

敦賀港の荷役稼働率向上に資する鞠山防波堤の改良方法の検討について

中村 康大¹・渡辺 義¹

¹敦賀港湾事務所 企画調整課 (〒914-0065 住所 敦賀市松栄町7-28 敦賀地方合同庁舎3階)

敦賀港では、過年度より比較的周期の長い侵入波（うねり性波浪）の影響により、船舶の荷役作業に支障を来す事態が発生しており、荷役稼働率の向上のために港内静穏度の確保が課題となっている。

本稿では、既設構造物の特性に応じた透過や反射等の波浪変形を反映可能なブシネスクモデルVer5.2を用いて静穏度計算を行い、敦賀港の鞠山防波堤のそれぞれの改良案を例として港内静穏度を比較するとともに、費用対効果を含めた工法比較への応用可能性について検討した。

キーワード 敦賀港、港内静穏度、荷役稼働率、波浪変形計算

1. はじめに

敦賀港は、日本海沿岸部のほぼ中央、敦賀湾の奥部に位置する重要港湾であり、国際コンテナ、国際RORO船航路を有し、県内外企業の国際物流拠点として機能している。また、北海道・九州方面へのフェリー、RORO船航路も有しており、敦賀港の貨物背後圏は日本全域にわたり、国内物流拠点としても重要な役割を担っている。

敦賀港の整備状況は第一線防波堤である鞠山防波堤が平成28年度に計画延長1,330mが完成し、現在敦賀港では鞠山南地区の複合一貫輸送ターミナルの整備として岸壁およびふ頭用地の整備が行われている。（図-1参照）

敦賀港では元来、鞠山防波堤先端の港口部から侵入してくる比較的周期の長い侵入波と港内既設構造物による波の多重反射の影響により、船舶の荷役作業に支障を来す事態が発生している。そのため、港内静穏度の確保が課題となっている。

本検討では港内波浪観測データと数値シミュレーションを用いて、これらの課題に対する効果的な鞠山防波堤の改良方法について検討した結果について報告する。



図-1 敦賀港全景

2. 資料収集・整理

(1) 港内波浪特性の把握

敦賀港の通年的な海象特性を把握するため、湾口部での波浪観測値(NOWPHAS)及び、港内において現地の観測（観測期間:H30～R6）を実施している。

NOWPHASについては、確定値が得られるのは2021年12月までであったため、2021年12月から遡って10年間分を整理した。

NOWPHAS波浪観測データを図-2に示す。WNW～NNWの3波向で全体の約48%を占めることが示された。これは、敦賀港湾口部がNW方向に開いた地形となっており、その他の波向が湾内に到達しにくいと考えられる。

周期4秒以上が約86%、8秒以上が約11%と、比較的周期の長い波の頻度が高いことが示された。

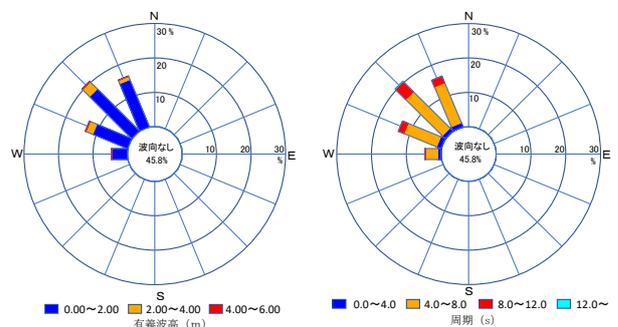


図-2 敦賀港における波高・波向別頻度グラフ及び周期・波向別頻度グラフ

(2) 荷役障害の分析

港内波浪観測を実施していた時期において、港内の各

岸壁において荷役障害が発生したときの港内波浪観測結果を整理した結果を表-1に示す。このときの荷役障害とは荷役作業において船社が荷役困難と判断した場合とする。

荷役障害発生時の鞍山防波堤堤頭部では概ね有義波高1.0m、有義波周期9秒の波浪が観測され、荷役障害が発生する時の各岸壁では、0.3~0.4mの有義波高が観測された。以上より算出したデータを元に港外波浪条件を設定する。

表-1 荷役障害発生時の有義波高及び有義波周期

		鞍山防波堤堤頭部	鞍山北AB岸壁	鞍山南A岸壁	鞍山南B岸壁
有義波高[m]	平均	1.04	0.28	0.43	0.35
有義波周期[s]	平均	8.6	6.2	5.1	4.2

