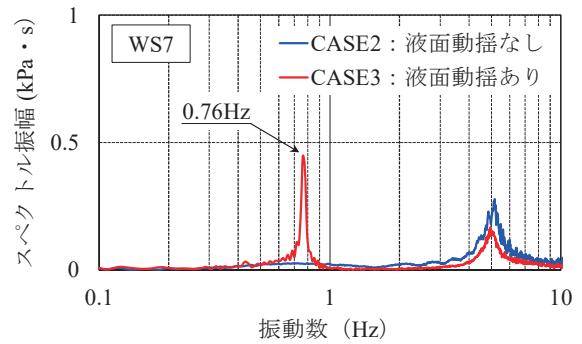


図-6 スイープ波加振による水圧フーリエスペクトル (WS7)

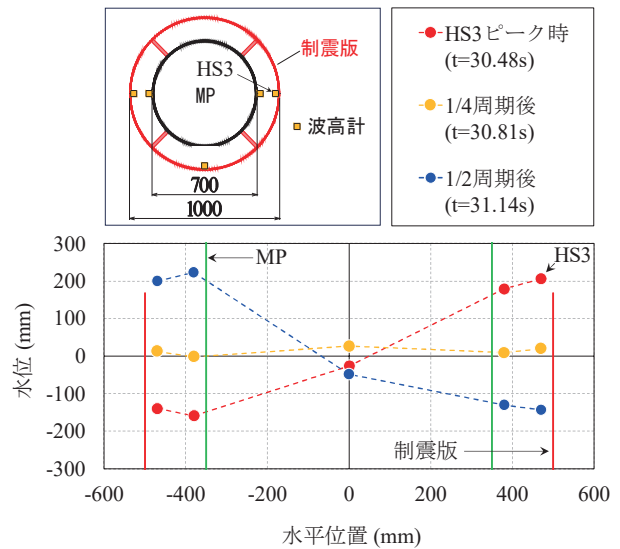


図-7 制震版—MP 間の水位分布
(CASE3 : 正弦波 0.76 Hz, 10 Gal)

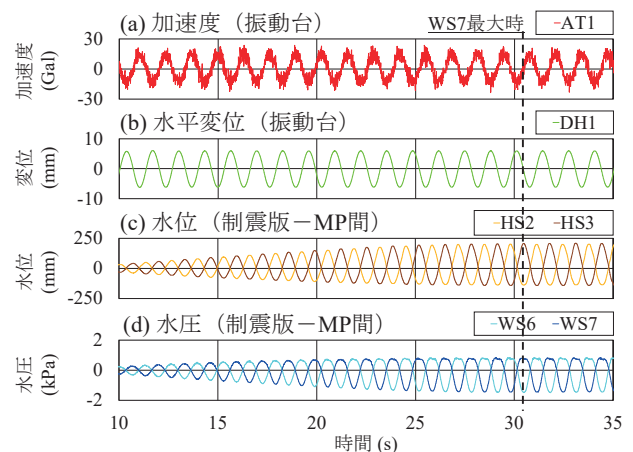


図-8 時刻歴比較 (CASE3 : 正弦波 0.76 Hz, 10 Gal)

あり、水位・水圧と振動台変位の位相差が約90度であることから、液面動揺による流体力が地震時抵抗力として寄与することが示唆される。

(3) 正弦波加振時の液面動揺による流体力

正弦波加振時に制震版—MP 間に生じた流体力を図-9 に示す。横軸は正弦波の加振振動数である。縦軸の流体力は、図-10 に示すような WS7 の水圧最大時における制震版内側および MP 外側の水圧分布(加振前からの増分値)に基づき、まず鉛直方向に積分して単位奥行あたりの流体力を求め、次に奥行き円周方向に積分して求めたものである。なお、水圧分布形状は、水圧計による計測値に加え、次のように仮定して求めた。すなわち、①液面動揺は 1 次モードで振動する、②図-7 の水位分布に基づき制震版中央($x = 0$ mm)における水圧増分を 0 kPa とする、③波高計による水位ピークの位置において水圧を 0 kPa とし、その直下の水圧計による値と線形近似する、④制震版下端位置の水圧は、直上の水圧計の水圧と等しいものとする、⑤奥行き円周方向の水圧増分は水位に比例する。図-9 によると、液面動揺ありでは、液面動揺なしと比べて 1 次固有振動数に近いほど流体力が大きく、最大で約 4 倍の値を示している。

