

志布志港における港内静穏度向上策の検討

田中 真史*・高山 知司**・惟住 智昭***・荒田 育弥****

* 前（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

*** 前 国土交通省 九州地方整備局 志布志港湾事務所 工務課長

****国土交通省 九州地方整備局 志布志港湾事務所 工務課 工務係長

志布志港においてしばしば発生する荷役障害を受けて、これまで、港内静穏度を確保する目的で施設整備が進められてきた。現状においても、若浜中央埠頭2号および3号岸壁に係留しているフェリーに荷役障害が発生している。そこで、フェリー岸壁を対象として港内静穏度向上策を検討した。

対象岸壁においては、港口部からの進入波に比較して、東側開口部からの入射波の影響が大きいことに着目し、東側開口部からの入射波に対する静穏度向上策を検討した。長周期波対策には没水型の捨石マウンド構造物を適用し、潮位変化を考慮した天端高設定方法を提案した。これらの検討を踏まえ、目標稼働率を満たす港内静穏度向上策を提案した。

キーワード：荷役稼働率、港内静穏度、長周期波対策、船体動揺シミュレーション

1. はじめに

鹿児島県南東部に位置する志布志港において、しばしば荷役障害が発生してきた。平成2年から平成6年にかけて、約60本の係留索が切断したとの平石ら¹⁾による報告や、船舶と岸壁の接触事故により、岸壁損傷分だけで約6億5千万円の損害が生じたとする国土交通省の発表²⁾は、その代表例である。このような状況を踏まえ、九州地方整備局志布志港湾事務所は、外郭施設等の整備を継続的に進めている。しかしながら、現状においても、若浜中央埠頭2号岸壁（-9.0m）および3号岸壁（-8.0m）に係留しているフェリーには大きな動揺による荷役障害が発生して、他の岸壁に移動しなければならない状況が生じている。

図-1に、志布志港平面図を示す。本稿では、若浜中央埠頭2号および3号岸壁を対象として、港内静穏度向上策を検討した。まず、対象岸壁が東側開口部のほぼ正面に位置していることを踏まえ、港口部からの入射波に加え、東側開口部からの入射波が岸壁前面波高に与える影響を調べた。現地条件を踏まえ、対象波は通常波（うねり）および長周期波とした。次に、詳細解析法および標準解析法を用いて、現況港形および現計画港形における荷役稼働率を算定した。詳細解析法では目標とする荷役稼働率（97.5%）を満たしたが、標準解析法ではこれを満たさなかった。船体の動揺量計算を基本とする詳細解析法では、船体動揺観測値との比較による補正が重要であるが、比較対象となる観測値が十分でないことから、本検討では、標準解析法によって求めた稼働率が目標値を満足するようになる

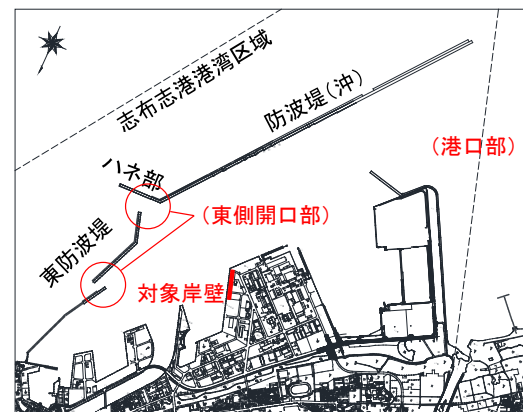


図-1 志布志港平面図

静穏度向上策について検討した。

ここで、本稿で適用した長周期波対策について概説する。長周期波対策は、狭隘な防波堤背面等への設置が想定される消波構造物として、一般に、捨石マウンド形式（例えば、山田ら³⁾、田中ら⁴⁾）とスリット構造形式（例えば、永瀬ら⁵⁾、大島ら⁶⁾）に大別できる。このうち、施工が容易で、また、比較的小型の断面で一定の消波効果が期待できる形式は、没水型の捨石マウンド形式と考えられる。当該構造物は、消波効果が潮位の影響を受けるため、潮位変化を考慮して設計することが望ましいが、この方法は確立されていない。そこで、本稿では、潮位が変化したときの反射率算定図を作成し、これを用いた天端高の設定方法を提案した。なお、当該構造物は、ここで対象とするうねり性波浪に対しても一定の消波効果を発揮することが、菅ら⁷⁾により明らかにされている。

