

宮崎港における防波堤工事の中止要因の推定

安部 浩史*・橋本 典明**・槇岡 大祐***・日恵井 京子****

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** (一財) 沿岸技術研究センター 参与

*** 国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 設計室 建設管理官

**** 前 国土交通省 九州地方整備局 宮崎港湾・空港事務所 前任建設管理官

宮崎港で行われた防波堤港内側での海上工事において、季節によっては実態工事稼働率が低く、工事の進捗に影響を及ぼしかねない状況であった。本検討では、宮崎港で行われた防波堤港内側での海上工事の中止要因を推定し、工事中止判断基準を検討した。工事記録と波浪推算結果より、対象地点においては工事の可否には波高に加えて波向の影響が大きいことを確認した。この原因として、防波堤による反射波と沿い波の影響が示唆された。また、当該工事において、波高に加えて波向を考慮した新たな工事中止判断基準の作成を試み、工事実施可否の予測精度が向上することを確認した。

キーワード：港内海上工事、実態工事稼働率、工事中止判断基準

1. はじめに

宮崎港防波堤（南）港内側の基礎マウンド改良工事（図-1の赤丸の位置）が進められているが、季節によっては実態工事稼働率が低く、工事の進捗に影響を及ぼしかねない状況であった。今後、防波堤の堤頭部に向かって工事を進めていくことから、波浪による実態工事稼働率の更なる低下が懸念されていた。

本検討では、宮崎港を対象として、波浪が及ぼす工事への影響について検討することを目的とした。さらに、防波堤工事の中止要因について解明するとともに、新たな工事中止判断基準を作成することを試みた。

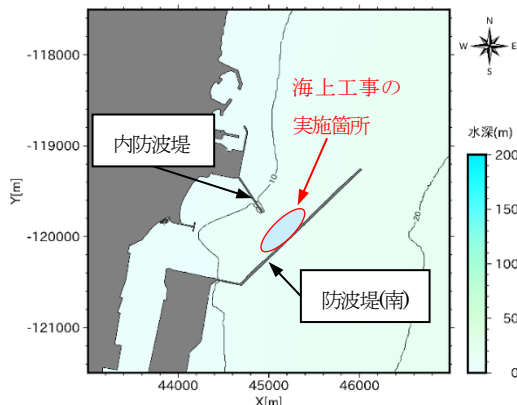


図-1 宮崎港における海上工事の実施箇所（○印）

工事記録簿による工事実施日と休止日をもとに、年換算荒天日数^{注1)}を式(1)から算出した。

年換算荒天日数

$$= \text{実態荒天日数} \times \frac{\text{年換算供用日数}(365 \text{ 日})}{\text{実態供用日数}} \quad (1)$$

ここで、実態供用日数=運転日数+休止日数、休止日数=休日日数+安全訓練日数+荒天日数-休日作業日数+代休日数である。

運転日数および荒天日数をもとに式(2)より実態工事稼働率を算出したところ、A社で66.7%、B社で64.7%であった（表-1）。

$$\text{実態工事稼働率} = \frac{\text{運転日数}}{\text{運転日数} + \text{実態荒天日数}} \times 100(2)$$

表-1 各会社の工事記録

項目	A 社	B 社
実態荒天日数	36	12
年換算供用日数	365	365
実態供用日数	172	51
運転日数	72	22
休止日数	100	29
年換算荒天日数	76	86
実態工事稼働率 [%]	66.7	64.7

2. 工事実態の把握

2022年6月28日～2023年2月24日にかけて宮崎港防波堤（南）港内側の基礎マウンド改良工事を実施した2社の工事記録簿をもとに、年換算荒天日数および実態工事稼働率を算出した。

3. 常時波浪推算の実施

対象海域の長期間の連続した波浪推算値をもとに波浪変形計算を行い、港内の面的な工事稼働率を算定するため、常時波浪推算を実施した。また、波浪観測値と波浪推算値

の比較を行い、波浪変形計算に使用する波浪推算値の妥当性を確認した。

3.1 計算条件

波浪推算モデルとして WAVEWATCH III¹⁾ (第三世代波浪推算モデル) を使用した。波浪推算の計算領域を、太平洋全体とした第1領域から対象港湾周辺の第3領域とし、計算期間を2013年1月～2023年3月の10年と3ヶ月とした。

