

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

三浦 成久¹・三好 俊康²・吉田 誠²・水野 辰哉³・
田口 裕之²・肥後 陽介⁴・音田 慎一郎⁴・澤村 康生⁵

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: Naruhisa.Miura@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 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

⁴ 正会員 京都大学 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)

⁵ 正会員 京都大学 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)

風車の大型化に伴い、洋上風力発電において主要な基礎形式であるモノパイル（以下、MP）は、特に日本では地震荷重の増加により大型化する傾向にあり、SEP 船での施工などが課題となっている。MP 基礎の地震時断面力を低減させる構造の一案として、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する構造が提案されている。しかし、制震版設置箇所は既存の MP に比べ、外径増大による波浪作用増大が懸念され、波浪の影響検討が課題である。本研究では、制震版を有する MP 基礎の耐波浪性能について、水理模型実験と動的解析に基づく MP 基礎基部の曲げひずみの比較により考察した。その結果、制震版を有する MP には、基礎設計上で通常想定する外径増大等による影響以外には耐波浪性能に悪影響がないことが確認された。

Key Words : *underwater seismic control panel, hydraulic model experiment, offshore wind turbine monopile foundation, flexible structural model*

1. はじめに（背景）

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。一方、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）への作用断面力は増大し、特に日本では地震の影響により MP が大型化する傾向にあり、大型化する MP の、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。

白ほか¹⁾は、中原ほか²⁾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している。しかし、制震版を設置する箇所は既存の MP より外径が増大するため、波浪の作用も増大する可能性があり、波浪の影響についての検討が課題となっている。

MP のような円柱構造物の波浪に対する動的応答については、小森ほか³⁾が、「剛構造」と「柔構造」の模型の不規則波に対する実験により考察している。また、石田・

石川⁴⁾が、規則波による大口径柱体の動的応答を、解析と実験で比較している。しかしながら、いずれの研究も制震版などの付属物の影響は考慮していない。

本研究では、制震版を有する MP 構造の耐波浪性能に関して、①常時波浪時に MP 基礎に作用する疲労荷重と、②高波浪時に MP 基礎に作用する荷重が、制震版の有無によりどのように変化するか、特に断面拡張以外の影響があるのかという視点で二次元断面水槽による水理模型実験を実施した。また、実設計への適用を見据え、動的な時刻歴解析を実施し、実験との比較を行った。これらの実験結果と動的解析に基づき、MP 模型基部の曲げひずみを比較することにより、制震版の有無による耐波浪性能について考察した。

2. 水理模型実験の概要

(1) 疲労に影響する波浪条件の設定

疲労に影響する波浪条件の設定を目的に、日本沿岸の洋上風力発電候補地 6 地点(図-1)における CWM による

波浪の推算データを用いて、基礎構造の鋼材の疲労に影響する波浪条件の簡易的な感度分析を行った。具体的には、Seidel ほか⁵⁾の研究を参考に、地点毎に、構造の一次固有振動数 0.2 Hz の場合、ピーク周期毎の疲労等価モーメントを算出し、波浪の頻度分布に基づき SN 曲線の傾きの逆数 $m = 4$ の場合の疲労損傷度を算出し、総疲労損傷度に対するそれぞれのピーク周期毎の疲労損傷度の寄与率を計算した。その結果、ピーク周期 6 s～8 s の波浪が疲労損傷度への寄与が大きいことが分かった(図-2)。以上より、検討地点の周期と平均波高の関係から、周期 6 s、波高 1 m と周期 8 s、波高 2 m ととして設定した。

(2) 実験概要

a) 実験装置と相似則

断面2次元造波水路（全長 50 m、高さ 1.2 m、幅 0.6 m）を用いて、着床式洋上風力発電設置海域を想定した模型実験を実施した（図-3、図-4）。相似則はフルード則に基づき、縮尺 1/80 とした（表-1）。

b) 波浪条件

波浪条件は、疲労に影響する波を想定した規則波 2 ケース（疲労時①：波高 1.25 cm、周期 0.67 s、疲労時②：波高 2.50 cm、周期 0.89 s）と日本海側の年最大波クラスを想定した規則波 1 ケース（高波浪時：波高 14.0 cm、周期 1.34 s）とした。水深による影響の確認のため、水深は 25