表-1 反射率の設定値

波 浪	構造形式	反射率
通常波	直立壁	1.0
	直立消波	0.8
	捨石斜面、海崖	0.6
	異形消波	0.5
	自然海浜、船揚場	0.2
長周期波	河川境界	0.0
	直立壁	1.0
	自然海浜	0.7
	河川境界	0.0
遮 蔽 部		0.0

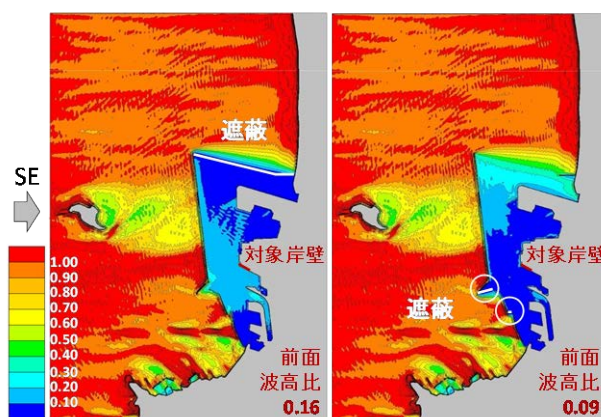


図-2 通常波の波浪変形計算結果
(左図：港口部遮蔽，右図：東側開口部遮蔽)

2. 開口部の影響の把握

2.1 計算条件

港口部および東側開口部の入射波が岸壁前面波高の増大に与える影響を調べるため、両開口部の一方を遮蔽した条件で波浪変形計算を行った。計算には、非線形波浪変形計算プログラム（NOWT-PARI Ver4. 6d8a）を用いた。海底地形は、日本水路協会海洋情報研究センター発行の海底地形デジタルデータおよび近年の測量成果等を用いて作成した。波浪は、周期11sの通常波および20s～300sの長周期波とし、波向きはSSE、SEおよびESEとした。一般に、長周期波の周期帯は30s以上と定義されるが、設定値は、平成28年度の現地観測データ（志布志港湾事務所より提供）のスペクトル解析結果に基づいたものである。表-1に、構造形式別の反射率の設定値を示す。

2.2 計算結果

図-2に、波向きSEの通常波を入射したケースの計算結果を示す。図の左方が南東である。港口部を遮蔽して東側開口部から波が入射する左図の方が、港口部から入射する右図に比べて、対象岸壁を含む港内中央部において波高比が大きかった。同様に、長周期波を入射したケースの計算結果を図-3に示す。全体の傾向と対象岸壁における波高比の大小関係は、通常波を入射したケースと同様であった。従って、岸壁前面波高の増大に与える影響が大きいのは、通常波か長周期波かによらず、東側開口部からの入射波と考えられる。なお、東側開口部から長周期波を入射したとき、通常波のときと比べて港奥部における波高減衰が認められないのは、多重反射の影響によるものと考えられる。

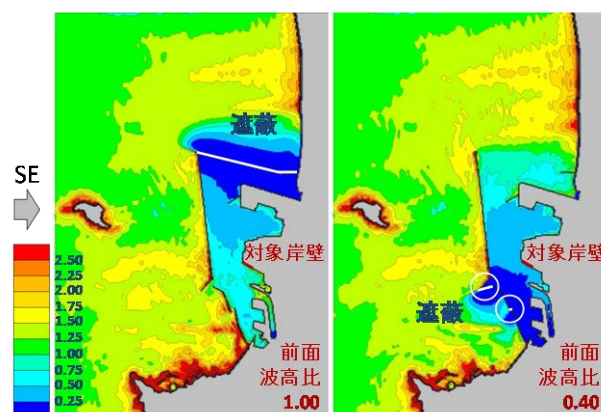


図-3 長周期波の波浪変形計算結果
(左図：港口部遮蔽，右図：東側開口部遮蔽)