(4) 不規則波加振時の MP への作用外力合力

不規則波加振時の、MP のひずみから求めた MP への作用外力合力の最大値を図-11 に示す。作用外力合力は、MP のひずみから曲げモーメント分布、せん断力分布の順に求め、MP 上下端部のせん断力の差より求めた。同図によると、作用外力の制震版有無の差(CASE1 と CASE3 の差)は平均で 3.4 kN であり、これが制震版による地震時抵抗力増分と考えられる。このうち、液面動揺分の外力増分は液面動揺有無の差(CASE2 と CASE3 の差)2.0 kN であり、制震版による全抵抗力増分の約 6 割を占める。

(5) 液面動揺による流体力の周波数応答関数

CASE3 の正弦波加振を対象に、制震版に作用する流体力を制震版—MP 間の水の慣性力で除して求めた応答倍率を各加振振動数比ごとに示した周波数応答関数を図-12 に示す。ここで、横軸の振動数比は、正弦波の加振振動数 f を液面動揺の 1 次固有振動数 $f_0 = 0.76$ Hz で除した値である。同図には、1 質点系の周波数応答関数の式(1)により実験結果に近似させた曲線を破線で示している。同図から、制震版—MP 間の液面動揺の振動特性は、式(1)中の等価減衰定数 h を同定することで 1 質点系の周波数応答関数で近似できることがわかる。このことから、図-13 に示すように、洋上風車設計の数値解析に用いられる梁ばねモデルにおいて、制震版—MP 間の水を質点でモデル化し、さらにばねとダンパーで基礎構造物と結合することにより液面揺動による流体力を考慮できると推察される。

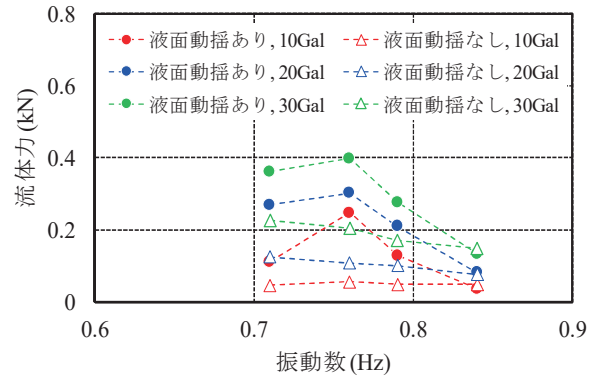


図-9 液面動揺による流体力(制震版—MP 間, WS7 最大時)

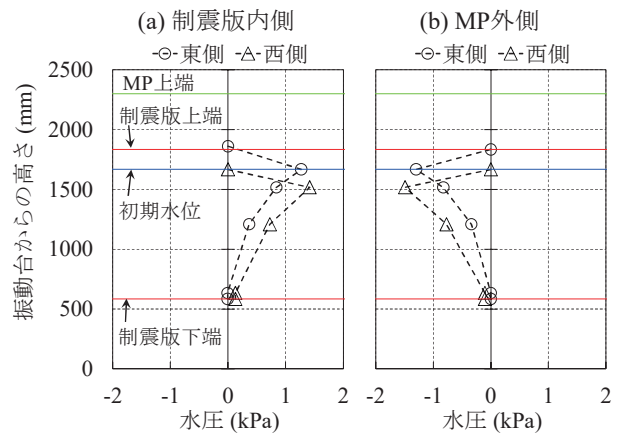


図-10 CASE3 の正弦波 (0.76 Hz, 10 Gal) 加振時の水圧分布 (制震版—MP 間, WS7 最大時, 東向きが正)

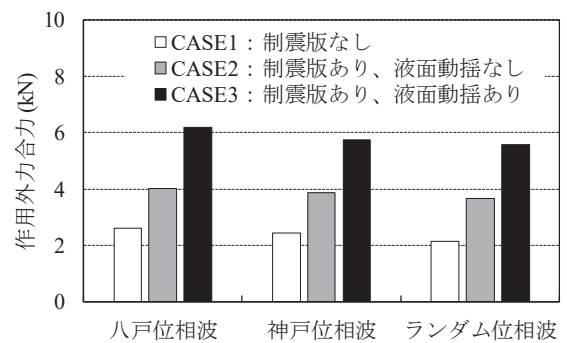


図-11 MP への作用合力最大値(不規則波)

$$R = \frac{1 + \left(2h \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + \left(2h \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (1)$$