図-1 疲労に影響する波浪条件の検討対象地点

cm と 50 cm の 2 水深とした。

c) 実験模型

模型は、柔構造と剛構造の 2 種類を使用した（図-5）。柔構造の模型は、ステンレス円管(SUS304)の円管模型を中心として周囲にアクリル円筒（直径 10.5 cm）の MP 模型を配置し外径を幾何学的に相似させ、かつ、円管模型頂部に配置した重りの重さと高さを調整して模型全体の

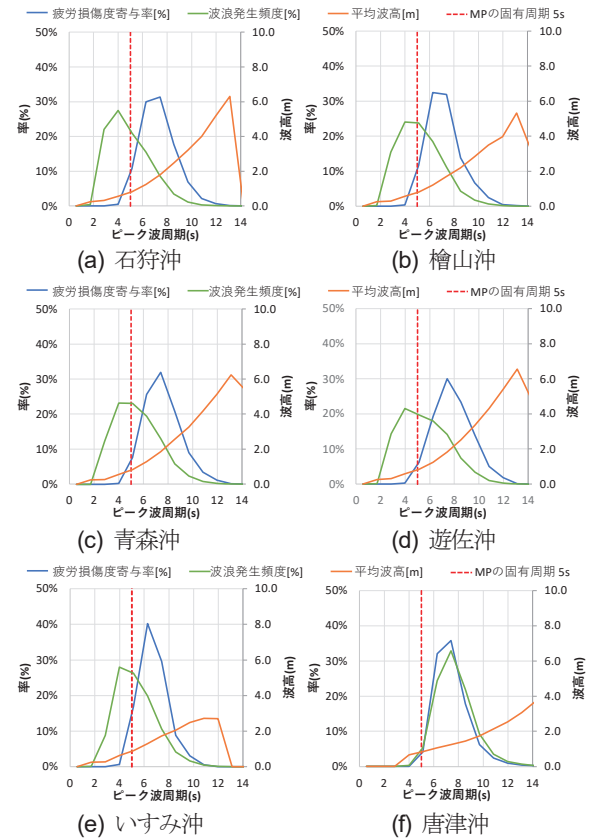


図-2 各海域の波浪頻度と基礎構造への疲労損傷度寄与率

表-1 相似則

物理量	記号	実物／模型	縮尺
長さ	L	λ	80
時間	T	$\lambda^{0.5}$	8.94
ひずみ	ε	λ / λ	1
質量	M	λ^3	512,000
曲げ剛性	EI	λ^5	3,276,800,000