3. 荷役稼働率の算定

3.1 算定方法

荷役稼働率は、対象船舶が特定できることから、まず詳細解析法を用いて算定する。従って、荷役稼働率の算定に用いる荷役限界波高は、船体動揺シミュレーションにより対象船舶の動揺量を算出し、波高と動揺量の関係に基づいて設定する。詳細解析法は船舶を特定して検討するため、荷役限界波高に観測値や提案値が用いられる標準解析法と比べて、一般に精度が高い⁸⁾といわれている。

通常波の周期は8s、10sおよび12sとし、周期帯ごとにブレッグシュナイダー・光易型の標準スペクトルを、また、長周期波は20s～300sでエネルギー一定の矩形スペクトルをそれぞれ設定した。波浪変形計算の波高は、事前に整理した頻度表に基づき、波向きおよび周期帯ごとに重み付け平均して算出し、通常波は1.0m～2.5mの範囲で、長周期波は0.1mにそれぞれ設定した。なお、荷役稼働率の算定に先立って実施した船体動揺シミュレーションにおける波向きは、図-4に示すとおり、対象岸壁の法線方向から52.5°とした。ま

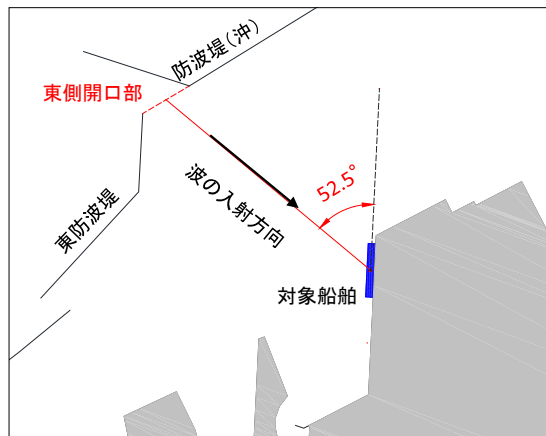


図-4 船体動揺シミュレーションにおける設定波向き

表-2 動揺量（片振幅）の計算結果

入 力 条 件			動 揺 量 (m)	
種別	周期 (s)	波高 (m)	サージング	ヒールング
通常波	8.0	0.3	0.08	0.09
		0.6	0.15	0.18
	10.0	0.3	0.12	0.13
		0.6	0.35	0.25
	12.0	0.3	0.19	0.18
		0.45	0.40	0.25
長周期波	20~300	0.1	0.09	0.15
		0.2	0.17	0.26

た、許容動揺量は $\pm 40\text{cm}$ とし、これを踏まえて入力波高を設定した（表-2）。計算時間は2,000sとし、最初の200sを除いた30分間の動揺量の最大値を抽出した。

3.2 算定結果

表-2 右は、動揺量の計算結果である。この結果を用いて、周期帯ごとの波高と動揺量の関係式を求め、動揺量 $\pm 40\text{cm}$ のときの波高を荷役限界波高として設定した。ただし、荷役限界波高は50cmを最大とした。表-3に、設定した荷役限界波高、およびこれを用いて算定した荷役稼働率を示す。ここに示すとおり、現況港形および現計画港形は、通常波および長周期波に対して目標稼働率を満たした。なお、現計画港形は、図-1に示す現況港形に、図-5 上図中の赤色で示す防波堤（沖）延伸および港内の岸壁化を施した港形である。

4. 港内静穏度向上策の検討

4.1 検討ケース

前述したとおり、詳細解析法を用いて算定した荷役稼働率は現況港形および現計画港形において97.5%を

表-3 荷役稼働率の算定結果（詳細解析法）

波 浪 条 件		荷役限界 波高 (m)	荷役稼働率 (%)	
種別	周期 (s)		現況港形	現計画港形
通常波	8.0	0.50	97.7	98.5
	10.0	0.50		
	12.0	0.45		
長周期波	20~300	0.30	98.4	98.8