3. 港内波浪変形計算

(1) 再現計算（現況港形）

従来、敦賀港の静穏度解析ではブシネスクVer4.6が使用されてきたが、本検討では消波工や捨石の諸元を基に、実態に即した透過率や反射率を計算中に反映することが可能な最新のモデルであるVer5.2を使用した。各モデルの反射率や透過率のイメージを図-3に、Ver5.2の透水構造物の設定イメージを図-4に示す。

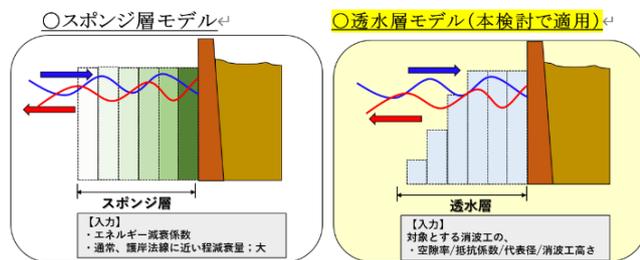


図-3 各モデルの反射・透過率の設定イメージ
(左: ver4.6 右: ver5.2)

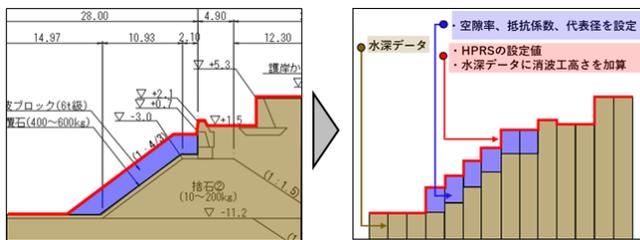


図-4 Ver5.2の透水構造物の設定イメージ

Ver5.2では施設台帳や維持管理資料等より消波工の規格や現在の状況等を確認した上で、空隙率・抵抗係数・代表径・天端高等の施設断面諸元に応じたパラメータを設定することにより、消波工による反射率や透過率を適切に反映した港内静穏度を評価することができる。各ブ

シネスクモデルのバージョンの比較を表-2に示す。

敦賀港の特徴として、鞍山防波堤のケーソン区間や透過堤区間、港内側改良部、川崎松栄防波堤、気比の松原など、港内波浪変形計算結果に影響を及ぼす構造物・海浜が多数存在することがあげられる。そのため、本検討ではVer5.2を用いて解析を行うことにより、複雑な形状を有し反射率の仮定が難しい消波構造物への対策案として検討を行うこととした。

表-2 ブシネスクモデルのバージョンの比較

	Ver4.6	Ver5.2
消波工	<ul style="list-style-type: none"> 消波構造物の反射率を仮定した上で、仮定した値が得られるようにエネルギー吸収帯の諸元（幅・係数）を調整して、構造物による反射を波浪変形計算中に反映。 仮定した反射率と実際の反射率が異なる可能性がある。また、波浪が構造物に対して斜め入射する場合、反射波が過剰に減衰する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 消波工の実際の断面諸元に応じた物理的なパラメータ（天端高・空隙率・抵抗係数等）で表現可能であり、反射率を仮定せずに、実態に即した構造物による透過や反射を精度よく計算中に反映可能。
直立消波	<ul style="list-style-type: none"> 同上。 	<ul style="list-style-type: none"> 従来通りエネルギー吸収帯を用いて構造物による反射を波浪変形計算中に反映。
陸上部の	<ul style="list-style-type: none"> 陸上部の遡上の計算は不可。 	<ul style="list-style-type: none"> 陸上部の遡上の計算が可能。
データ	<ul style="list-style-type: none"> 必要データ数：2 水深 エネルギー吸収帯 	<ul style="list-style-type: none"> 必要データ数：7 水深・標高 エネルギー吸収帯 消波工天端高/空隙率/代表径/層流・乱流抵抗係数
計算時間	<ul style="list-style-type: none"> $\Delta t = T_{1/3} / 100 \sim T_{1/3} / 400$が目安 	<ul style="list-style-type: none"> $\Delta t = T_{1/3} / 1000$以下が目安

荷役障害発生時における鞍山防波堤堤頭部の有義波高は1.0mであるため、有義波高1.0mが再現できるように、港内波浪変形計算の入射波高を調整した。港外波浪条件と同じく、荷役障害に影響する周期8秒、10秒を対象とした。