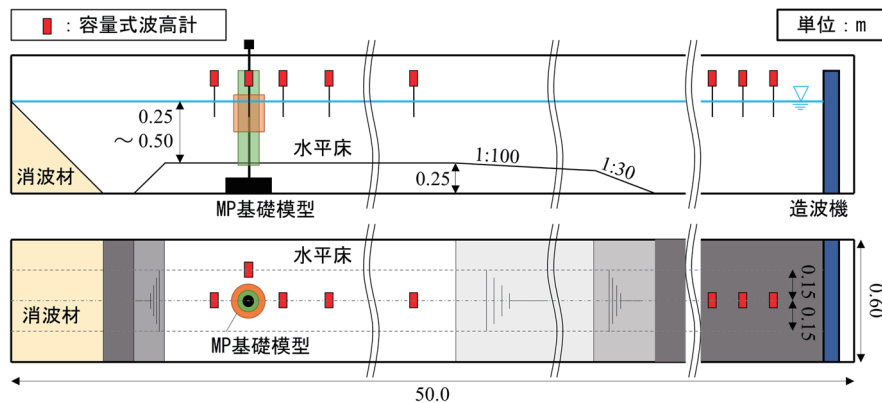


図-3 実験装置および概要

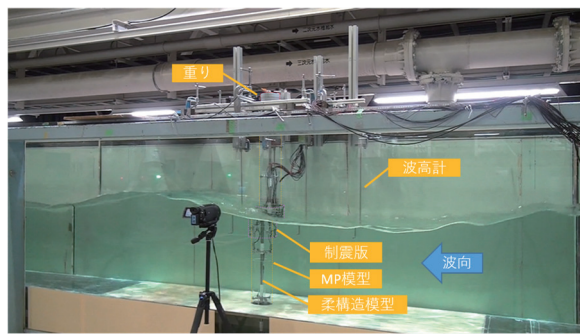
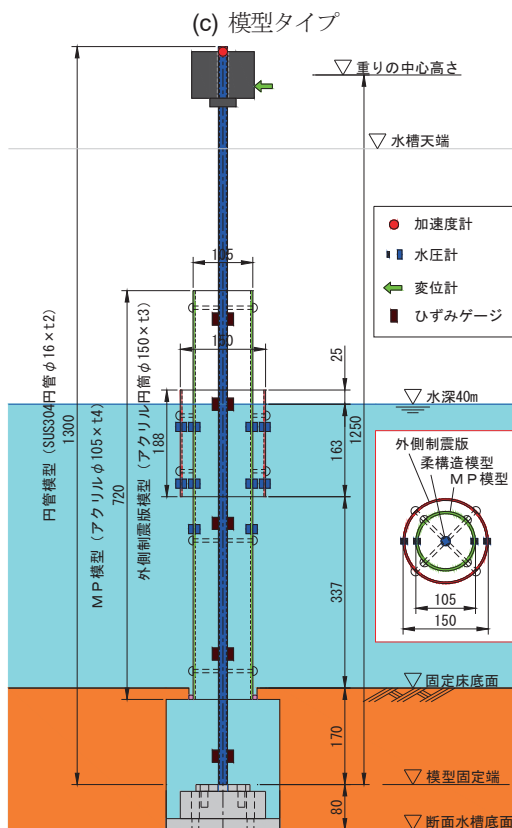
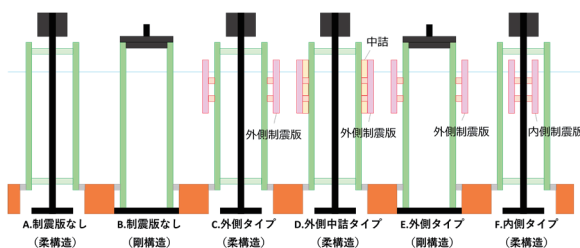
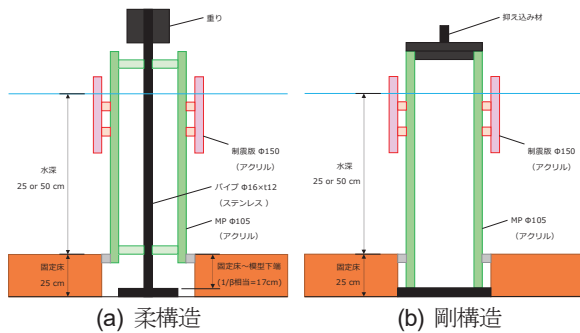


図-4 実験状況



(d) 模型概要図 (外側制震版の場合)

図-5 実験模型

固有周期を相似させた構造とした。制震版模型はMP外部に配置する外側タイプ（直径 15.0 cm）とMP内部に配置する内側タイプ（直径 6.5 cm）と、外側タイプの制震版とMP（直径 10.5 cm）間の水位変動や水の移動を遮断した外側中詰タイプの3 タイプとし、これに柔構造と剛構造を組み合わせて、計6 タイプの模型を使用した。外側中詰タイプの目的は、外側タイプとの比較であり、骨組解析上でのモデル化（制震版の外径や制震版とMP間の水塊の質量は再現できるが、制震版とMP間の水位変動の影響などを考慮できない）と近い条件とした。なお、制震版模型/MP模型/円管模型間は、水平方向は波向きに対して45 度に4 方向からボルト型の留め具で固定し、鉛直方向はその固定を水深25 cmは2 箇所、水深50 cmは3 箇所固定した。

d) 実験ケース

実験ケースは、6 模型タイプ、3 波浪条件、および、2 水深の組合せの計36 ケースを実施した（表-2）。

e) 固有周期

洋上風車は極端にトップヘビーな構造であり、制震版の重量の付加による1次固有周期の変化は0.1%程度であるが、本実験においては、水位変動などの流体力学の影響に着目し、制震版重量の有無による固有周期変化の影響

