

大径杭の吊り荷動揺に関する水理実験と再現解析

小俣 哲平*¹・織田 幸伸*¹・本田 隆英*¹・橋本 貴之*¹・福原 哲*²

Keywords : offshore wind power, monopile, oscillation analysis, hydraulic model experiment, numerical simulation

洋上風力, モノパイル基礎, 動揺解析, 水理模型実験, 数値解析

1. はじめに

洋上風力の着底式基礎の建設において、外洋での大型クレーン船によるモノパイル（以降 MP と称す）のような大径杭の建込み作業を想定した場合、作業船及び杭の動揺特性を把握することは、施工計画を行う上で重要となる。しかし、主な吊り荷の揺れは、波浪による船体の動揺がブームから伝わることで誘発されるため、簡易的な評価が難しく、明確な算定式や指標がない。そのため、正確な評価を行うためには波浪、船体、吊り荷が一体となった模型実験や連成解析が必要となる。波浪中の作業船やその吊り荷の運動を対象とした既往研究は多数ある^{1)~8)}。宮崎ら⁹⁾は起重機船のフックとシャックルによる 2 重振り子の状態について数値解析手法を開発し、吊り荷の動揺低減のための検討を行っている。また、河邊ら¹⁰⁾は、水中の吊り荷に関する連成運動評価について数値計算手法を提案している。さらに、大坪ら¹¹⁾、及び大坪¹²⁾は、作業船と細長物体の吊り荷を対象とした連成運動評価を、実験及び数値解析により実施し、吊り荷頂部を回転軸とする 2 次モードの運動の発生や、吊り荷が半没水することによる作業船の固有周期の変化を報告している。

上述したように、吊り荷を扱う既往の研究は多数あるものの、MP のような長大な吊り杭の動揺を考慮した検討は少なく、動揺特性の評価は十分と言えない。そこで本研究では、周期や波高といった波浪特性をパラメタとした吊り荷（大径杭）の応答特性を、船体と吊り荷の水理模型実験を行うことで評価した。さらに動揺解析ソフト OrcaFlex を用いて実験の再現解析を実施した。

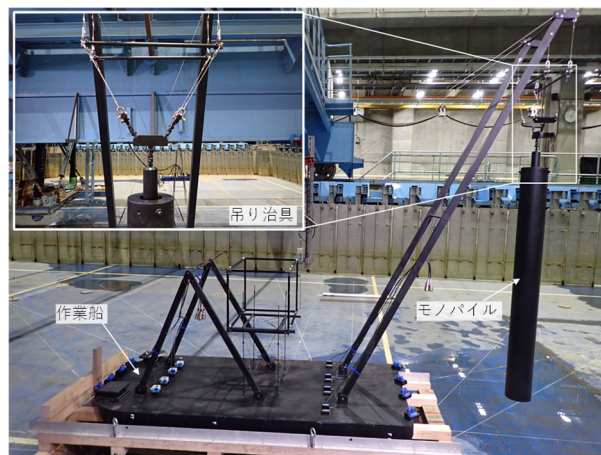


図-1 船体模型
Fig.1 Vessel model

表-1 模型諸元
Table 1 Specification table of vessel model

船体及び杭の模型諸元			
船体[mm]	Length	Width	Height
	1600	733	100
船体重量[kg]	63.7		
中央部喫水[mm]	60		
慣性モーメント [$\times 10^6 \text{kg} \cdot \text{mm}^2$]	Roll	Pitch	Yaw
	9.35	23.5	21.1
杭重量[kg]	4.67		
杭径[mm]	127		
杭長[mm]	1175		
係留索数[本]	8		
係留索初期張力[N]	0.18~0.29		

2. 実験模型および数値解析モデル

2.1 船体と杭の模型

図-1 に実験に使用したクレーン船及び杭の模型を示す。実験模型は実際の起伏式起重機船を参考にして 1 :

* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 水理研究室

* 2 土木本部 洋上風力発電プロジェクト部

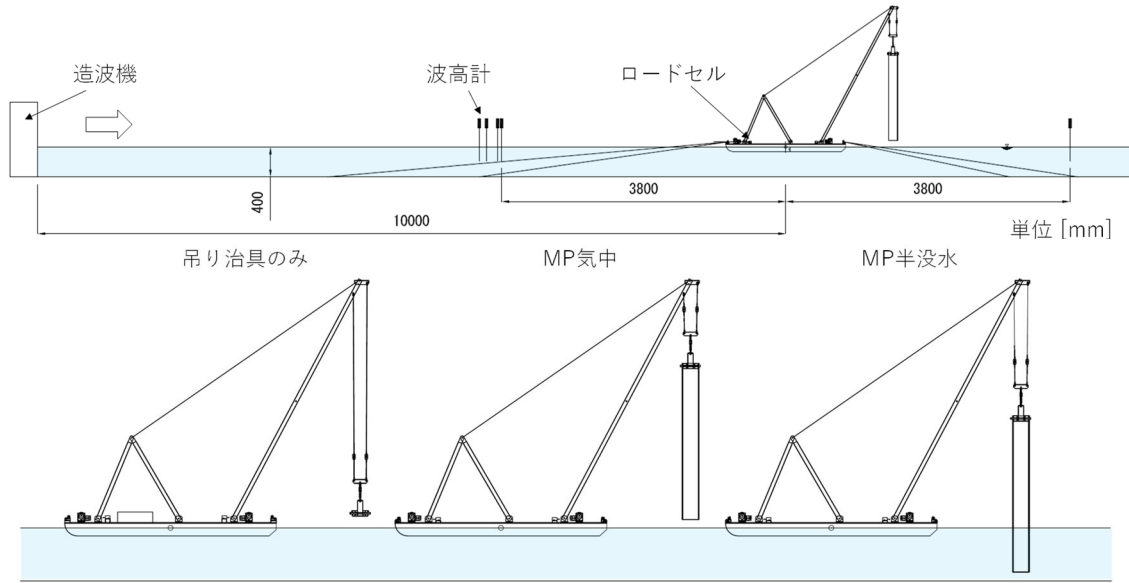


図-2 実験条件と吊り荷ケース

Fig.2 Experimental condition and suspended load cases

75 相当の縮尺とし、表-1 に示す諸元とした。喫水や船体重心も調整し、慣性モーメントも可能な限り実機条件に近づけた。吊り索は 4 点吊りとし、吊り治具の可動方向も想定実機に近い形とした。係留索は船前後 4 本ずつの 8 本とし、カタナリー係留とした。係留索にはロードセルを設置し、初期張力が実験条件となるよう係留索の長さを調整した。

2.2 模型配置と吊り荷ケース

図-2 に実験模型の配置と吊り荷のケースを示す。実験は平面水槽（長さ 35.5m、幅 17.0m、高さ 1.6m）で行った。実験の水深は 40cm とし、作用波（波高 27mm）は規則波と不規則波の両方を用い、6 種類の周期（0.58s~2.08s）で、船尾方向（波向き 0°）及び左舷方向（波向き 90°）からの波向きとした。吊り荷の条件は実際の想定作業から 3 パターンを設定し、吊り治具（MP 用フック）のみ、モノパイルが気中にある状態（MP 気中）、モノパイルが半没水の状態（MP 半没水、没水長 330mm 程度）とした。さらに、MP が半没水状態にあるケースについては、水面下の没水長を変化させた 4 ケース（67mm~267mm）も検討した。計測項目は、波高及び周期の波高と周期、係留索張力、船体及び杭上端付近の動揺量とした。波は波高計で計測し、係留索張力はロードセルで計測、船体及び杭の動揺量はモーションキャプチャーを使用し計測した。

2.3 数値解析手法と解析モデル

実験の再現解析は浮体構造物の汎用動揺解析ソフト OrcaFlex を用いて実施した。図-3 に解析に使用したモデルを示す。物性の諸元は実験模型と同じとし、規則波及び不規則波の解析を行った。解析時間ステップは

