周期帯別波高の海上施工可否判断への活用検討

西　広人[1]・琴浦　毅[2]

[1] 正会員　五洋建設（株）技術研究所 土木技術開発部（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
E-mail: hirohito.nishi@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)
[2] 正会員　五洋建設（株）技術研究所 土木技術開発部（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
E-mail: tsuyoshi.kotoura@mail.penta-ocean.co.jp

海上施工可否判断は波浪観測時系列のゼロクロス法から算出された有義波高や有義波周期，熟練施工者の経験などを総合的に勘案して行う手法を取っているが，施工の安全性・経済性をより向上させるためには従来手法に加えて周期帯別波高の活用が必要と考えた．本検討では，周期帯別波高による施工可否判断結果の従来手法との比較と施工可否判断への適用検討を行った．その結果，周期帯別波高を用いることで従来手法では見逃しになり安全性のリスクがある場合でも，内包された波周期のエネルギーを勘案した意思決定の一助となることがわかった．また，観測値による周期帯別波高の予測値補正については波高分布の補正効果が確認でき，施工可否判断や退避判断への寄与が期待できる結果となった．

Key Words : *wave height by period, marine works, WAM , construction judgement*

1.　はじめに

地球温暖化は我々が住む地球全体で問題となっており，近年頻発する異常気象や海面上昇に起因する災害の激甚化等，更なる進行により安全安心な社会生活を脅かす懸念が大きくなっている．地球温暖化の進行は我々が経済産業活動を行うことで排出される二酸化炭素等の温室効果ガスが主原因とされ，地球規模での対応が急がれている．我が国では，2050年までに実質的な二酸化炭素排出量をゼロにするカーボンニュートラルを実現する目標を打ち立て，これに向けて様々な取組が行われている．その中でも，四面環海である日本が持つ海洋資源を活用する洋上風力発電は再生可能エネルギーの切り札と位置付けられ，着床式洋上風車の施工が進んでいる．

日本付近の海底地形は大陸棚と呼ばれる沿岸部と大水深の外洋部に分別できるが，外洋部は大水深ゆえに着床式洋上風車の施工は困難である．したがって，浮体式洋上風力発電事業が検討されている[1]が，沿岸部と比較してより厳しい波浪条件下での建設作業が想定されることや，波浪の影響を受けずに施工が可能な**図-1**に示すSEP船（Self-Elevating Platform）が大水深であるため適用できない等，船舶や吊荷の顕著な動揺の発生が予想され，建設作業時の経済性や安全性について懸念がある．これらを払拭すべく，浮体式洋上風車をターゲットとした船舶および吊荷の動揺特性を対象とした既往研究がいくつかある．小林ら[2]は，吊荷と没水吊荷の動揺実験を行い，施工船舶の固有周期と同程度の波周期により吊荷の共振が発生することを示した．また柳澤ら[3]は，スパー型洋上風車の風車部搭載過程を対象とした動揺実験を行い，施工船舶の固有周期と波周期の一致が大きな動揺を励起させると報告している．

一方，従来の海上における施工可否判断や船舶の退避判断は，正確な評価や高精度化を目的として様々な検討が行われている[4)5)6)]が，いずれも波浪観測時系列のゼロクロス法から算出された有義波高や有義波周期，熟練施工者の経験などを総合的に勘案して行う手法を取っている．しかし，前述した外洋部での浮体式洋上風車の建設時は，浮体基礎部分や吊荷，施工船舶の動揺がある中で精緻な



図-1　SEP 船（Self Elevating Platform）

施工を行う必要があり，動揺の要因となる波成分をより詳細に考慮した施工可否判断や退避判断が求められる．このような背景にあって筆者らは，従来の施工可否判断や退避判断手法に加えて周期帯別波高の活用が必要と考えた．そこで本検討では，全国港湾海洋情報網NOWPHAS[注1)]（以下NOWPHAS）で観測された周期帯別波高による施工可否判断結果の従来手法との比較と施工可否判断への適用検討を行った．