表-2 実験ケース

#	ケース名	模型タイプ		水深	波浪条件		
		制震版	柔構造/ 剛構造		疲労時①	疲労時②	高波浪時
					1.25 cm 0.67 s	2.50 cm 0.89 s	14.0 cm 1.34 s
1	ケース1-1	なし	柔	25 cm	○		
2	ケース1-2					○	
3	ケース1-3						○
4	ケース1-4			50 cm	○		
5	ケース1-5					○	
6	ケース1-6						○
7	ケース2-1	なし	剛	25 cm	○		
8	ケース2-2					○	
9	ケース2-3						○
10	ケース2-4			50 cm	○		
11	ケース2-5					○	
12	ケース2-6						○
13	ケース3-1	外側	柔	25 cm	○		
14	ケース3-2					○	
15	ケース3-3						○
16	ケース3-4			50 cm	○		
17	ケース3-5					○	
18	ケース3-6						○
19	ケース4-1	外側中詰	柔	25 cm	○		
20	ケース4-2					○	
21	ケース4-3						○
22	ケース4-4			50 cm	○		
23	ケース4-5					○	
24	ケース4-6						○
25	ケース5-1	外側	剛	25 cm	○		
26	ケース5-2					○	
27	ケース5-3						○
28	ケース5-4			50 cm	○		
29	ケース5-5					○	
30	ケース5-6						○
31	ケース6-1	内側	柔	25 cm	○		
32	ケース6-2					○	
33	ケース6-3						○
34	ケース6-4			50 cm	○		
35	ケース6-5					○	
36	ケース6-6						○

※ただし、ケース 1-1、ケース 6-1 の造波は、周期 0.69 s であった。

響を極力排除するため、全ての柔構造模型の固有周期は、模型上端に配置した重りを調整し、水深25 cmは0.560 s、水深50 cmは0.588 sとした。

f) 計測方法

柔構造模型の実験では、容量式波高計、感圧式水圧計およびひずみゲージを用いて、それぞれ水位変動、水圧、曲げひずみを計測した。縦断方向の模型中心の背面側で模型位置の波高を波高計(WH7)で計測した。外側タイプの制震版については、制震版とMP間の疲労時波浪での水位変動を波高計(WH10, WH11)で計測した。模型周りの水圧計と波高計の配置を図-6に示す。また、重りの位置で加速度計と変位計を用いて、それぞれ加速度と変位を計測した。

3. 水理模型実験結果

(1) 予備実験

予備実験では柔構造模型の固有周期を変位計の計測値に基づき調整した。水深25 cmではほぼ想定通りの調整ができた。一方、水深50 cmの模型では想定よりも固有周期が短くなる傾向があり、目標とする固有周期に合わせるためにより多くの重りを必要とした。これは、MP模型であるアクリル円筒を留め具により柔構造模型と一体化する際に、鉛直方向に3点で固定したことによりアクリル円筒が剛性を負担したことが主な原因と考えられるが、固定の確実性を優先し実験を続行した。なお、このため、剛性負担の影響を受ける水深50 cmの中段のひず

みゲージの計測値は参考値とすることとした。

(2) 時系列の確認

各ケースの波高、水圧、ひずみの計測結果の時系列データを確認した。時系列データの代表例として外側タイプの制震版のケース3-1～ケース3-3の結果を示す(図-7)。ただし、水圧とひずみのデータについては、微小なノイズの除去のため、0.1 Hz～10 Hz のバンドパスフィルター処理を行っている。MPや制震版の外側など、直接波浪の影響を受ける範囲の水圧(WP9, WP12, WP13, WP16, WP17, WP20)は、造波による外部の水位変動(WH7)と位相が一致した。一方、外側タイプの制震版とMP間の水圧(WP1, WP4, WP5, WP8, WP14, WP15, WP18, WP19)は、制震版とMP間の水位変動(WH10, WH11)と位相が一致した。また、MP内の水圧(WP2, WP3, WP6, WP7, WP10, WP11)は、極微小であり、動画による目視でも水位変動はほぼ認められなかった。