表-4 荷役稼働率の算定結果（標準解析法）

波 浪 条 件		荷役限界 波高 (m)	荷役稼働率 (%)	
種別	周期 (s)		現況港形	現計画港形
通常波	8.0	0.50	94.9	96.1
	10.0	0.30		
	12.0	0.20		
長周期波	20~300	0.15	92.9	94.4

表-5 東側開口部入射波対策の検討ケース

Case	防波堤（沖）ハネ部	
	延伸（500m）	港内側消波工
1	あり	既設 400m 区間
2	あり	500m 延伸区間
3	代替案（島堤）	既設 400m 区間
4	あり	なし
5	代替案（島堤）	なし
6	なし	既設 400m 区間

満たした。一方、表-4に示すとおり、標準解析法による荷役稼働率は、現況港形および現計画港形において目標稼働率を下回ったため、これを満たす静穏度向上策を検討することとした。

対象岸壁前面波高は、東側開口部から入射する通常波および長周期波の影響を強く受ける。従って、検討ケースは、東側開口部からの入射波高を低減することに主眼を置いた。表-5に、入射波対策の検討ケースを示す。入射波対策は、防波堤（沖）ハネ部の延伸の有無または代替案と、ハネ部港内側の消波工の組み合わせとした。他方、長周期波対策としては、全てのケースにおいて、東防波堤全延長および防波堤（沖）隅角部から300m区間に対策構造物を配置した。全ケース共通としたのは、この配置における荷役稼働率が97.5%であり、延長縮小の余地がなかったためである。図-5に、ケース2および3の配置図を青色で例示する。

4.2 没水型長周期波対策工の天端高設定方法

長周期波対策として没水型捨石マウンド形式の構造物（以下、捨石マウンドという）を適用し、以下のとおり、潮位変化を考慮して天端高を決定した。

まず、水深と反射率の関係を整理した田中ら⁴⁾の実

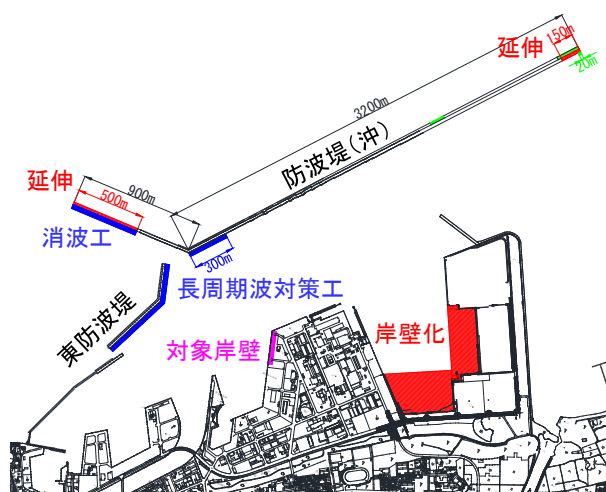


図-5 対策工配置図例 (上図: Case2, 下図: Case3)

験結果を用いて、潮位が変化したときの反射率算定図(構造物幅と反射率の関係)を作成した。図-6(左)に、潮位が天端高以上のとき($R/h \geq 0$)、右図に、潮位が天端高以下のとき($R/h \leq 0$)の算定図を示す。ここに、 B^* は捨石マウンドの没水部をそれと等しい高さの矩形に置き換えたときの幅(図-7)、 L は波長、 K_R は反射率、 R は天端上水深、 h は設置水深である。

次に、①天端高を暫定的に一つ設定し、潮位が L. W. L., M. W. L., H. W. L. および天端高に一致したときの R/h および B^*/L をそれぞれ算定する。②算定した R/h および B^*/L から、図-6を用いて反射率を設定する。なお、長周期波の周期は 60s、海底地盤高は L. W. L. -10m、捨石マウンドの法面勾配は 1:1.5 とし、防波堤背面から捨石マウンド法先までの距離は、現地条件を踏まえて 30m に固定した。③潮位ごとに設定した反射率から、潮位変化に対する反射率の総計を求め、この平均値を天端高に対応する平均的な反射率とする。