3.2 波浪推算精度の検証

波浪推算精度を検証するため、対象港湾近隣の波浪観測値と波浪推算値を比較した。図-2、図-3に、工事期間(2022年6月～2023年3月)の中でも特に波高の大きかった期間(2022年9月)における、NOWPHAS 宮崎日向沖における観測値との比較結果を示す。比較の結果、波高周期ともに両者がよく一致しており、波浪推算精度に問題がないことを確認した。

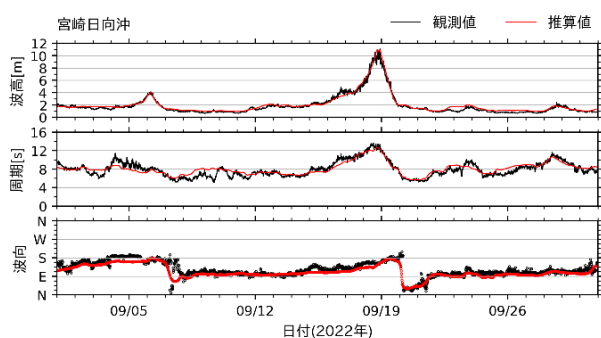


図-2 時系列変化の比較 (宮崎日向沖)

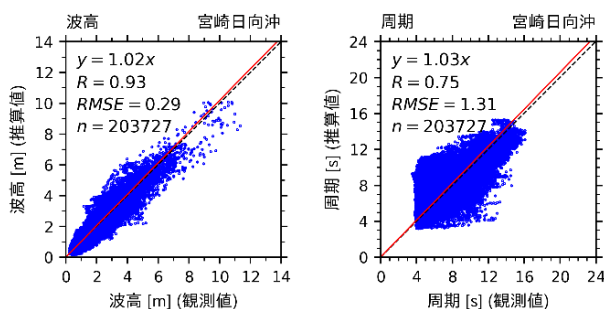


図-3 波浪推算値と観測値の相関解析 (宮崎日向沖)

4. 従来方法による工事稼働率の算定

4.1 波浪変形計算の実施

波浪変形計算において一般的なエネルギー平衡方程式モデル (ここでは従来方法と呼ぶ) を用いて、各波向・周期別に入射波高を 1m とした波浪変形計算を実施し、港内の波高比の頻度分布を面的に作成した。ただし、エネルギー平衡方程式モデルでは波の反射が考慮されないことに留意が必要である。

検討波向を周辺地形より宮崎港に來襲する主要波向で

ある NNE～SSE の 7 波向、検討周期を波浪推算結果より主要な周期である 5, 7, 9, 11s の 4 種類、及び計算格子サイズを 10m とした。

4.2 工事稼働率の平面分布

波浪変形計算による波高比分布をもとに港内の面的な工事稼働率を整理した。波浪変形計算による波高比分布に沖合の基準地点 (図-4) における波浪頻度分布を掛け合わせることで各メッシュ地点での波高データが得られる。その各メッシュ地点で、限界波高の未超過確率 (限界波高未満の波高の出現頻度) を算出することで、面的な工事稼働率が得られる。波浪推算による工事稼働率 (以下、「期待工事稼働率」という。) の算定式を式(3)に示す。なお、海上工事の限界波高を片山・前田²⁾より 1m とした。

図-5に常時波浪推算結果にもとづく、宮崎港における期待工事稼働率の平面分布 (通年) を示す。防波堤 (南) 先端から内防波堤を結ぶラインの港内側では、期待工事稼働率は約 95% となった。前述した通り、実態工事稼働率は 65～67% であり、期待工事稼働率より低く、従来方法では工事実態を再現することができないことが明らかとなった。

$$\text{期待工事稼働率} = \frac{1 \text{ m 未満の波高の個数}}{\text{波高の全個数}} \times 100 \quad (3)$$