2. NOWPHAS 観測値への適用

周期帯別波高の適用検討にあたり，まずNOWPHAS観測値に対して従来の施工可否判断や退避判断に用いていた有義波高 $H_{1/3}$，有義波周期 $T_{1/3}$ による施工可否判断方法を適用した．NOWPHAS 対象地点を**図-2**，検討諸元を**表-1** に示す．対象地点はいずれも NOWPHAS の欠測が少ない八戸を太平洋側，藍島を日本海側として選定した．また，期間は年変動の影響を加味し 2020 年～2023 年の 4 年間とした．作業中止基準については，外洋での施工に固有周期 8 s の起重機船を用いることと仮定して設定した．各地点での対象期間の $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ の出現頻度分布を**図-3** に示す．八戸では，基準波高の超過が 12 %程度，基準周期の超過が 35 %程度となり，対象期間全体の 47 %程度が施工不可判定，稼働率 52.6 %となる．一方，藍島では基準波高の超過が 6 %程度，基準周期の超過が 1 %程度となり，対象期間全体で施工不可判定は 8 %程度，稼働率は 92.3 %となった．

続いて，周期帯別の波高を H_{obs} とし，従来手法で施工可能と判断したタイミングを抽出して**図-4** に示す頻度分布に整理した．3-6 s の成分については，八戸，藍島ともに 0.5 m を超過する波高が 20～30 %，その他は 0.5 m 以下の波高となり概ね同傾向である．したがって，この周期帯の成分は今回想定する施工船舶による施工への影響は少ないと考える．一方で，6-8 s の成分については，

