

水中制震版を適用した洋上風車モノパイル式基礎の動的特性に関する水中振動台実験

五洋建設（株） 正会員 ○白可・松本正一郎・三好俊康・吉田誠・三浦成久・宇野州彦
京都大学大学院 正会員 肥後陽介・音田慎一郎・澤村康生

1. はじめに

近年、風車の大型化に伴い、モノパイル式基礎の外径は増大し、工場製作、海上での運搬・施工やハンマーでの打撃などが課題になっている。そこで、本研究で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的水中制震版（以下、制震版）を設置し、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。提案する構造の動的特性および効果のある形状を確認するために、MP の水中部直径や制震版の高さをパラメータとした水中振動台実験を実施した。

2. 実験概要

本研究では、水深 20m の 10MW 級風車を対象に、中原ら¹⁾の研究を参考にし、表-1 に示すフルードの相似則²⁾を適用した縮尺 1/20 の水中振動台実験を行った。実験模型を写真-1、2 に示す。実物の MP は直径 8.5m、板厚 90mm を想定し、制震版は直径 12m、高さ 20m を基本とした。制震版の効果に着目するため地盤はモデル化していない。タワーと MP は、曲げ剛性 EI の相似則にしたがって既製品の鋼管でモデル化し、鋼管の直径が変化する箇所は、接合鋼板を介して結合した。水中部の付加質量を考慮するため、鋼管の周囲に発泡スチロールを設置する実験も行った。MP は地中部 1/β の範囲までモデル化し下端を土槽に固定した。試験体ケースは、表-2 に示すように、制震版ありの Case3 に対して、発泡スチロールなしの Case1、制震版なしの Case2、制震版高さを半分にした Case4 で計 4 ケースでした。Case3 の実験模型断面を図-1 に示す。風車の固有振動数と断面力低減効果を確認するために、スイープ波加振、および正弦波加振を実施した。スイープ波加振より、模型の固有振動数 f は 1 次で約 1Hz、2 次で約 7Hz であった。正弦波加振は 1Hz、7Hz を振動数とし、波数として 20 波、加速度振幅 0.3、 1.0m/s^2 の条件で実施した。

表-1 相似則²⁾

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	λ/λ	1
質量	M	λ^3	8,000
曲げ剛性	EI	λ^5	3,200,000

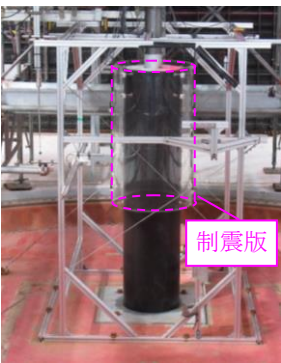
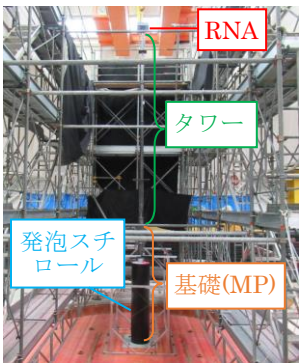


写真-1 模型外観（制震版なし） 写真-2 制震版設置状況

表-2 試験体ケース一覧

ケース	制震版諸元		発泡スチロール	MP下端直径 (mm)	水中部直径 (mm)	備考
	直径 (mm)	高さ (mm)				
Case1	—	—	なし	165.2	165.2	発泡スチロールなし
Case2	—	—	あり	425	425	制震版なし
Case3	600	1000	あり	425	600	基本ケース
Case4	600	500	あり	425	600	制震版高さの違い

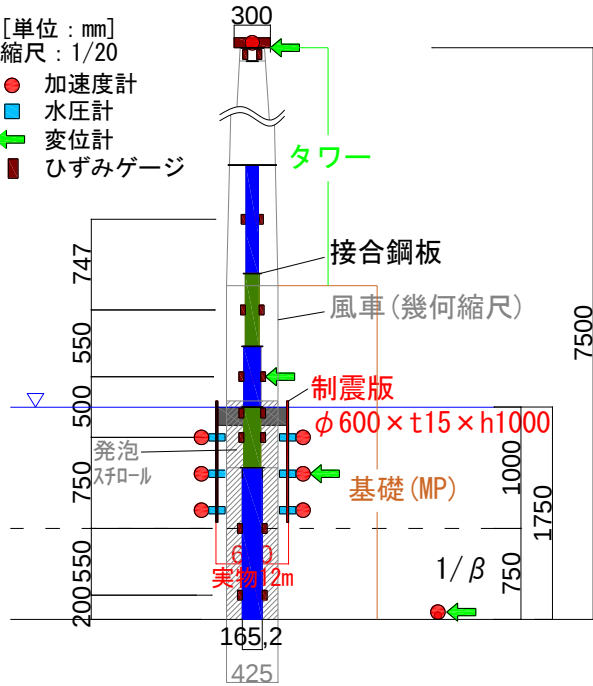


図-1 実験模型断面図（Case3：基本ケース）

キーワード 水中制震版、断面力低減効果、洋上風車モノパイル式基礎、水中振動台実験

連絡先 〒112-8560 東京都文京区後楽 2-2-8、五洋建設（株） 洋上風力事業本部技術部、TEL 03-3817-7587

3. 実験結果及び考察

スイープ波加振による加速度応答倍率を表-3、図-2 に示す。なお、加速度応答倍率は、スイープ波加振で得られた風車頂部と振動台テーブルの加速度時刻歴をそれぞれフーリエ変換して振動数ごとの加速度振幅スペクトルを計算し、風車頂部の値を振動台テーブルの値で除して求めたものである。表-3、図-2 によると、加速度応答倍率のピーク値は、1 次モードでは制震版の有無による明確な差異は見られないが、2 次モードでは制震版ありの Case3 が制震版なしの Case2 と比べて 60%低減されており、制震版による加速度低減効果は 2 次モードに対して発揮されていることがわかる。