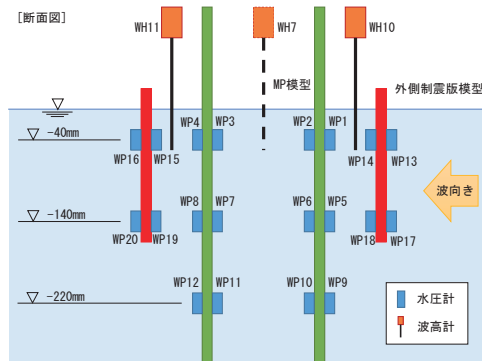
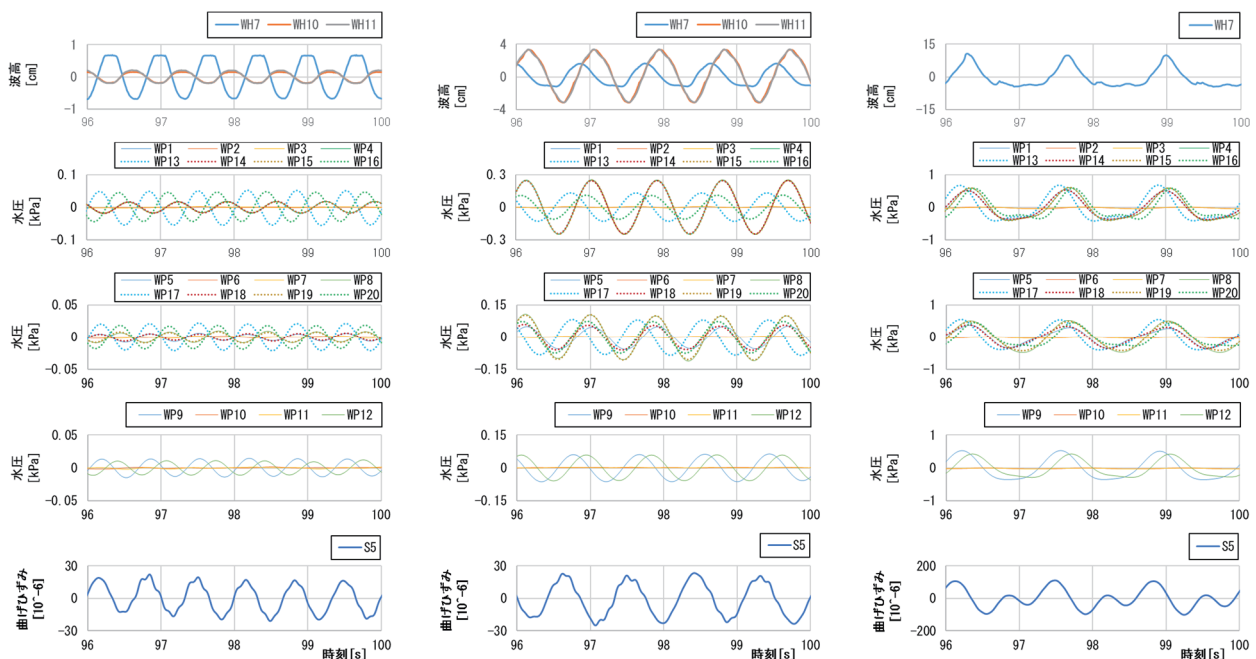


図-6 模型周りの水圧計と波高計の配置模式図



(a) ケース 3-1 (疲労時①)

(b) ケース 3-2 (疲労時②)

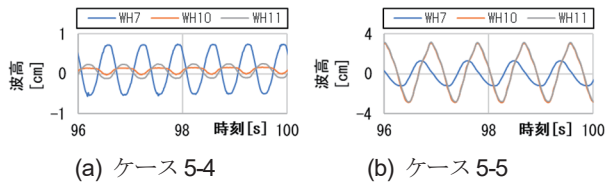
(c) ケース 3-3 (高波浪時)

図-7 時系列の代表例 (外側タイプの制震版, ケース 3-1～ケース 3-3)

(3) 制震版と MP 間の水位変動の確認

a) 全体的な傾向

疲労時の波浪について外側タイプの制震版と MP 間の水位変動を計測した結果、制震版と MP 間の水位変動は前面側 (WH10) と後面側 (WH11) で、水位と位相にほとんど差がなく、外部の水位変動 (WH7) とは位相がずれており、位相のずれは波の周期によって異なっていた (図-8)。また、疲労時② (波高 2.50 cm, 周期 0.89 s) の