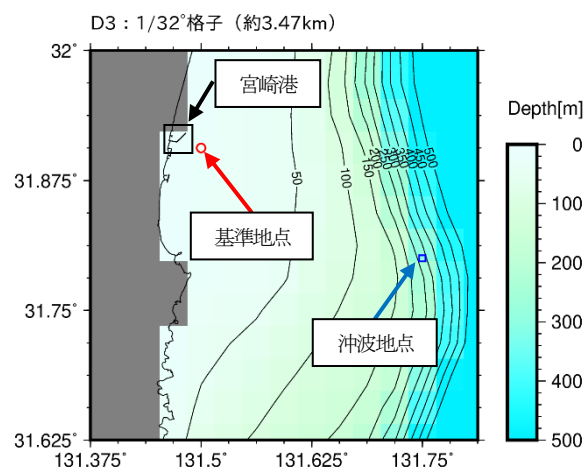


図-4 波浪推算結果の抽出地点

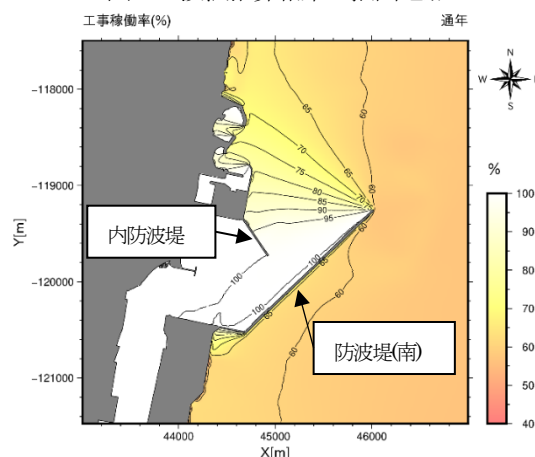


図-5 期待工事稼働率の平面分布 (通年)

5. 工事中止要因の推定

5.1 工事中止日の波浪状況の整理

対象港湾において防波堤の海上工事を実施した 2 社の工事記録簿による工事中止日の波浪状況の整理を行った。ここで、外洋での波浪状況による工事中止要因を検討するため、波浪推算結果の抽出地点を図-4 に示した沖波地点とした。

図-6 に工事実施日と中止日における日平均の波高、周期、波向の頻度分布を示す。波高については、実施日では 1.0~1.2m の頻度が高く、中止日では 1.6m~1.8m の頻度が高い。日平均波高が大きい時、工事中止になりやすいことが分かる。周期については、実施日では 7.0~8.0s の頻度が高く、中止日では 6.0~7.0s の頻度が高い。日平均周期については、工事中止との明確な影響は見られない。波向については、実施日と中止日ともに波向 E の頻度が最も高い。一方、中止日において波向 NE と ENE の 2 波向で全体の 41.5% を占めており、実施日の頻度（全体の 16.0%）に比べて高い。波向 NE~ENE の場合に、工事中止が多く発生していることが分かる。

図-7 に工事実施日と中止日における波高と周期の関係（図-7(a)）、および波高と波向の関係（図-7(b)）を示す。波高と周期の関係については、前述したように、日平均波高が大きいときに工事中止になりやすいが、実施日と中止日の周期による顕著な差が見られなかった。一方、波高と波向の関係については、中止日において N 系（波向 NNE~ENE）で比較的波高が低く、E~S 系になるにつれて波高が高くなる傾向が見られた。すなわち、N 系の波が来襲する際には、低い波高でも工事が中止になっていることが分かる。

以上より、当該工事の中止要因には波高に加えて波向の影響が大きいことが判明した。具体的には、N 系の波向では、低い波高でも工事が中止となっていた。特に、波向 NE~ENE において実施日が少なく、中止日が多くなっていた。N 系の波浪は沖防波堤に平行な波向となるため、防波堤の沿い波による影響が考えられた。