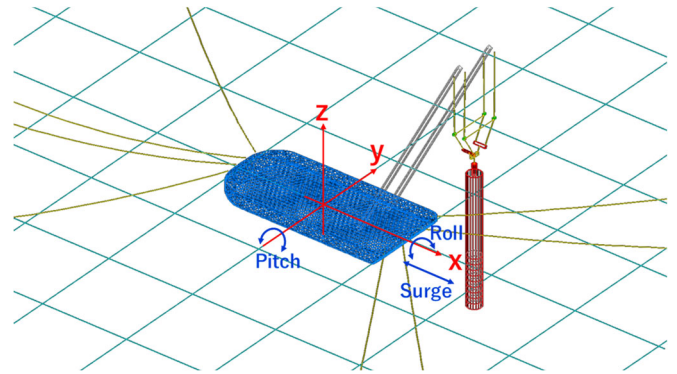


図-3 解析モデル

Fig.3 Numerical simulation model

0.01s とし、規則波は 140 秒程度、不規則波は実験で計測された波を入力するため最大で 540 秒程度とした。また、MP の没水部分の付加質量係数と抗力係数はそれぞれ 1.0 と設定した。

3. 実験結果

3.1 規則波

3.1.1 時系列結果

図-4 は周期 1.04s の規則波を船尾方向から作用させたケースにおける船体の重心位置の Pitch 動揺量と MP 上端部の変動量（船首船尾方向変位）の時系列結果を示している。MP 上端部の動揺量は MP が気中にある状態よりも半没水状態の方が大きいことが確認できる（図-4 下図）。この動揺特性は作用波の周期に関わらず同様であった。実験の様子を確認すると、MP が気中及び半没水のどちらの状態においても、MP は上端と下端が逆位相で変動する回転運動の動揺モードであった（写真-

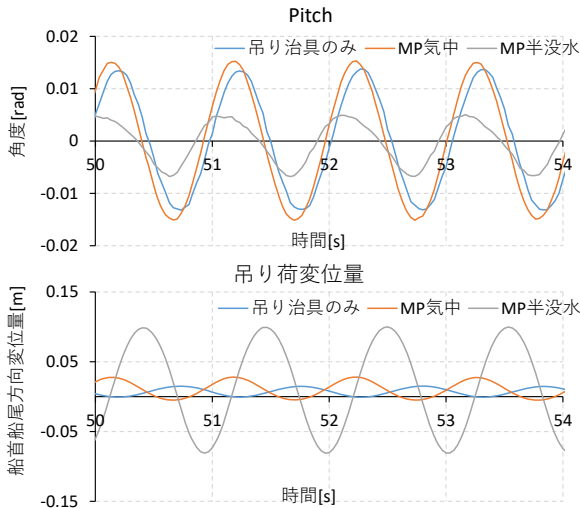


図-4 規則波($T=1.04s$)における Pitch と杭上端部の変動
 Fig.4 Vessel pitch motion and displacement of upper part of pile in regular wave ($T=1.04s$)

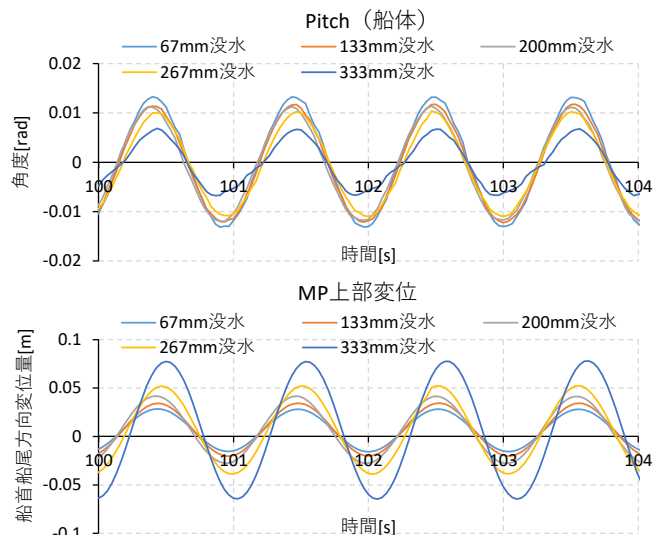


図-5 MP の没水長毎の動揺量 (上:Pitch, 下:MP 変位)
 Fig.5 Movement by submerged length of pile (Upper: Vessel pitch, Lower: displacement of MP)