表-1　NOWPHAS 検討諸元

対象地点	NOWPHAS	
	八戸	藍島
対象期間	2020年～2023年（4年間）	
作業中止基準	波高 1.5m	周期 8s

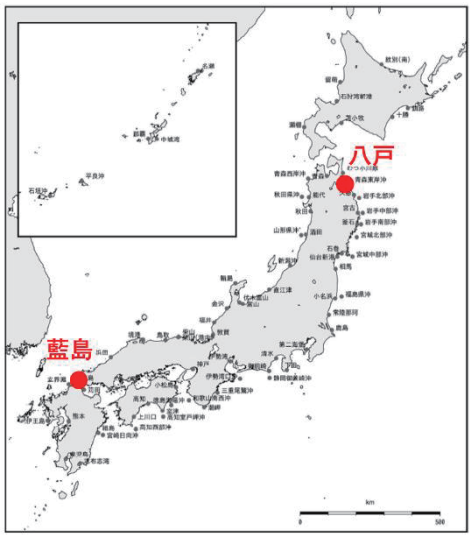


図-2　NOWPHAS 対象地点

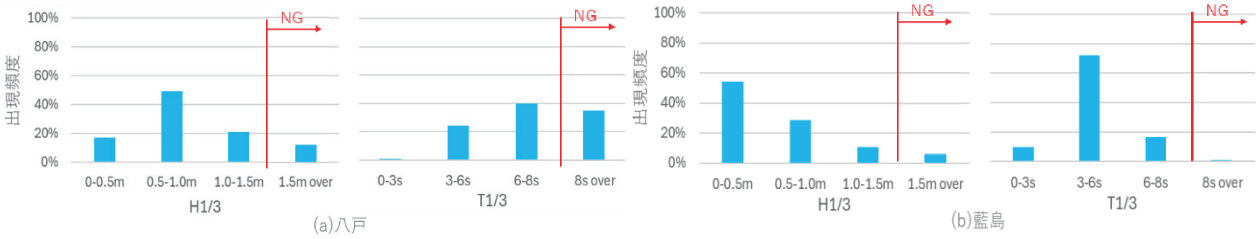


図-3　NOWPHAS 出現頻度分布

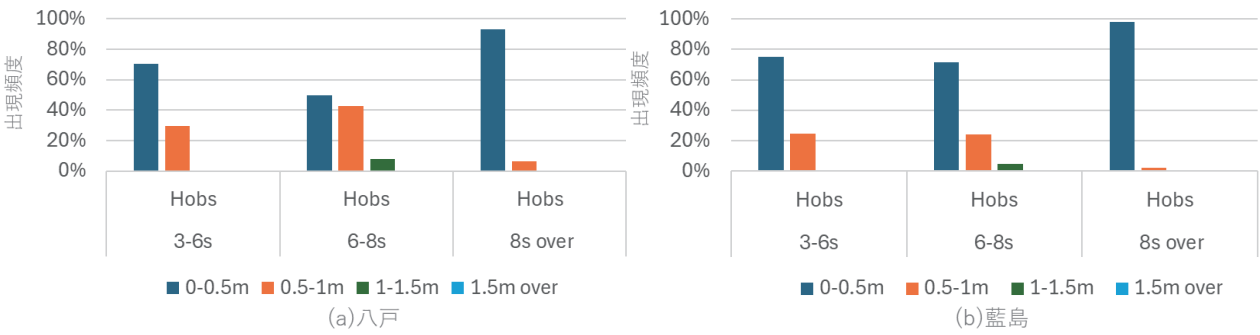


図-4　NOWPHAS 観測値における周期帯別波高頻度分布

八戸で 0.5 m を超過する波高が 40%程度，藍島では同様の成分が 20 %程度含まれている．また少数ではあるが両地点とも 1-1.5 m の波高もみられ，8 s 以上においても 0.5 m を超過する波高が少数ではあるが含まれる．そこで，前述した柳澤らが行った検討条件に倣い，最も精緻な作業が求められるスパー型浮体の風車部吊下げ作業を対象として，施工船舶の固有周期に合致する周期帯 6-8 s で波高 0.5 m を超過する場合を作業中止基準として設定し，稼働率を算出した．**表-2** に示す算出結果より，$H_{1/3}$，$T_{1/3}$ で算出した稼働率は八戸で 52.6 %，藍島で 92.3 %であるが，周期帯別の波高を作業中止基準として加味した場合には，八戸で 25.8 %，藍島で 64.8 %となり，統計値により算出された稼働率から減少した．したがって，従来用いている $H_{1/3}$，$T_{1/3}$ で施工可能だと判断した場合の波浪条件でも，周期帯別に分割すると施工船舶の動揺を増大させる 8 s 付近において，波高が 0.5 m を超過するような相応のエネルギー成分を含有しており，施工中の船舶および吊荷の動揺を励起させる要因となり得ることがわかる．よって従来の $H_{1/3}$，$T_{1/3}$ のみで施工可否判断や退避判断を行うことは，施工可否判断と現地の波浪条件が合致しない可能性があり，浮体式洋上風力等の精緻な施工が求められる場合に，安全性や経済性に懸念があることが示された．

3. 観測値と予測値の比較

NOWPHAS 観測値を用いた施工可否判断や退避判断について前述したが，観測値を用いた施工可否判断を行うのは施工の当日や施工中に次工程に移る際等，比較的喫緊の事象についての意思決定に用いる場合が多い．この場合，施工を行わない判断をした際には現地付近に施工船舶が停泊し，条件が整えばすぐに施工が再開できる体制を取る．一方で，1 週間程度先の施工についての船舶の稼働を検討する場合や，気象擾乱により退避の検討を行わなければならない場合には，やや先の事象についての意思決定が必要である．この際には，予測値を用いて意思決定が行われるため，予測値に対しても周期帯別の波高による施工可否判断や退避判断の検討が必要であると考え，観測値と予測値の比較を実施した．

H_{obs} と同一期間に対して，**図-5** に示す太平洋を含めた領域を対象に**表-3** に諸元を示す WAM モデルによる波浪

表-2 観測値から算出した稼働率

稼働率			
八戸		八戸	
$H_{1/3}$のみ	6-8s・0.5m考慮	$H_{1/3}$のみ	6-8s・0.5m考慮
52.6%	25.8%	92.3%	64.8%