なお、現地観測結果によると鞍山防波堤と比べて各岸壁前面の有義波周期が短い傾向にある。これは短周期の風波成分が減衰していないためである。よって、港内波浪変形計算においては、荷役障害に影響を与えやすい成分の周期8秒、10秒を対象とした。

また、対策工の整備に伴う稼働率向上効果を評価する際、荷役障害に影響を与えやすい成分の波高を低減可能な対策工諸元及び整備範囲を検討する。再現計算時点においても、うねり成分が再現可能なモデルを構築することとする。シミュレーションの計算条件を表-3に示す。

表-3 シミュレーション計算条件

項目	設定値		備考
	沿岸方向	岸沖方向	
計算領域	距離(m)	6,175	5,925
	格子間隔(m)	5.0	
	格子数	1,235	1,185
	エネルギー吸収帯格子数	40	0
波浪条件	St-1での目標波高	1.0	1.0
	周期 T(sec)	8.0	10.0
	不規則波スペクトル形式	JONSWAP型	
	スペクトルピーク	$\gamma=10.0$	
	入射波向	N-8°	N-12°
	入射波高 $H_{1/2}$ (m)	1.4	1.8
	Smax	66.0	75.0
計算条件	成分波数	1,000	
	下限周期(sec)	2.0	
	潮位	D.L. +0.18m	
	砕波計算	あり	
	沖側底面摩擦係数	0.02	
	岸側底面摩擦係数	0.02	
	計算時間間隔 Δt (sec)	0.010	
	緩造波時間(sec)	24.0	24.0
	有義波算定開始時刻(sec)	824.0	1,024.0
	有義波算定終了時刻(sec)	1,624.0	2,024.0
			$\angle t = T/1000$
			T×100 波
			T×200 波

表-4 検討ケース一覧

ケースNo	ケース概要
Case01	現況港形に鞠山防波堤を改良したケース
Case02	Case01に加え、鞠山南C岸壁完成時のケース
Case03	Case02に加え、鞠山防波堤を南側へ堤頭部から170m延伸したケース
Case04	Case02に加え、鞠山防波堤を南側へ堤頭部から300m延伸したケース
Case05	Case02に加え、鞠山防波堤の一部区間の天端沈下対策を行ったケース
Case06	Case02に加え、鞠山防波堤先端部を消波ブロック被覆タイプにしたケース
Case07	Case02に加え、鞠山防波堤の基礎マウンドを南側へ堤頭部から300m延伸したケース
Case08	Case05に加え、鞠山防波堤の先端部を消波ブロック被覆タイプにしたケース

港内波浪変形計算を行う水深データは、過去に実施した深浅測量結果より図-5のとおり設定した。

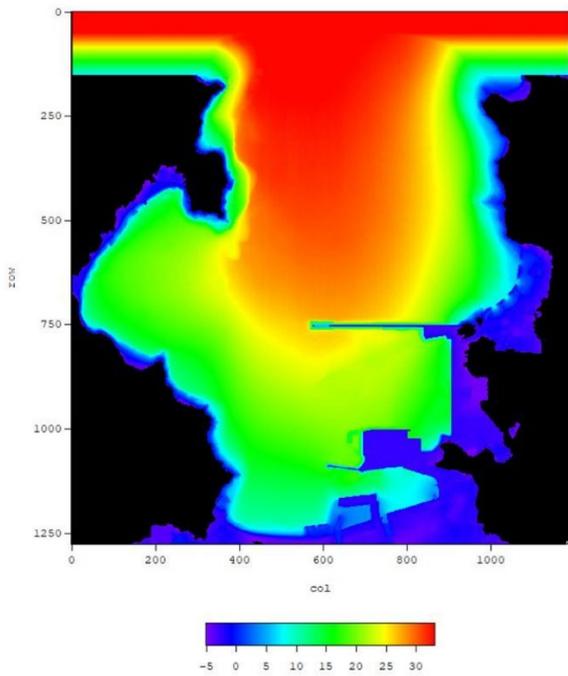


図-5 ブシネスクモデルに用いた水深データ

4. 予測計算 (将来港形)