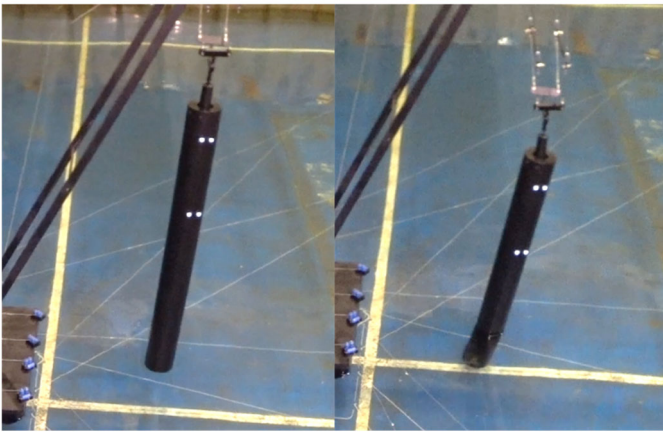


写真-1 実験状況 (左: 気中ケース, 右: 半没水ケース, 杭上の玉はモーションキャプチャー用のターゲット)
 Photo.1 Snapshot of oscillating piles (left: aerial case, right: semi-submerged case, white balls equipped on the pile as the targets for motion capture)

1に示すような吊り治具付近でくの字の折れ曲がるような運動)。半没水状態になると回転中心が下方(水面付近)に移動し、水の抵抗によりMP下方の運動が制限されるため、その分MPの上端部の動揺が大きくなったと考えられる。これに加えて半没水状態では吊り索長が長く、MP上端部の変位可能範囲が大きくなることもMPの動揺量が大きくなった要因と考えられる。実施工においてMPの降下に伴い吊り索が長くなる際は、MP上部の動揺量が大きくなることに注意が必要となる。

3.1.2 没水長の影響

図-5に規則波(周期1.04s)におけるMPの没水長を変化させたケースにおける船体のPitch及びMP上端部の動揺量の結果を示す。図-5より、MP上端部の動揺量は没水長が長くなるほど大きくなっていることが確認できる。これは上述したように、没水長が長いほど水

の抵抗によりMP下方の運動が制限されること、また没水長が長いほど吊り索長が長くなり、MP上端部の変位可能範囲が大きくなることが要因と考えられる。これらの結果からも没水後のMP降下時は、没水長の長さに伴ってMP上部の動揺量が大きくなることに注意が必要と言える。ただし、今回の実験の設定水深では、これ以上長い没水長での検証はできなかったが、没水長が長くなると水面下のMPに作用する水の抵抗力の作用範囲が徐々に大きくなるため、ある程度の没水長からはMP上部の動揺量は逆に減少していく傾向になると推察される。またこの周期の波ケースでは没水長の変化により、船体のPitchの動揺量についても変化が見られ、没水長が長いほどPitch動揺が小さくなっており、吊り荷の状態が船体の動揺に影響を与えていることが分かる。この傾向は周期の短い波ほど顕著であったが、吊り荷の状態によって船体の動揺特性に影響を受け、船体の固有周期が変化している可能性も要因として考えられる。

3.1.3 周期応答関数

図-6に、波向き 0° の規則波を作用させた際の各吊り荷ケースにおける船体のPitch及び吊り荷の動揺の応答量を示す。最大変位振幅を作用波高で除して単位波高あたりに換算した値を示した。同図より、吊り荷のケースにかかわらず、吊り荷の動揺量は船体のPitchの固有周期1.3s付近で大きく応答しており、船体のPitchの影響を強く受けることが分かる。また、吊り荷の状態によって、1.3s付近の周期帯における船体Pitchの応答結果が変化しており、船体動揺は吊り荷の影響を受けていることが分かる。また、吊りMPの固有周期に近