表-3 WAM 計算諸元

最小周波数	0.042Hz～1.174Hz
周波数分割数	35
周波数間隔	倍率1.1
方向分割数	16
水深条件	深海



図-5 WAM 計算領域

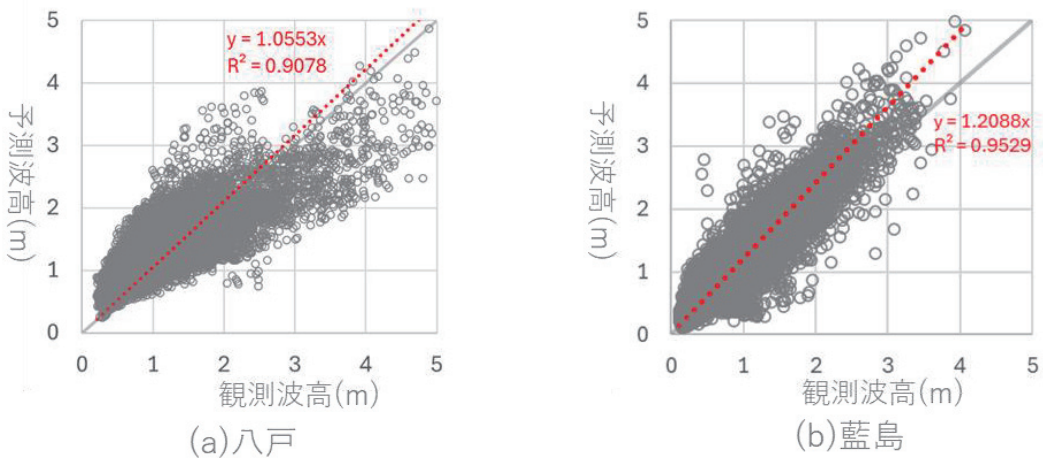


図-6 $H_{1/3}$ における観測値と予測値の相関図

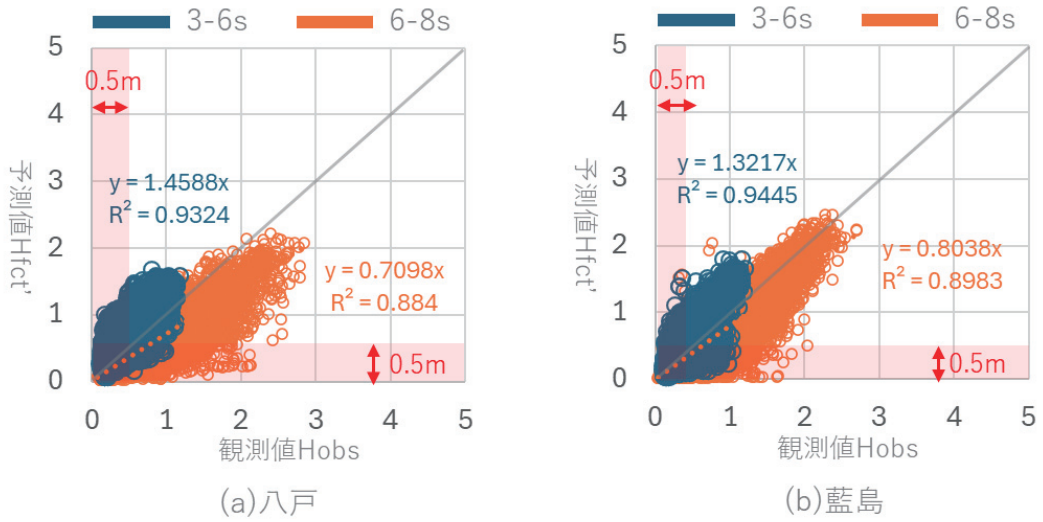


図-7　観測値 H_{obs} と予測値 H_{fct} の相関図

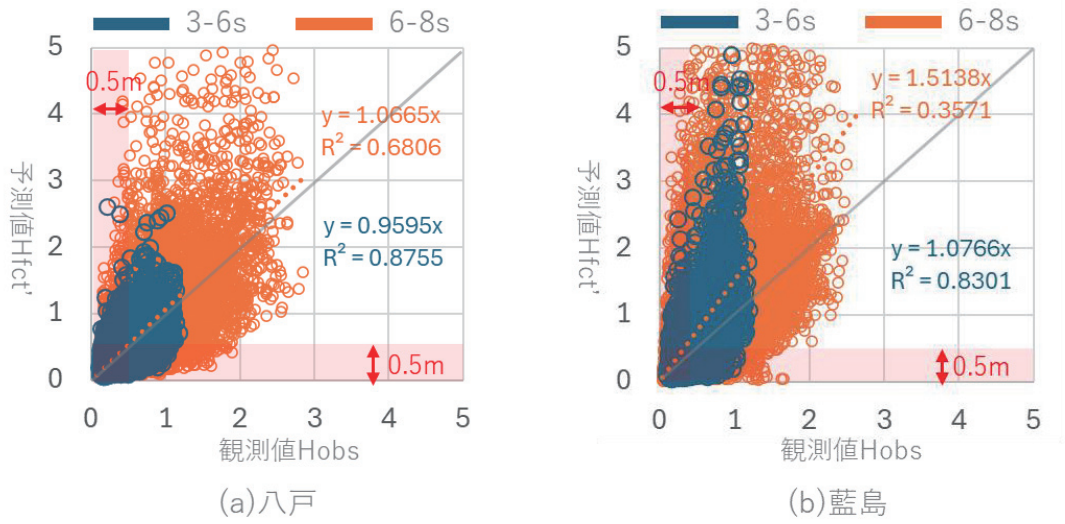


図-8　観測値 H_{obs} と補正後予測値 H_{fct}'の相関図