(1) 予測計算の検討方針

表-4に検討項目を整理する。また、図-6に今回検討した港形の概要図を示す。

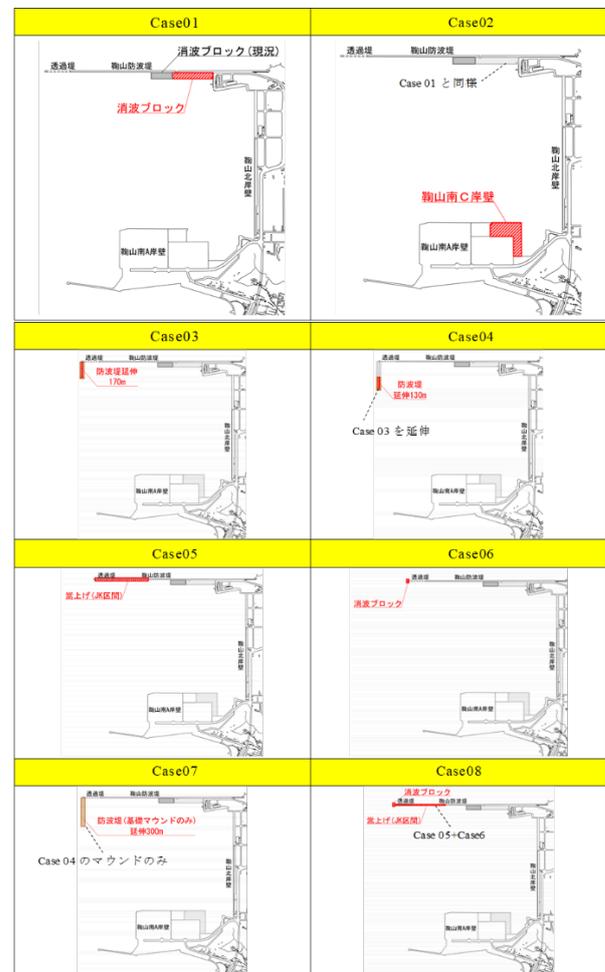


図-6 検討港形概略図

(2) 有義波高の整理・防波堤の改良効果の整理
各岸壁の位置図を図-7に示す。



図-7 荷役稼働率算定箇所

表-5に、予測計算により得られた鞠山防波堤堤頭部及び各岸壁前面における有義波高を示す。各地点および各ケースで算出された有義波高を比較することにより防波堤の改良効果を整理した。

表-5 鞠山防波堤堤頭部及び各岸壁前面の有義波高

場所	再現計算時点	岸壁前面 有義波高[m]								
		Case01	Case02	Case03	Case04	Case05	Case06	Case07	Case08	
北防波堤堤頭部	b_1	1.023	1.012	1.011	1.030	1.032	1.027	0.936	1.098	0.955
鞠山北A岸壁	b_2	0.228	0.222	0.209	0.133	0.123	0.210	0.191	0.214	0.192
鞠山北C岸壁	b_3	0.211	0.205	0.214	0.123	0.124	0.214	0.189	0.203	0.190
鞠山北D岸壁	b_4	0.250	0.245	0.234	0.164	0.146	0.232	0.217	0.236	0.215
鞠山南A岸壁	b_5	0.278	0.275	0.264	0.168	0.162	0.265	0.243	0.296	0.242
鞠山南B岸壁	b_6	0.270	0.264	0.242	0.160	0.158	0.244	0.222	0.252	0.223
鞠山南C岸壁	b_7	-	-	0.230	0.149	0.143	0.231	0.206	0.243	0.205
川崎松栄岸壁	b_8	0.184	0.183	0.183	0.165	0.162	0.180	0.181	0.161	0.180

場所	再現計算時点	岸壁前面 有義波高[m]								
		Case01	Case02	Case03	Case04	Case05	Case06	Case07	Case08	
北防波堤堤頭部	b_1	1.040	1.048	1.041	1.121	1.120	1.047	1.007	1.114	1.011
鞠山北A岸壁	b_2	0.360	0.357	0.334	0.219	0.217	0.337	0.320	0.477	0.321
鞠山北C岸壁	b_3	0.301	0.299	0.316	0.205	0.193	0.318	0.297	0.392	0.296
鞠山北D岸壁	b_4	0.377	0.355	0.340	0.233	0.246	0.343	0.327	0.500	0.328
鞠山南A岸壁	b_5	0.321	0.313	0.312	0.173	0.175	0.317	0.296	0.495	0.302
鞠山南B岸壁	b_6	0.278	0.271	0.264	0.185	0.177	0.267	0.252	0.365	0.251
鞠山南C岸壁	b_7	-	-	0.269	0.165	0.154	0.273	0.251	0.324	0.252
川崎松栄岸壁	b_8	0.298	0.298	0.297	0.257	0.257	0.294	0.298	0.261	0.295