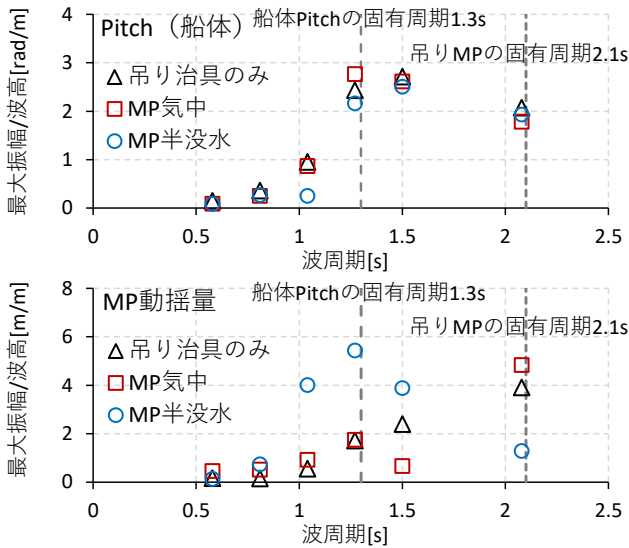


図-6 周期応答関数 (波向き 0°, 上: Pitch, 下: MP 変位)
 Fig.6 Periodic response function (wave direction 0°, upper: Roll, lower: MP displacement)

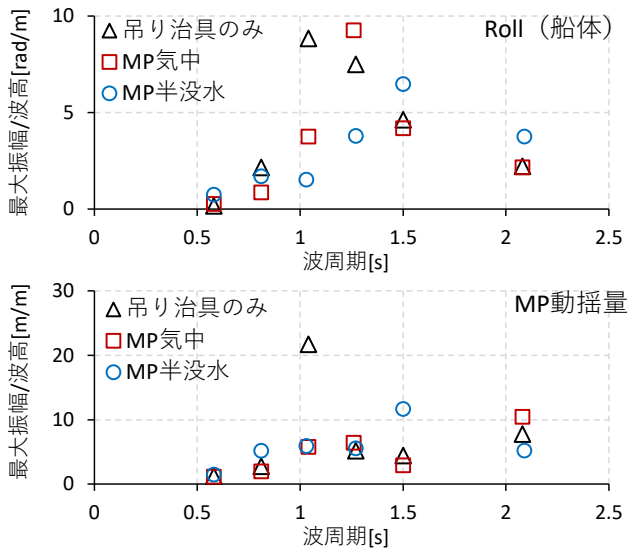


図-7 周期応答関数 (波向き 90°, 上: Roll, 下: MP 変位)
 Fig.7 Periodic response function (wave direction 90°, upper: Roll, lower: MP displacement)

い波周期 2.1s 以外では、MP の動揺量は半没水状態の方が気中にある状態より大きくなっている。一方、吊りフックのみのケースでは吊り荷自体の運動はないため、動揺量は吊り荷の固有周期付近で大きくなっていると考えられる。

図-7 に、波向き 90° における各吊り荷状態における船体の Roll 及び吊り荷の動揺の応答量を示す。波向き 90° では、吊り荷のケースによって、船体の Roll の応答ピークが異なっており、船体動揺は吊り荷の影響を受けていることが分かる。また吊り荷の動揺は、吊り荷の固有周期を除けば、基本的には半没水しているケースが杭上端部の揺れは大きくなる。ただし、吊り荷動揺の応答が最大となる周期は、各吊り荷のケースに

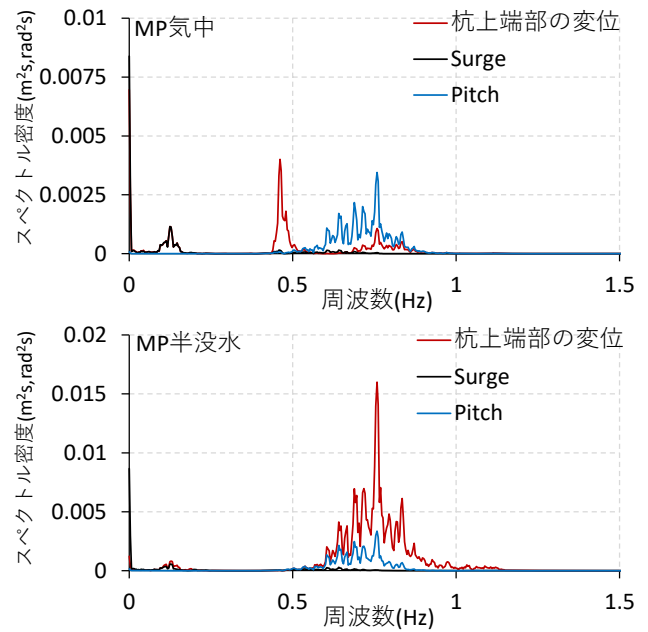


図-8 不規則波 ($T_p=1.5s$) における MP の変位、船体の Surge, Pitch スペクトル密度
 Fig.8 Spectrum density of surge, pitch and displacement of pile in irregular wave ($T_p=1.5s$)