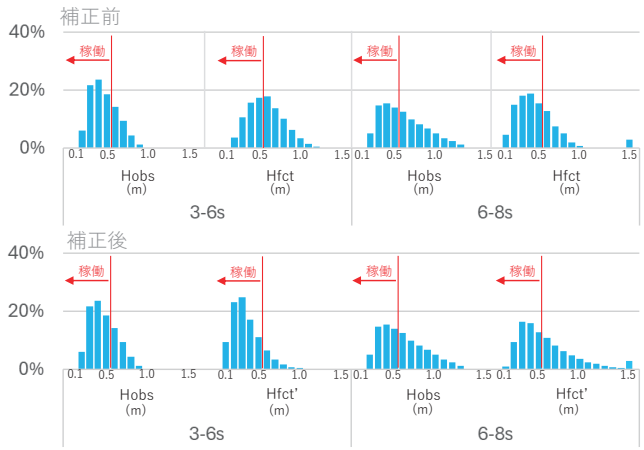
予測を行い，周期帯別の予測波高 H_{fct} を算出した．なお，WAM モデルによる波浪予測のデータについては，予則初期値から 6 時間分を結合したものを使用した．

まず，2 章で算出した $H_{1/3}$ について，観測値と予測値の相関図を**図-6** に示す．八戸は回帰係数が 1.06 と観測値と予測値に強い相関があり，統計的にみると予測精度は良好である．藍島では，回帰係数が 1.21 とやや予測値が過大評価傾向であるものの大きな乖離はなく，統計的にみると概ね波浪状況を予測できていることがわかる．