(a) ケース 5-4

(b) ケース 5-5

図-8 外側タイプの制震版と MP 間の水位変動

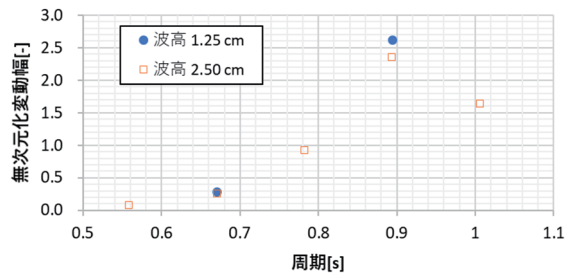


図-9 制震版と MP 間の水位変動と周期の関係

ケースで、外側タイプの制震版と MP 間の水面が全体的に上下し、波高よりも水位変動が大きくなり、制震版と MP 間から外部への越流が発生した。

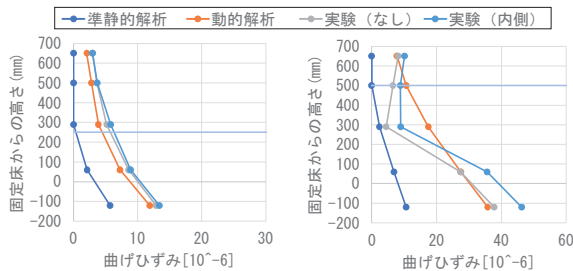
b) 波の周期と水位変動の関係

外側タイプの剛構造模型 (水深 50 cm) において、周期を 0.56 s ~ 1.01 s まで 0.11 s 刻み (実スケールで 1 s 刻みに相当) で変えた場合、制震版と MP 間の水位変動がどのように変化するかを確認するために追加実験を行った。造波波高で除し、無次元化した水位変動の振幅 (無次元化変動幅) と周期の関係を図-9 に示す。その結果、制震版と MP 間の水位変動の振幅のピークは、周期 0.89 s 付近に存在することがわかった。水面上に固定された管内の水塊の振動特性に関する木村の研究⁶⁾を参考とすると、水位変動の固有周期 T_0 は制震版の浸水長の平方根に比例し、本実験条件では $T_0 = 0.81$ s となり、本実験の水位変動のピークである周期 0.89 s に近いことがわかる。これが $T_0 = 0.81$ s に比べてやや長周期側となっているのは壁面損失や流出・流入損失によるものと考えられる。