における船体の Roll 応答にピークが発生する周期に対応している。一般に船体のような形状では Pitch 方向より Roll 方向が揺れやすく、図-6, 7 の船体の比較からも分かるように、単位波高あたりの動揺量は Roll の方が大きい。このため、波向き 0° 方向のケースとは異なり、波向き 90° のケースにおいては、各吊り荷ケースの船体の Roll の固有周期付近では、吊り荷が没水する影響よりも船体の動揺自体の影響の方が強かったと考えられる。

3.2 不規則波

図-8 は波向き 0° において、不規則波 (ピーク周期 1.5s) を作用させたケースの船体の Surge, Pitch, 吊り荷の動揺量 (船首船尾方向変位) のスペクトル密度を吊り荷のケース別に示した結果である。同図より、吊り荷動揺の応答は船体の Pitch 応答に類似しており、吊り荷の動揺は主に船体の Pitch に起因していることが確認できる。また全てのケースにおいて 0.2Hz 付近の Surge にも応答しており、吊り荷の動揺には Pitch による動揺に加え、Surge による変位成分も含まれることが確認できる。さらに、MP 気中のケースでの吊り荷動揺には 0.45Hz 付近にピークが見られるが、これは吊り荷自体の動揺の固有周期で、不規則波に含まれる同周期成分に反応したと考えられる。吊り治具のみのケースでは 2.5s (0.4Hz)、MP 気中のケースでは 2.2s (0.45Hz) で大きく動揺しているが、重心位置で考えると吊り治

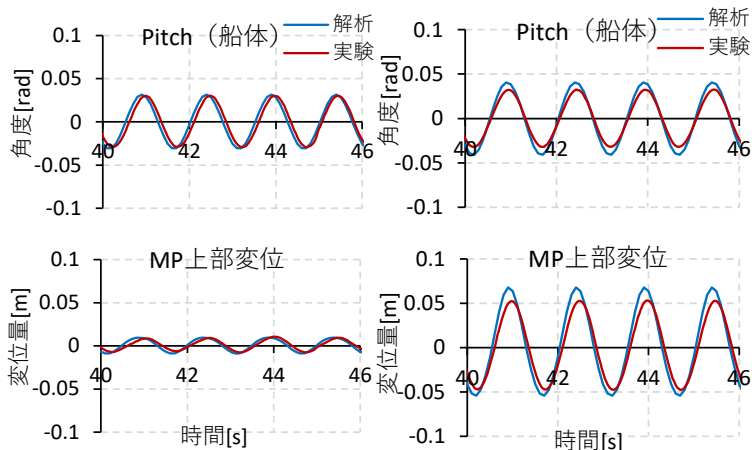


図-9 規則波時系列の比較 (T=1.5s)

Fig.9 Comparison of calculation and experiment for pitch and displacement of pile in regular wave (T=1.5s)

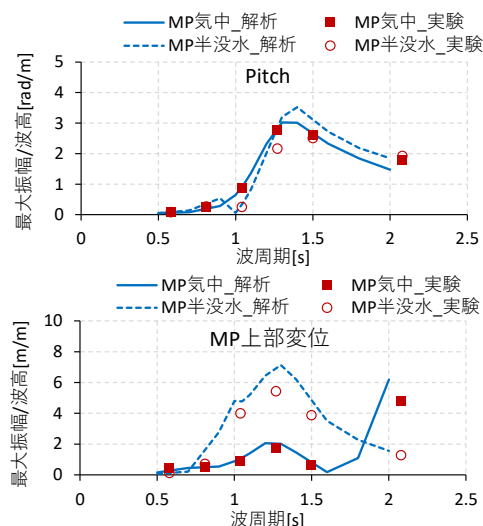


図-10 周期応答関数の比較 (上:Pitch, 下: MP 変位)

Fig.10 Comparison of calculation and experiment for periodic response functions of pitch and displacement of pile