図-7 に示す H_{obs} と H_{fct} の相関図では両地点とも，3-6 s の周期帯では過大評価，本検討で対象となる施工船舶の固有周期付近の 6-8 s では過小評価となり，周期帯別にまとめた場合には前述した有義波高の相関とは乖離がある．したがって，一見統計的に評価すると概ね予測できている場合にも，周期帯別に精査すると観測値と乖離があることが明らかとなった．また，2 地点間に着目すると八戸に比べて藍島が観測値と予測値の乖離が少ない．これは，うねり成分の評価について観測値と予測値に差異があることが原因と考えられ，観測地点が太平洋側に位置する八戸の方がうねり成分をより内包することが予想できるが，WAM モデルは低波浪時の短周波成分から高周波成分へのエネルギー輸送に課題があることが報告されており [7]，これに起因して八戸の方が観測値と予測値の乖離が増大したと考える．この予測結果を用いて施工可否判断や退避判断のための意思決定を行うことを想定した場合，対象とした船舶の動揺に起因する 8 s 付近の周期帯が過小評価傾向であるため，予測の見逃しによる安全性のリスクが懸念される結果となった．

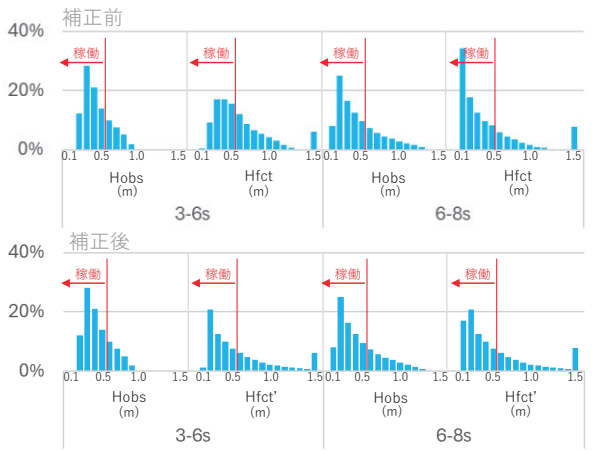
4.　観測値による補正

前述の通り，従来使用していた $H_{1/3}$，$T_{1/3}$ の予測では，内包される周期成分を加味した施工可否判断や退避判断は困難である．加えて，周期帯別波高の予測精度は波浪予測モデルや予測対象地点の特性に依存する．予測精度



稼働率			
観測値H_{obs}	予測値		
	H_{fct}（補正前）	H_{fct}'（補正後）	補正による改善率
25.8%	37.4%	28.9%	8.5%

(a)八戸



稼働率			
観測値H_{obs}	予測値		
	H_{fct}（補正前）	H_{fct}'（補正後）	補正による改善率
64.8%	74.2%	66.2%	8.0%

(b)藍島

図-9　補正前後の周期帯別波高頻度分布および稼働率

の向上は，前述した WAM モデルのエネルギー輸送の改善も考えられるが，本検討ではより簡便に周期帯別波高の予測値を改善するべく，周期帯別波高の観測値を用いて予測値を補正する手法を検討した．

施工の 24 時間前に最終的な翌日の施工可否を判断すると仮定し，前章で比較に使用した H_{obs} と H_{fct} を用いて各時系列の周期帯別の H_{obs}/H_{fct} を補正値として算出，24 時間後の周期帯別予測値に算出した H_{obs}/H_{fct} を乗じた際の補正予測値を H_{fct}'とした．なお，予報モデルの誤差はモデル固有の誤差と使用する風データに内包される誤差に大別されるが，本検討ではモデル依存の誤差の影響を極力軽減し，補正効果のみを評価できるよう，補正対象とした時系列データは 3 章で使用した予測初期値から 6 時間分を結合したものを使用している．

H_{fct}'と観測値の相関図を示した**図-8** では，**図-7** に示した補正前の相関図と比較すると，八戸において 3-6 s，6-8 s のいずれの周期帯でも回帰係数が 1.0 に近づいており，補正により観測値と予測値の乖離が改善された．一方，藍島では 3-6 s の周期帯では回帰係数が 1.08 となり一定の補正効果がみられたものの，6-8 s の周期帯では，回帰係数が補正前の 0.80 から補正後には 1.51 となり，過小評価傾向から過大評価傾向に推移した．これは，予測値の周期帯別波高が 1～5 cm 程度の極小な算出結果である際に補正値 H_{obs}/H_{fct} が増大するためである．八戸に比べて藍島は低波浪成分の比率が多いために補正後の予測値の過大評価傾向がより顕著にみられたと考える．したがって，観測値と予測値の比率を補正値として用いる場合には，ある一定以上の波高のみ補正値を抽出する等，低波浪成分からの補正値の算出方法について留意する必要があることを確認した．