(4) 曲げひずみの確認と動的解析結果との比較

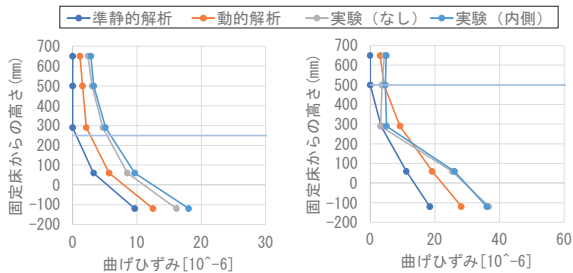
a) 解析と比較方法の概要

実験結果と解析結果について固定床からの高さ毎の曲げひずみの最大値を比較したグラフを図-10, 図-11 に示



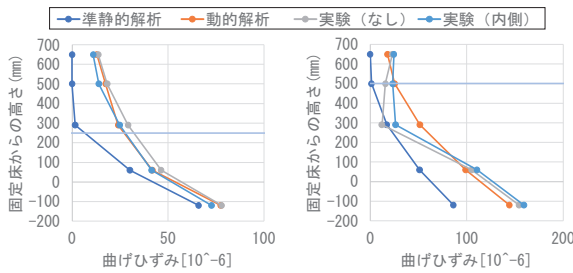
(a) 水深 25 cm 疲労時①

(b) 水深 50 cm 疲労時①



(c) 水深 25 cm 疲労時②

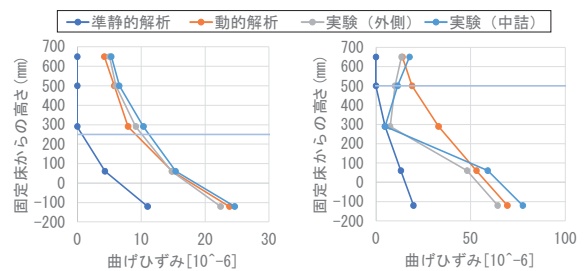
(d) 水深 50 cm 疲労時②



(e) 水深 25 cm 高波浪時

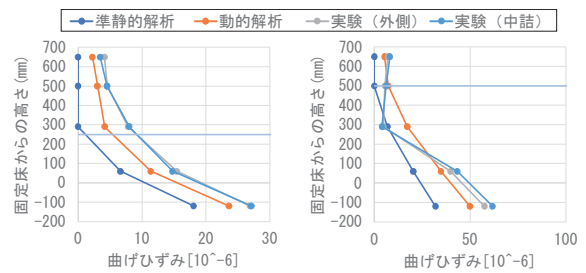
(f) 水深 50 cm 高波浪時

図-10 曲げひずみの比較(制震版なしと内側タイプ)



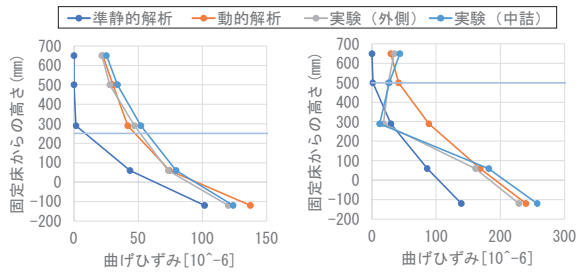
(a) 水深 25 cm 疲労時①

(b) 水深 50 cm 疲労時①



(c) 水深 25 cm 疲労時②

(d) 水深 50 cm 疲労時②



(e) 水深 25 cm 高波浪時

(f) 水深 50 cm 高波浪時

図-11 曲げひずみの比較(外側タイプと外側中詰タイプ)

す。本実験では規則波を対象としたことから、曲げひずみの振動が定常状態となった範囲での絶対値最大値を比較対象とした。また、内側タイプの解析結果は、制震版なしとの差が1%以内でほぼ同じであったため制震版なしの解析結果のみをグラフに記載した。

なお、実験の再現解析は、着床式洋上風力発電基礎設計用骨組み解析コード Sesam (DNV, ノルウェー)を使用した。実験の再現性を確認するため、解析の波浪条件および水深は実験模型と同じとした。構造データは、断面形状をアクリル円筒、断面剛性を円管模型の剛性とした。時刻歴解析では減衰は Rayleigh 減衰を用い、減衰比は1次, 2次ともに0.5%とした。また、動的特性を検討にあたり、時刻歴解析に加え、比較のため準静的解析(慣性効果を考慮しない時間領域シミュレーション)を実施した。

b) 曲げひずみの比較結果

実験結果は、制震版なしと内側タイプ、外側タイプと外側中詰タイプは、それぞれ同様の傾向を示した。水深50 cmの実験の曲げひずみは、前述の理由でアクリル円筒が剛性を負担したため、中段の値が極端に小さくなっているが、上端と基部の値は動的解析とほぼ同様の値が得られていることがわかる。解析は、準静的解析では波力が作用しない上部では曲げひずみが発生しないが、動的解析では波力が作用しない上部でも慣性の影響により曲げひずみが発生し、全体的に曲げひずみがより大きくなっており、実験とも整合していることがわかる。

MP基礎は、構造が比較的単純であり、模型も単純化しているため、基部の曲げひずみが全体の再現性をおおよそ代表していると考えることができる。そこで、基部の曲げひずみについて実験と動的解析を比較すると、実験は動的解析に対して、疲労時①は0.93~1.28倍、疲労時②は1.14~1.44倍、高波浪時は、0.87~1.10倍であった。この結果より、疲労時②は、制震版の有無に関わらずいずれのタイプでも実験が動的解析結果よりも大きく、動的解析の再現性に課題があることがわかった。外側タイプは、外側中詰タイプと比べると0.83~0.99倍であり、動的解析と比べると疲労時①は0.93~0.94倍、高波浪時は0.87~0.95倍であった。内側タイプは、制震版なしと比べて、水深50 cmの疲労時①では1.22倍とやや大きかったが、他は0.93~1.12倍と全体的には同等であった。以上から、外側タイプは少なくとも高波浪時には、外側中詰タイプおよび動的解析と同等以下であり、基礎設計上の耐波浪性能について、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ことがわかった。