5.2 ブシネスクモデルによる検討

沿い波の影響を調べるため、ブシネスクモデルを用いた波浪変形計算を行った。ブシネスクモデルでは、エネルギー平衡方程式モデルでは検討ができない反射の影響を考慮することが可能である。検討波向を NNE~ESE の N 系の 5 波向、入射波高を 1.0 m、入射波周期を 10 s、 $S_{max}=10$ 、計算格子サイズを 10 m とした。

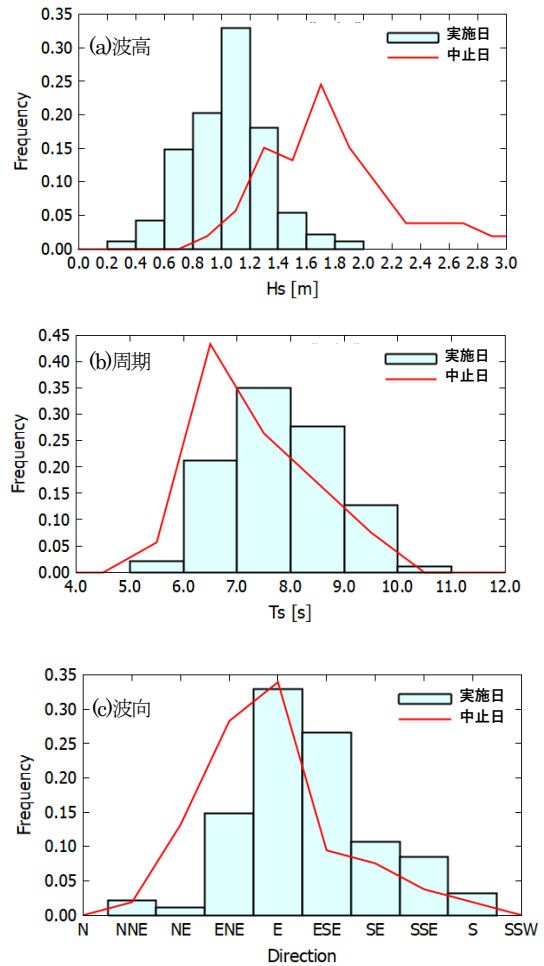


図-6 工事実施日と中止日の波浪諸元（日平均）

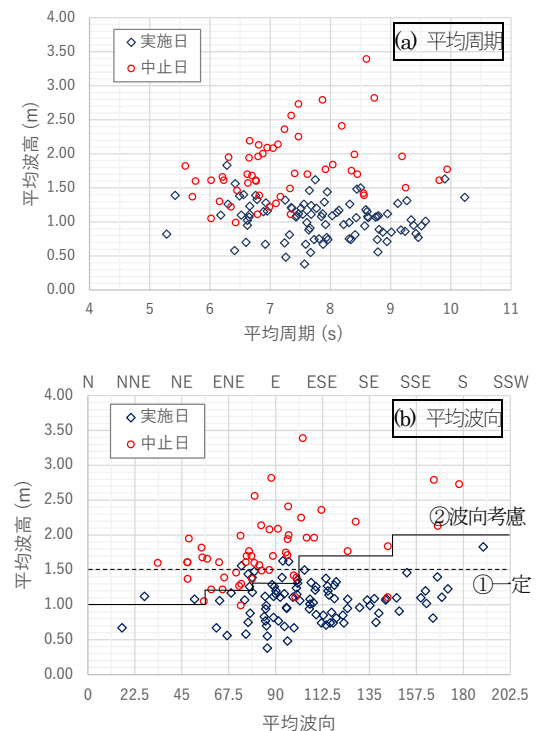


図-7 工事実施日と中止日の平均波高との関係

一例として、図-8に工事中止日の多かった波向NEのブシネスクモデルによる港内波高分布を示す。NEの波向では沖防波堤港内側に波高の高い箇所が生じていることを確認した(図-8の赤枠内)。沿い波の発生によって防波堤港内側の工事の中止が想定以上に多くなっていたものと推定した。