ここで、 R : 応答倍率、 h : 等価減衰定数
 ω : 加振正弦波の角振動数 (rad)
 ω_n : n 次モードの角固有振動数 (rad)

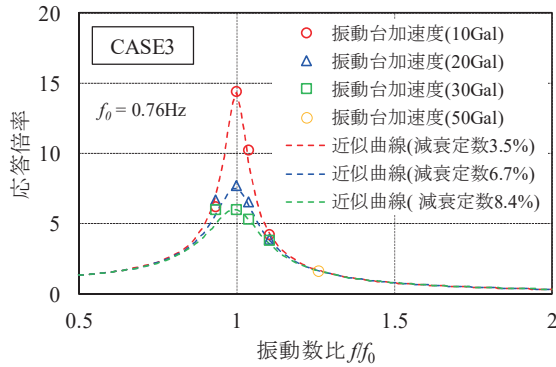


図-12 液面動揺による流体力の周波数応答関数

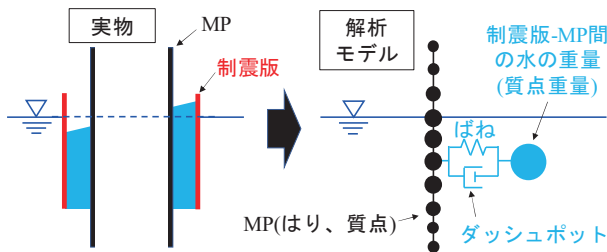


図-13 制震版-MP 間の液面動揺による流体力のモデル化方法概念図

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制震機構の一つとして制震版-MP 間の水の液面動揺に着目し、制震版の周辺を抽出した水中振動台実験を実施して液面動揺による振動特性について検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) スイープ波加振および正弦波加振の結果によると、制震版-MP 間の液面動揺は1次モードが卓越すると判断され、その1次固有振動数は0.76Hz となった。
- (2) 正弦波加振時の時刻歴比較によると、制震版-MP 間の水位・水圧と振動台変位との位相差は約 90 度だったことから、液面動揺による流体力が地震時抵抗力として寄与することが示唆される。
- (3) 正弦波加振時の制震版-MP 間の液面動揺による水圧は、水位低下時はその静水圧相当の圧力分減少するが、水位上昇時はその静水圧相当の 5 割程度の圧力増加となった。また、制震版-MP 間に生じた流体力は、液面動揺ありでは、液面動揺なしと比べて加振振動数が1次固有振動数に近いほど大きく、最大で約 4 倍の値を示す結果となった。
- (4) 不規則波加振時の MP のひずみから求めた MP への作用外力合力の最大値によると、制震版を適用した場

合の地震時の全抵抗力のうち、液面動揺分の抵抗力が約 6 割を占める結果が示された。

- (5) 制震版に作用する流体力を制震版-MP 間の水の慣性力で除して求めた周波数応答関数によると、制震版-MP 間の液面動揺の振動特性は、等価減衰定数を同定することで 1 質点系の周波数応答関数で近似できる結果が示された。このことから、洋上風車設計の数値解析に用いられる梁ばねモデルにおいて、制震版-MP 間の水を質点でモデル化し、さらにばねとダンパーで基礎構造物と結合することにより液面動揺による流体力を考慮できると推察される。

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を設置する構造を提案しているが、波浪や潮流の影響を受けやすくなることが懸念される。この点に関して、三浦ら⁹⁾は、制震版を有する MP の水理模型実験および数値解析を実施し、波浪に対し、実験による断面力が数値解析による断面力と同等以下であることを確認しており、骨組解析で通常想定する外径増加や質量増加などの影響以上には悪影響がない、すなわち制震版を設置することで過大な断面力が生じるといった悪影響がないことを確認している。このことから、制震版適用時の波浪の影響については通常の設計方法で評価することが可能と判断される。

今後は、水中制震版を 3 次元でモデル化した数値解析等を実施して液面動揺による流体力を詳細に把握し、その評価精度を向上させる必要がある。また、洋上風車設計の数値解析に用いられる梁ばねモデルに適用する液面動揺のモデルについて、その妥当性を検証する必要がある。