4. おわりに

本研究では、制震版を有するMP基礎構造の耐波浪性能について、模型実験と実設計を見据えた動的解析に基づく基礎基部の曲げひずみの比較により考察し、以下のことが分かった。

① 外側タイプについて、外側中詰タイプおよび動的解析と比較した結果、高波浪時には、曲げひずみがこれらと同等以下であり、基礎設計上の耐波浪性能について、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ことが確認された。

② 外側タイプについて、制震版の形状によっては、特定の波の周期において制震版とMP間において特に大きな水位変動の発生を考慮する必要があることがわかった。また、今後の課題は以下である。

①に関して、MP基礎本体の耐波浪性能に悪影響がないことは分かったが、制震版に作用する波力は接続部を介してMP本体に局所的に作用することになる。制震版とMP間の接続部は、ボートランディングなどの二次部材と同様に、疲労の影響も大きいことが想定されるため、実際の接続方法は疲労の影響を考慮して検討する必要がある。具体的な接続方法の検討が今後の課題である。

②に関して、実設計時には、制震版とMP間の水位変動を考慮して制震版の水面からの突出長を決定する必要があると考えられる。最適な突出長とその決定方法の検討が今後の課題である。

REFERENCES

- 1) 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, 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, *Annual Journal of Civil Engineering in the Ocean*, Vol.79, No.18, 23-18018, 2023.]
- 2) 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.]
- 3) 小森修蔵, 田中寛好, 和田明, 竹内出: 不規則波に対する円柱構造物の動的応答, 海岸工学講演会論文集 Vol.26, pp.425-428, 1979 [Komori, S., Tanaka, H., Wada, A. and Takeuchi, I.: Dynamic Response of Cylindrical Structures to Random Waves (Translated from Japanese.), *Proceedings of Coastal Engineering, JSCE*, Vol.26, pp.425-428, 1979]

- 4) 石田啓, 石川浩二: 規則波による大口径柱体の動的応答に関する研究, 金沢大学工学部紀要 Vol.16 (2), pp.17-25, 1983[Ishida, H. and Ishikawa, K.: A Study on Dynamic Response of Large Diameter Column Body by Regular Waves (Translated from Japanese.), *Memoirs of the Faculty of Technology Kanazawa University*, Vol.16 (2), pp.17-25, 1983]
- 5) Seidel, M., Voormeeren, S. and van der Steen, J.-B.: State of the art design processes for offshore wind turbine support structures, *Stahlbau*, Vol.85, Issue 9, 2016.
- 6) 木村晴保: 水面に固定された管内の水塊の振動特性, 農業土木試験場報告, 12 号, pp.143-154, 1974. [Kimura, H.: Vibration characteristics of a water mass in a pipe fixed to the water surface (Translated from Japanese.), *Bulletin of the National Research Institute of Agricultural Engineering*, Issue 12, pp.143-154, 1974.]

(Received February 6, 2024)

(Accepted May 13, 2024)

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

Naruhisa MIURA, Toshiyasu MIYOSHI, Makoto YOSHIDA, Tatsuya MIZUNO,
Hiroyuki TAGUCHI, Yosuke HIGO, Shinichiro ONDA and Yasuo SAWAMURA

As wind turbines become larger, monopiles (MPs), which are the main type of foundation for offshore wind farms, tend to become larger, especially in Japan, due to the increase in seismic load, which poses a challenge to their construction by SEP vessels. A structure to reduce the seismic sectional force of the MP foundation is proposed, in which a cylindrical underwater seismic control panel ("seismic control panel") covering the MP is partially submerged in the water. However, compared to the existing MP, the location where the seismic isolation plate is installed may increase wave action due to the increased outer diameter, making it necessary to study the effect of waves. In this study, the wave resistance of MP foundations with seismic control panel was examined by comparing the bending strain at the base of MP foundations based on hydraulic model experiments and dynamic analysis. As a result, it was confirmed that the MP with seismic control panel has no adverse effect on wave resistance except for the effect of increased outer diameter, which is usually assumed in the foundation design.