具のみケースの方が MP 気中のケースのよりも吊長が長い
ため、固有周期が長くなっている。一方で、MP 半没水の
ケースでは、水の抵抗のため 0.4~0.45Hz 付近の
応答は見られない。このことから水による抵抗は固有
周期で揺れるモードの吊り荷動揺に大きく影響するこ
とが分かる。また、船体の Pitch 動揺を起因とする MP
の動揺が卓越し、MP が気中にあるケースにはない
0.9Hz より高周波数域での応答が大きくなっている。こ
れは、水中部分の MP の運動が水の抵抗力で拘束され
ることで吊り MP の動揺モードが変化し、MP 上端部の
動揺量が大きくなったことが要因である。

4. 数値解析結果

4.1 規則波

図-9 に、規則波周期 1.5 秒で杭が気中にあるケース
と半没水しているケースの解析結果と実験結果を示す。
解析結果はやや過大評価であるものの、両ケースとも
解析は良好に実験結果を再現している。図-10 には、船
体の動揺成分について周波数応答解析を実施し、単位
波高での最大振幅と周期の関係を、実験結果とともに
示す。数値解析は概ね良好に実験結果を再現している。
また、解析及び実験の結果から、Pitch の固有周期は 1.4
秒付近にあるが、杭動揺の固有周期もこれに近接して
いると考えられ、特に半没水の場合に大きく応答して
いる。また、杭の状態により Surge, Pitch とも動揺応答
に差が生じていることから、船体動揺が吊杭の影響を
受けていることが分かる。

4.2 不規則波

図-11, 12 に、不規則波ピーク周期 1.5 秒で杭が気中
にあるケースと半没水しているケースの Pitch 及び MP
上部の変位の応答スペクトル密度について、解析結果
と実験結果を示す。吊り荷の変位の解析結果がやや過
大評価の傾向にあるものの周期応答の分布形状は概ね
一致し、変動のピークが生じる周期を再現できている。
吊り荷の変位の解析結果が過大評価となっているのは、
吊り治具の構造再現の影響と考えられ、吊り治具細部
の剛性をモデルでうまく再現することが課題であると
考えられる。

5. おわりに

実験及び解析を通していくつかの知見が得られた。
杭が気中及び半没水のどちらの状態においても、杭の
運動は上端と下端が逆位相で変動する回転運動の動揺
モードであった。また、杭上端部の動揺量は杭が気中
にある状態よりも半没水状態の方が大きく、この動揺
特性は作用波の周期に関わらず確認された。

周期応答関数の結果より、船首船尾方向の波向きで
は、吊り荷の動揺量は船体の Pitch の固有周期で大きく
応答し、船体の Pitch の影響を強く受けることが分か
った。また、吊り荷の状態によっても船体 Pitch の応答
結果が変化しており、船体動揺自体も吊り荷の影響を
受けることが分かった。不規則波においても、吊り荷の
動揺は主に船体の Pitch に起因することが確認された。
さらに、半没水状態では、気中にあるケースにはない
高周波数域での応答が確認された。

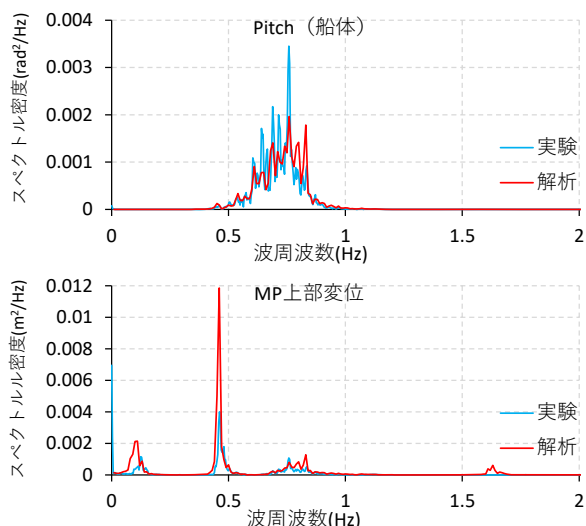


図-11 不規則波($T_p=1.5s$)スペクトルの比較 (MP 気中)
Fig.11 Comparison of calculation and experiment for supectrum density in irregular wave($T_p=1.5s$) when pile is in air