正弦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-3 に示す。なお、以下に示す曲げモーメントはすべて実物スケールに変換したものである。同図によると、Case3 で発生した曲げモーメントは、Case2 に対して制震版下端位置において 1 次モードで 15%、2 次モードで 65%低減されたことから、制震版による断面力低減効果が示された。また、1 次モードに比べ 2 次モードの低減率が高くなる理由としては、それぞれのモードが表す形状が関係していると考えられる。2 次モードは、制震版設置付近で大きくなる振動性状であり、水の抵抗を受けやすくなることから、制震版設置による断面力の低減効果がより現れているものと推察される。1Hz の正弦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-4 に示す。同図によると、MP の水中部直径が大きいほど、曲げモーメントが低減される傾向を示しており、低減効果が高いことがわかる。また、Case4 に比べて制震版高さが高い Case3 に発生した曲げモーメントが小さいことも示された。

4. まとめ

本研究では、水深 20m の 10MW 級風車を対象に、MP の周囲に制震版を設置する構造の動的特性を確認するために水中振動台実験を行った。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たことや特に 2 次モードに対して効果が高いことが分かった。また、制震版の直径が大きいほど、制震版の高さが高いほど、断面力の低減効果が高いことが示唆された。今後は解析的な検討を進め、上記構造の最適化検討も行う予定である。

表-3 スイープ波加振による加速度応答倍率

ケース	1次モード			2次モード			備考
	固有振動数 (Hz)	加速度応答倍率	応答倍率の低減率	固有振動数 (Hz)	加速度応答倍率	応答倍率の低減率	
Case2	0.97	107.72	—	6.90	12.74	—	制震版なし
Case3	0.99	120.02	-11%	6.93	5.13	60%	制震版あり

※ 応答倍率の低減率はCase2に対してCase3の低減率を示すものである。

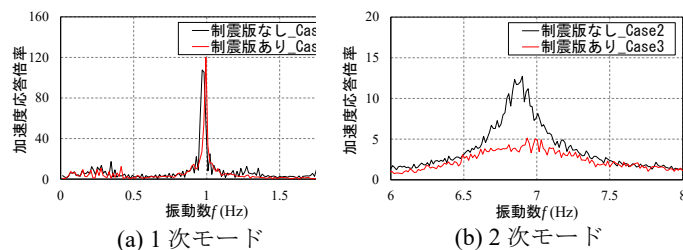


図-2 スイープ波加振による加速度応答倍率

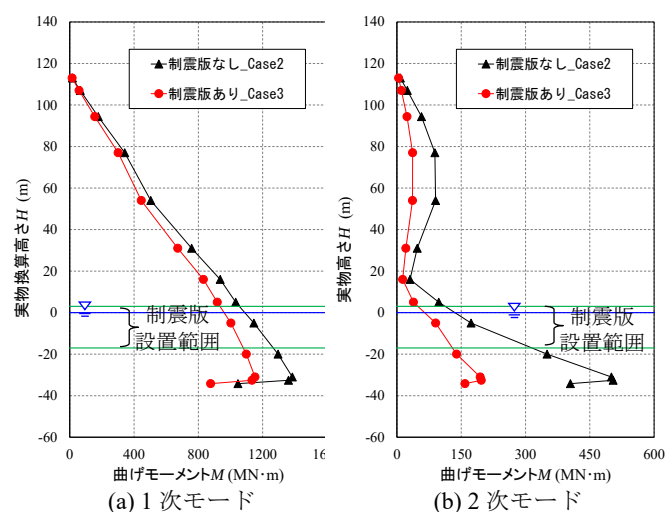


図-3 風車曲げモーメント分布（正弦波 1Hz, 7Hz）

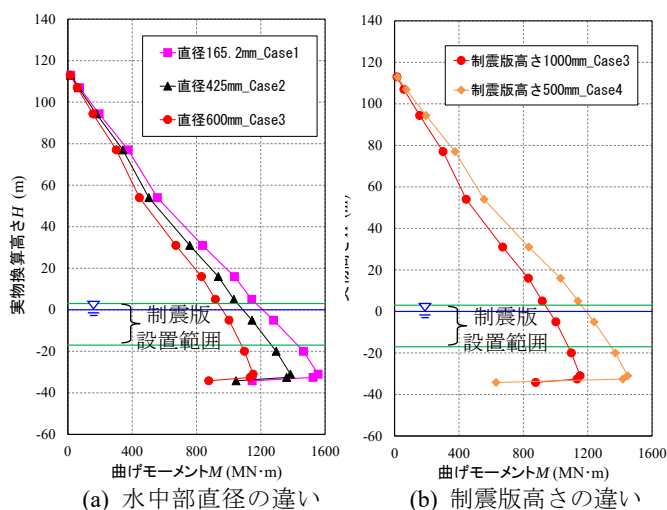


図-4 風車曲げモーメント分布（正弦波 1Hz）

参考文献

- 1) 中原ら：水の制震効果を付与した直立式栈橋に関する研究，港湾技術研究所報告，Vol.38，No.4，1999.
- 2) 下迫 健一郎：水理模型実験，コンクリート工学，Vol.39，No.9，2001.