REFERENCES

- 1) 洋上風力の産業競争力に向けた官民協議会：洋上風力ビジョン（第1次），2020. [Public-Private Council on Enhancement of Industrial Competitiveness for Offshore Wind Power Generation: Vision for Offshore Wind Power Industry (1st), 2020.]
- 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 B3（海洋開発），Vol. 79, No. 18, 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, *Annual Journal of Civil Engineering in the Ocean*, Vol. 79, No. 18, 2023.]
- 3) 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, pp.49-162, 1999. [Nakahara, T., Uwabe, T., and Mito, M.: A Study on Sea Water Seismic Response Control of Pile-supported Quay, *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol. 38, No.4, pp.49-162,

- 1999.]
- 4) 三藤正明, 上部達生, 中原知洋, 大山洋志: 直杭式棧橋の振動制御技術に関する実験的研究, 第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.997-1000, 土木学会, 1999. [Mito, M., Uwabe, T., Nakahara, T. and Ohyama, H.: An Experimental Study on Vibration Control Technology of Pile-supported Quay(Translated from Japanese.), *Proceedings of the 25th JSCE Earthquake Engineering Symposium*, pp.997-1000, 1999.]
- 5) 若原敏裕, 大築民夫: Tuned Liquid Damper による超高層建物の振動制御, 清水建設研究報告, 第 58 号, pp. 41-52, 1993. [Wakahara, T. and Otsuki, T.: Vibration Control of Wind Induced Response of a Tall Building using Tuned Liquid Damper, *Technical research report of Shimizu Construction Co., Ltd.*, Vol. 58, pp.41-52, 1993.]
- 6) 藤田勝久, 伊藤智博, 岡田敬三: 二重円筒アニュラス部のスロッシングの地震応答(正弦波過渡応答), 日本機械学会論文集 C 編, 52 巻, 476 号, pp.1132-1140, 1986. [Fujita, K., Ito, T. and Okada, K.: Seismic response of liquid sloshing in the annular region formed by coaxial circular cylinders : Transient response for sine wave, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C*, Vol. 52, No. 476, pp. 1132-1140, 1986.]
- 7) 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解説(令和 2 年 3 月版), 2020. [Offshore Wind Power Generation Facilities Review Committee: Unified Commentary on Technical Standards for Offshore Wind Power Generation Facilities(March 2020 edition), 2020.]
- 8) 吉田聖一, 齊藤雅之, 三好俊郎: 多重円筒タンクのスロッシング解析, 圧力技術, Vol. 25, No. 3, pp. 137-143, 1987. [Yoshida, S., Saito, M., and Miyoshi, T. : An Earthquake Sloshing Analysis of the Multi - Walled Coaxial Cylindrical Tank, *JHPI*, Vol. 79, No. 18, pp. 137-143, 2023.]
- 9) 三浦成久, 三好俊康, 吉田誠, 水野辰哉, 田口裕之, 肥後陽介, 音田慎一郎, 澤村康生: 水中制震版を適用した洋上風車モノパイル式基礎の耐波浪性能に関する実験的研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 2024(投稿中). [Miura, N., Miyoshi, T., Yoshida, M., Mizuno T., Taguchi, H., Higo, Y., Onda, S. and Sawamura, Y.: EXPERIMENTAL STUDY ON WAVE RESISTANCE PERFORMANCE OF MONOPILE TYPE FOUNDATION OF OFFSHORE WIND TURBINE WITH UNDERWATER SEISMIC CONTROL PANEL, *Annual Journal of Civil Engineering in the Ocean*, 2024(submitted).]

(Received February 6, 2024)

(Accepted May 13, 2024)

EXPERIMENTAL STUDY ON SEISMIC CONTROL EFFECT DUE TO LIQUID MOTION AROUND MONOPILE TYPE FOUNDATION OF OFFSHORE WIND TURBINE WITH UNDERWATER SEISMIC CONTROL PANEL

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

The authors have proposed a seismic control structure in which a larger cylindrical underwater seismic control panel is partially submerged around the monopile foundation of an offshore wind turbine. This structure is expected to reduce the seismic cross-sectional force generated in the monopile by the interaction with water during vibration, and its effectiveness has been confirmed by underwater shaking table tests. However, the mechanism of seismic control has not been fully clarified. In this study, we focused on the liquid motion of water between the underwater seismic control panel and the monopile as one of the seismic control mechanisms, and conducted shaking table tests around the seismic control plate to investigate the vibration characteristics due to the liquid motion. From the results, it was clarified that the fluid force due to the liquid motion contributes to the seismic resistance and this force can be modeled by a mass point, a spring and a damper in the numerical analysis.