また，補正後の周期帯別の波高について 0.1 m 毎の頻度分布および稼働率を**図-9** に示す．まず周期帯別波高の頻度分布について着目すると，八戸，藍島ともに補正前後で頻度分布に変化がみられた．八戸については 3-6 s の周期帯において 0.2～0.3 m の低波高成分が過小評価傾向であったが，補正により改善され，概ね観測値と同様の分布となっている．一方 6-8 s の周期帯では 1.0 m 以上の予測波高について分布がなかったが，補正後は 1～10 %程度の分布がみられ，観測値と同傾向となった．一方藍島では，分布形状の著しい近似はみられなかったものの，3-6 s では低波高域の過小評価の改善，6-8 s については 0.1 m の低波高域の過大評価の改善と 0.3 m 以上の分布形状の観測値への近似が確認できた．

表-1 に示す従来の作業中止基準では有義波高で 1.5 m であるが，前述の通り，有義波高で作業可能と判断された場合であっても施工船舶の固有周期と合致する周期成分が含まれており，安全性に懸念がある．そこで，2 章で述べた周期帯 6-8 s において波高 0.5 m という作業中止基準を適用して稼働率について検討した．その結果，2 章で述べた観測値全体の稼働率に対して，両地点とも補正前では観測値の稼働率よりも 10～15 %程度過大評価しているが，補正後では観測値との稼働率の差が 1～3 %程度となり，観測値により算出された稼働率と概ね同等となった．

以上より，周期帯別波高の観測値を用いた予測値の周期帯別の補正は，低波高域については留意が必要なものの，周期帯別波高を作業中止基準とする場合に補正効果が得られることが確認できた．

5. まとめ

本検討では，周期帯別波高の施工可否判断や退避判断への活用について，観測値や予測値による従来手法との比較および観測値を用いた周期帯別波高の予測値の補正を行った．得られた主な結論を以下に示す．

(1) NOWPHAS 観測値について周期帯別波高を適用した結果，従来手法である $H_{1/3}$，$T_{1/3}$ で施工が可能と判断された場合でも，施工船舶の動揺を励起するような周期帯に相応のエネルギー成分が内包されている．したがって，統計値のみで施工可否判断や退避判断を行う場合には判断条件と現地状況が乖離している可能性があり，施工の経済性や安全性への懸念が示された．

(2) 周期帯別波高の観測値と予測値を比較した結果，$H_{1/3}$，$T_{1/3}$ により予測が概ね的中していると評価できる場合でも，内包される周期成分では観測値と予測値に乖離があることが示され，過大評価傾向であれば空振りとなり経済性のリスクが，過小評価傾向であれば見逃しとなり安全性のリスクが発生しうることが明らかとなった．

(3) 観測値の周期帯別波高を用いて予測値の補正を実施した結果，低波浪時の補正方法を勘案する必要性はあるものの，予測値と実測値の稼働率の乖離の改善，周期帯別波高分布形状の乖離が改善され，実測値を用いた補正効果が得られることが示された．

以上より，従来の施工可否判断および退避判断手法に加えて，施工船舶の動揺解析結果等を加味した周期帯別波高による施工可否判断および退避判断は，潜在的な経済性や安全性のリスクを顕在化させ，海上施工の最適化に寄与すると考える．

NOTES

注1) 国立研究開発法人港湾空港技術研究所：全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)，2022．

REFERENCES

1) 宇都宮智昭，佐藤郁，白石崇，乾悦郎，石田茂資：浮体式洋上風力発電の実用化に向けて-五島市椛島における実証事業-, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.70, No.2，I_1-I_6，2014. [Tomoaki, U., Iku, S., Takashi, S., Etsuro, I., and Shigesuke, I.: Toward the commercialization of floating offshore wind power generation -The demonstration project in goto kabashima-, *Proceedings of civil engineering in the ocean*, Vol.70,No.2,I_1-I_6,2014.]