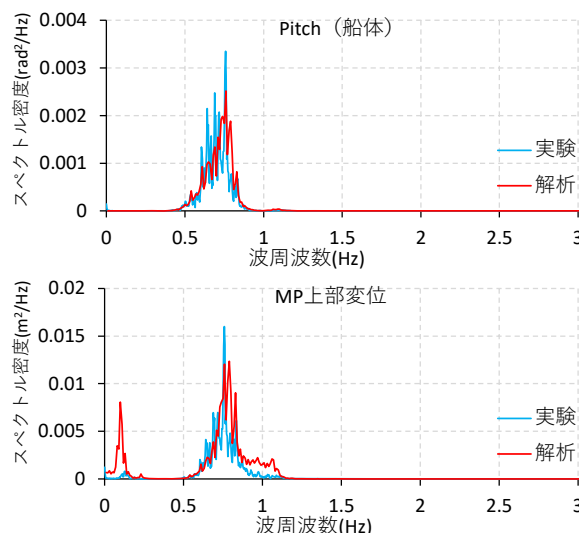


図-12 不規則波($T_p=1.5s$)スペクトルの比較 (MP 半没水)
Fig.12 Comparison of calculation and experiment for supectrum density in irregular wave($T_p=1.5s$) when pile is semi-submerged

数値解析は良好に実験結果を再現したが、半没水ケースの解析結果がやや過大評価であった。上端の吊具の構造の影響を大きく受けるため、吊り治具の剛性パラメータや、杭の没水部および船体の抗力係数の評価が今後の課題である。

参考文献

- 1) 野尻信弘, 三田重雄: クレーンバージと吊荷の連成運動について, 西部造船会々報, 第59号, pp.43-55, 1980.
- 2) 上田茂, 樋口豊志: 起重機船の動揺特性と稼働条件, 港湾技研資料, No.709, 1991.
- 3) 伊藤一教, 片倉徳男, 渡辺和明, 東江隆夫, 外山雅昭, 高久雅喜, 居駒智樹: 短尺函体を用いた沈埋トンネル工法の検討, 海岸工学論文集, 51巻, pp.786-790, 2004.
- 4) Firdaus, N., Djatmiko, E. B., Prastianto, W. R., Muryadin.: Experimental study on coupled motion of floating crane, In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 972, 6th International Conference on Marine Technology (SENTA 2021), Surabaya, Indonesia, 2022.
- 5) 橋本貴之, 織田幸伸, 小俣哲平: クレーン船の動揺と吊り荷の挙動に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 77巻, 2号, p.I_625-I_630, 2021.
- 6) 小俣哲平, 織田幸伸, 橋本貴之, 福原哲: 波浪中にお

る大径杭の吊り荷動揺に関する数値解析, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 78巻, 2号, p.I_277-I_282, 2022.

- 7) Nam, B. W., Kim, N. W., Hong, S. Y.: Experimental and numerical study on coupled motion responses of a floating crane vessel and a lifted subsea manifold in deep water, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 9, Issue 5, Pages 552-567, 2017.
- 8) 佐野敦紀, 居駒知樹, 相田康洋, 増田光一: 起重機船を使用した洋上風車基礎杭設置作業における基礎杭の挙動に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演概要集, 10013, pp.25-26, 2020.
- 9) 宮崎哲史, 武田将英, 倉原義之介, 浅沼丈夫, 津田宗男, 河邊寛: 波浪中の起重機船と吊フック, シャックルの連成運動, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 70巻, 2号, pp.I_1051-I_1055, 2014.
- 10) 河邊寛, 津田宗男, 宮崎哲史, 倉原義之介, 松田信彦, 諫山太郎: 吊り荷が水中にある時の起重機船の波浪中の運動, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第21号, p.495-498, 2015.
- 11) 大坪和久, 石田圭, 佐藤宏, 長谷川賢太, 荒木元輝: クレーン作業中の多目的作業船と吊荷の波浪中連成運動評価, 日本船舶海洋工学会論文集, 30巻, pp.187-200, 2019.
- 12) 大坪和久: 洋上・海底施設作業船と吊荷の波浪中連成運動評価, 海上技術安全研究所報告, 21巻, 別冊(令和3年度), 第21回研究発表会, 講演集, pp.7-12, 2021.