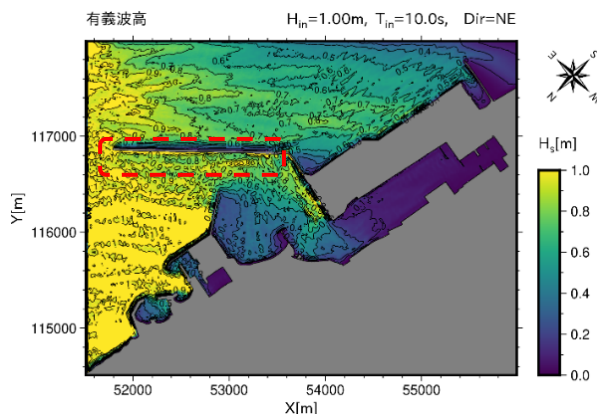


図-8 港内波高分布

5.3 新たな工事中止判断基準の作成

(1) 新たな工事中止判断基準の提案

ブシネスクモデルによる検討の結果、当該港内工事の実施可否については、波高と波向の影響が大きいことが明らかとなった。そこで、波向を考慮した新たな工事中止判断基準(波高)を作成した(表-2)。図-7(b)に実線(②波高+波向)で示す、工事実施日と中止日の閾値を工事中止判断基準とした。N系の波向では工事中止判断基準を1.0mとして、S系になるにつれて徐々に基準値を上げた。なお、波高の抽出地点は、工事中止日の波浪状況の整理と同じく、図-4に示す沖波地点である。

(2) 工事中止判断基準の評価

新たな工事中止判断基準による工事实態に対する予測精度を評価する。評価方法は、気象庁の天気予報の検証として用いられているカテゴリ検証^{注2)}の分割表を用いる。表-3にカテゴリ検証の分割表を示す。

$$\text{適中率} = (\text{FO} + \text{XX}) / \text{N} \quad (4)$$

$$\text{空振り率} = \text{FX} / (\text{FO} + \text{FX}) \quad (5)$$

$$\text{見逃し率} = \text{XO} / \text{M} \quad (6)$$

ここで、適中率とは、工事中止判断基準による予測が適中した割合であり、1に近いほど精度が良い。空振り率とは、予測は工事中止であったが実際は工事実施可能であった場合の割合である。見逃し率とは、予測は工事実施可能であったが実際は工事不可能(中止)であった場合の割合である。海上工事を行う場合、作業船を出すこと自体にコストが発生するため、見逃し率(予測は工事可で実際は中

止)をできるだけ小さくすることが望ましい。

工事中止判断基準を、波向きによらず一定(波高1.5m)(図-7(b)①)とした場合と、波向を考慮して変化させた場合(図-7(b)②および表-2)の2種類の工事中止基準について、工事実施可否の予測精度を評価した。

表-4に、2種類の工事中止判断基準による適中率、空振り率、見逃し率を示す。波向きによらず一定とした場合の適中率は86%と高い結果であった。しかしながら、波向きによらず一定とした場合の見逃し率(工事可能と予測したが工事中止であった事例の場合)は28%であるが、波向を考慮することで8%となり、大幅に改善した。見逃し率の低さは海上工事の費用を抑える上で重要であるため、新たな工事中止判断基準は施工管理上、有用と考えられる。

以上のように、波向きを考慮する新たな工事中止判断基準では、波高を一定値とする工事中止判断基準よりも、工事実施可否の予測精度が向上することが確認された。

表-2 波向を考慮した工事中止判断基準(波高)
(宮崎港の沖波地点)

波向	波高基準値(m)	波向	波高基準値(m)
N	1.00	ESE	1.70
NNE	1.00	SE	1.70
NE	1.00	SSE	2.00
ENE	1.20	S	2.00
E	1.30	SSW	2.00