最後に、捨石マウンドの天端高を 0.5m 間隔で変化させ、天端高に対応する平均的な反射率を同様に求め、この値が最小となるときの諸元を選定した。

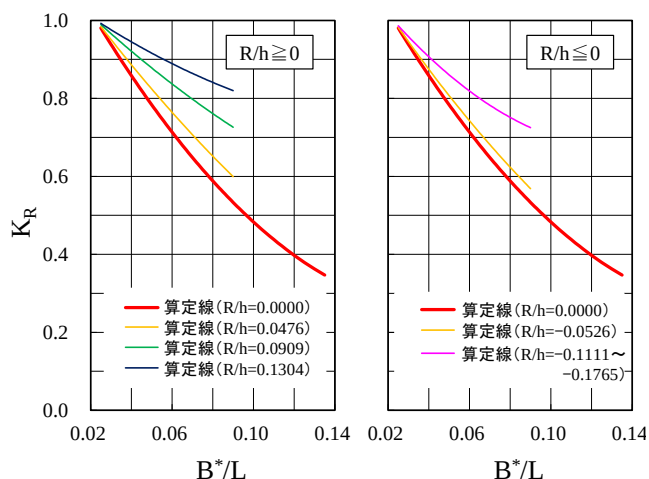
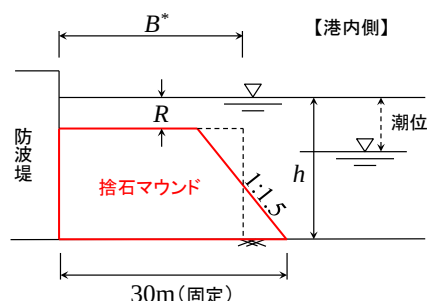
図-6 潮位が変化したときの反射率算定図
(左図: $R/h \geq 0$, 右図: $R/h \leq 0$)

図-7 捨石マウンドの模式図

表-6 平均的な反射率の算定表 (周期: 60s)

暫定 天端高	潮 位				総 計	平均的 な 反射率
	L. W. L. ±0.00	M. W. L. +1.16	H. W. L. +2.40	天端高 に一致		
H. W. L. +2.40	1.00	0.93	0.93	—	2.27	0.95
+2.00	1.00	0.92	0.93	0.92	2.26	0.94
+1.50	0.92	0.91	0.95	0.91	2.21	0.92
M. W. L. +1.16	0.92	0.90	0.96	—	2.21	0.92
+1.00	0.91	0.91	0.96	0.90	2.21	<u>0.92</u>
+0.50	0.89	0.92	1.00	0.89	2.23	0.93
L. W. L. ±0.00	0.87	0.94	1.00	—	2.25	0.94

表-6は、このようにして求めた各天端高に対応する平均的な反射率を示している。この値が0.92と最も小さくなるのは、捨石マウンドの暫定天端高が L. W. L. +1.00m から +1.50m の間の3条件である。このうち、天端が低い L. W. L. +1.00m の場合が、工費が安く経済的であるため、これを最適形状として採用した。