2) 小林拓磨，髙橋研也，西畑剛：水理模型実験を用いた気中および没水吊荷の動揺特性，土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.77, No.2, I_637-I_642, 2021. [Takuma, K., kenya, T., and Takashi, N.: Study on motion characteristics of aerial and semi-sub-merged suspended loads using hydraulic experiment, *Proceedings of civil engineering in the ocean*, Vol.77, No.2,I_637-I_642,2021.]

3) 柳澤創，髙橋研也，西畑剛：スパー型浮体への風車一括搭載過程に関する水理模型実験，土木学会論文集，Vol.80，No.18，24-18188，2024. [Hajime, Y., kenya, T., and Takashi, N.:Hydraulic model experiment on the process of installing a batch of wind turbines on the spar type floating structure,*Proceedings of civil engineering,* Vol.80,No.18,24-18188,2024.]

4) 森屋陽一，琴浦毅，関本恒浩：日本海における波浪推算モデルを用いた海上・潜水作業可否の予測精度，土木学会論文集 B3（海洋開発），第 66 巻，pp.447-452，2010. [Yoichi, M., Tsuyoshi, K and Tsunehiro, S.: Examination of Wave Prediction Accuracy for Marine Works in The Sea of Japan, *Proceedings of civil engineering in the ocean*, Vol. 66, pp. 447-452, 2010.]

5) 琴浦毅，森屋陽一，関本恒浩：波浪推算の計算領域が海上施工可否の判定制度に及ぼす影響，土木学会論文集 B3（海洋開発），67 巻 2 号，pp. I_880-I_885，2011. [Tsuyoshi, K., Yoichi, M and Tsunehiro, S: Influence of Calculation Area on Wave Prediction for Marine Works in the Pacific Ocean, *Proceedings of civil engineering in the ocean*, Vol. 67, Issue 2, pp. I_880-I_885, 2011.]

6) 琴浦毅，田中仁：波浪推算モデルの低波浪時精度向上に関する研究，土木学会論文集 B3（海洋開発），73 巻 2 号，pp. I_971-I_976，2017. [Tsuyoshi, K. and Hitoshi, T.: Investigation on Improve Accuracy of WAM Prediction Under Mild Wave Climate, *Proceedings of civil engineering in the ocean*, Vol. 73, Issue 2, pp. I_971-I_976, 2017.]

7) 橋本典明，川口浩二，真期俊行，永井紀彦：第 3 世代波浪推算法（WAM）の推算精度に関する検討，港湾技術研究所報告，第 38 巻第 4 号，1999. [Noriaki, H., Koji, K., Toshiyuki, M. and Toshihiko, N.: Examination of the prediction accuracy of the third generation wave prediction model(WAM), *Report of the port and harbour research institute*, Vol. 38, No.4, 1999.]

(Received February 4, 2025)
(Accepted May 15, 2025)

EXAMINATION OF THE USE OF WAVE HEIGHTS BY PERIOD FOR JUDGING THE FEASIBILITY OF OFFSHORE CONSTRUCTION

Hirohito NISHI and Tsuyoshi KOTOURA

The applicability of offshore construction is determined by comprehensively taking into account factors such as significant wave heights calculated from the zero-crossing method of wave observation time series, significant wave periods, and the experience of skilled construction workers. In this study, we compared the conventional method of judging the feasibility of construction using period-specific

wave heights and examined its application to judging the feasibility of construction. As a result, it was found that the use of period-specific wave heights can assist in decision-making by taking into account the energy of the contained wave period, even in cases where the conventional method misses the period-specific wave heights and there is a risk of safety. The correction of the predicted wave heights by periodic zone using the observed values can be confirmed to have a corrective effect on the wave height distribution, and is expected to contribute to decisions on whether construction is feasible or not, as well as to decisions on retreat.