表-3 カテゴリ検証用分割表

予測	実際		合計
	中止	実施	
中止	適中(FO)	空振り(FX)	FO+FX
実施	見逃し(XO)	適中(XX)	XO+XX
合計	M	X	N

表-4 工事中止判断基準の比較

判断基準	適中率[%]	空振り率[%]	見逃し率[%]
①一定	86	12	28
②波向考慮	88	22	8

6. まとめ

本検討では、宮崎港における防波堤港内側における海上工事の中止要因の推定を行い、波高に加えて波向の影響により中止日が多くなっていたことが示唆された。特に、N系の波向においては沿い波の発生によって防波堤工事の中止が多くなったものと推定された。沿い波の影響についてはエネルギー平衡方程式では考慮できないため、エネルギー平衡方程式による期待工事稼働率と、実態工事稼働率とに差が生じる結果となった。また、当該港内海上工事に対して、波高に加えて波向を考慮した新たな工事中止判断基準の作成を試みた結果、工事実施可否の予測精度が向上することを確認した。

海上工事の施工可否判断に関しては多くの研究が行わ

れている(例えば3)~11)。しかしながら、実際の工事記録を用いた工事中止要因の検討についてはほとんど行われていない。本検討は、実際の工事記録を用いて中止要因の検討を行ったという観点で、有用であるといえる。

しかし、本検討で使用した工事記録は2社のみ、かつ単年であり、波浪の年変動の影響等も未検証である。本検討で試みた、波高に加えて波向を考慮した新たな工事中止判断基準に対して、他の工事記録を用いた事例検討を行うなど、多面的な検証を行うことが今後の課題として挙げられる。

謝辞

本稿は、国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所発注の管内課題検討業務の成果の一部をまとめたものである。

本検討にあたっては、九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所および宮崎港湾・空港事務所の関係者から貴重なご意見、ご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

注釈

注1) 荒天リスク精算型試行工事積算要領(令和6年3月29日付)https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_fr5_000019.html (2024年4月1日参照)

注2) 気象庁 令和5年度数値予報解説資料集。
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpkaisetu/nwpkaisetu.html> (2024年4月1日参照)

参考文献

- 1) Tolman, H. L.: User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14, Technical note, MMAB Contribution 276, No. 220, 2009.
- 2) 片山裕之, 前田裕司: 港湾工事の供用係数に関する一考察, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 75, No. 2, pp. I_923-I928, 2019.
- 3) 上原教善, 鈴山勝之, 鈴木隆宏, 山川匠, 菊池睦: 低波浪時の海上工事中止の要因となる波エネルギーの特徴とその出現特性, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 73, No. 2, pp. I_959-I_964, 2017.
- 4) 澁谷容子, 森信人, 神田泰成: 統計的波高推算モデルを用いた海上施工の稼働率推定手法に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 79, No. 18, pp. 23-18131, 2023.
- 5) 白石悟, 石見剛: アンケートおよび動揺シミュレーションによる作業船の作業限界条件の分析, 海洋開発論文集, Vol. 14, pp. 317-322, 1998.
- 6) 澁谷容子, 佐藤あかね, 山野貴司, 小竹康夫, 中村友昭: リアルタイム波浪観測を用いたケーソン据付時の施工精度向上の可能性について, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 74, No. 2, I_623-I_628, 2018.
- 7) 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, 海洋開発論文集, 第26巻, pp. 447-452, 2010.
- 8) 琴浦毅, 森屋陽一, 関本恒浩: 波浪推算の計算領域が海上作業可否の判定に及ぼす影響, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 67, No. 2, pp. I_880-I_885, 2011.
- 9) 琴浦毅, 森屋陽一, 関本恒浩: 瀬戸内海における波浪推算モデルを用いた海上作業可否の判定精度, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 68, No. 2, pp. I_959-I_964, 2012.
- 10) 原知聡, 金洙列, 倉原義之介, 西山大和, 武田将英, 間瀬肇: 海上施工での利用を目的とした沿岸波浪数値予報モデル GPVW (CWM) の精度検証, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 75, No. 2, I_935-I_940, 2019.
- 11) 井手喜彦, 大橋果歩, 琴浦毅, 山城賢, 橋本典明, 児玉充由: 海象工事における施工可否判断の高精度化を目的とした機械学習の適用, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 77, No. 2, pp. I_1-I_6, 2021.