なお、捨石マウンドの被覆材については、港外から

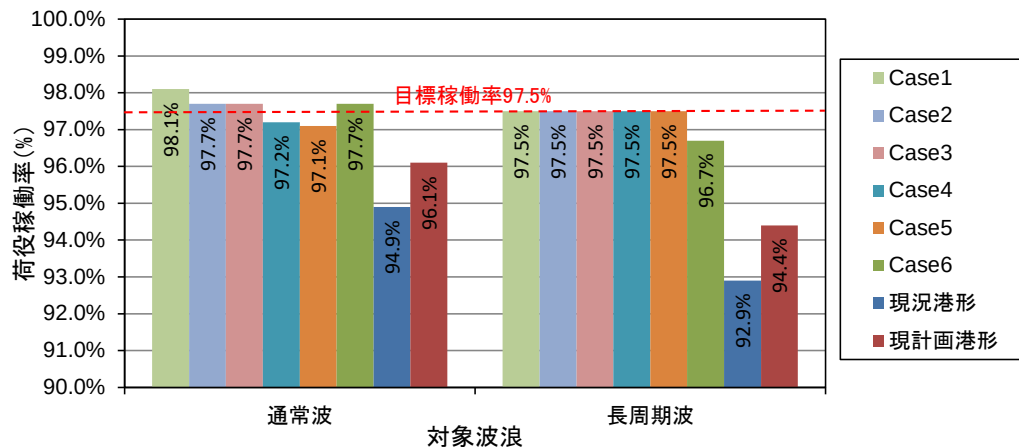


図-8 標準解析法を用いて算定した各ケースの荷役稼働率

の越波水塊の直接的作用に対する安定性を検討する必要があるが、当面、港外側の既設消波工と同様のブロックを用いることとした。

4.3 検討結果

図-8に、標準解析法を用いて算定した各ケースの荷役稼働率を示す。長周期波対策工の反射率は前項で算定した0.92を適用した。通常波に対しては消波工と同様に、0.50とした。図中には、表-4に示す現況港形および現計画港形の結果も示した。通常波浪に対しては、ケース1、2、3および6が目標稼働率を満足し、長周期波に対してはケース6を除いて満足した。通常波および長周期波のどちらに対しても目標稼働率を満たすのは、ケース1、2および3だけである。

5. まとめ

志布志港若浜中央埠頭2号岸壁および3号岸壁を対象として、港内静穏度向上策を検討した。その結果、以下に示す成果が得られた。

- ① 対象岸壁前面波高は、東側開口部からの入射波の影響を強く受けることが分かった。
- ② 詳細解析法により、現況港形および現計画港形は、通常波および長周期波に対してともに目標稼働率を満たすことを確認した。ただし、船体動揺計算の精度確認資料が十分でないことから、標準解析法による検討も行うことにした。
- ③ 標準解析法によると、現況港形および現計画港形は、通常波および長周期波に対してともに目標稼働率を満足しなかった。そこで、異なる6ケースの対策工について静穏度解析を行い、その結果、目標稼働率を満たす港内静穏度向上策を3案提示することができた。
- ④ 没水型長周期波対策工の潮位変化を考慮した天端高設定方法を提案した。

なお、本稿は、国土交通省九州地方整備局志布志港湾事務所発注の志布志港内静穏度対策検討業務（平成28年度）の成果の一部を取りまとめたものである。

謝辞

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所 米山海洋研究領域長より荷役稼働率の検討に関して、同領域 平山波浪研究グループ長より波浪変形計算に関して貴重なご助言を頂いた。また、株式会社三洋コンサルタント 小野貴也氏から、技術的な情報をご提供頂いた。ここに記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 平石哲也・田所篤博・藤咲秀可 (1996)：港湾で観測された長周期波の特性，港湾技術研究所報告，第35巻，第3号，pp. 3-36.
- 2) 国土交通省港湾局：長周期波対策の検討結果について（平成14年3月25日），
http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha02/11/110325_.html（参照日：平成29年5月）
- 3) 山田晶子・国栖広志・爲廣哲也・小平田浩司・平石哲也 (2005)：石巻港における長周期波の消波対策に関する検討，海洋開発論文集，第21巻，pp. 785-790.
- 4) 田中真史・松本朗・半沢稔 (2012)：没水型長周期波対策工の消波特性に関する実験的検討，土木学会論文集B3（海洋開発），第68巻，第2号，pp. 816-821.
- 5) 永瀬恭一・平石哲也・押村嘉人 (2008)：港湾内での利用形態に合わせた長周期波浪対策技術，海岸工学論文集，第55巻，pp. 811-815.
- 6) 大島香織，森屋陽一 (2005)：導水板によるスリット構造物の長周期波消波特性，海洋開発論文集，第21巻，pp. 791-796.
- 7) 菅章悟・三井順・久保田真一・松本朗 (2017)：うねりに対する港内側没水型対策工の消波性能に関する検討，土木学会論文集B3（海洋開発），第73巻，第2号，pp. I_54-I_59.
- 8) 港内長周期波影響評価マニュアル (2004)：財団法人沿岸技術研究センター。