Case02~04における各岸壁前面の有義波高を比較した結果を図-8に示す。鞠山防波堤を170m延伸したCase03においては、Case02に比べて各岸壁前面波高が低下し、鞠山北・南地区の岸壁前面波高は55~70%となる。川崎松栄岸壁の岸壁前面波高も87%~90%となる。

但し、さらに130m延伸したCase04の岸壁前面波高は、

Case03と同程度である。

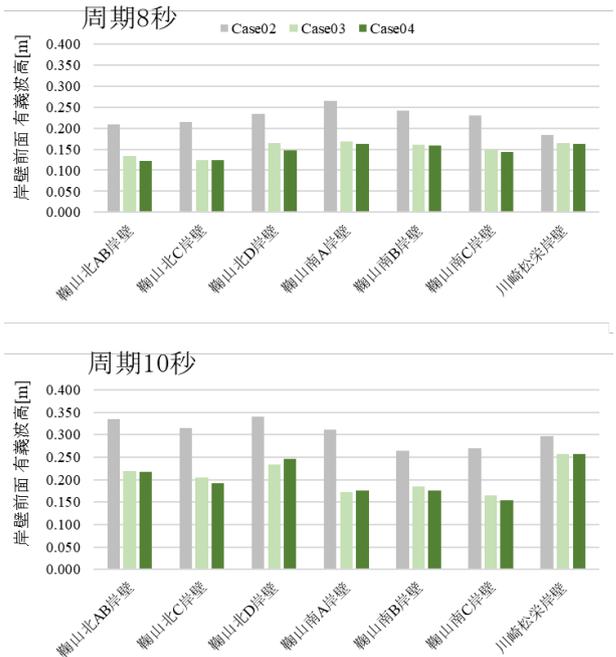


図-8 Case02~04における各岸壁前面有義波高の比較

Case02,05,08における各岸壁前面の有義波高を比較した結果を図-9に示す。鞠山防波堤透過堤部を嵩上げたCase05の岸壁前面波高は、Case02とほぼ同程度である。Case05に加えて堤頭部を消波工で被覆したCase08は、Case02,05に比べて各岸壁前面有義波高が低下し、鞠山北・南地区の岸壁前面波高は87%~94%となる。但し、川崎松栄岸壁の岸壁前面は同程度である。

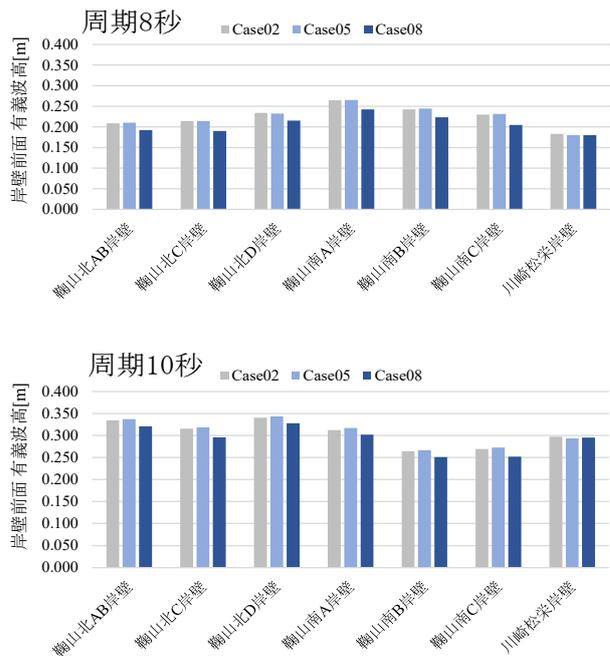


図-9 Case02,05,08における各岸壁前面有義波高の比較

Case02,06における各岸壁前面の有義波高を比較した結果を図-10に示す。鞠山防波堤の堤頭部を被覆したCase06は、Case02に比べて各岸壁前面波高が低下し、鞠山北・南地区の岸壁前面波高は83%~93%となる。但し、川崎松栄岸壁は同程度である。

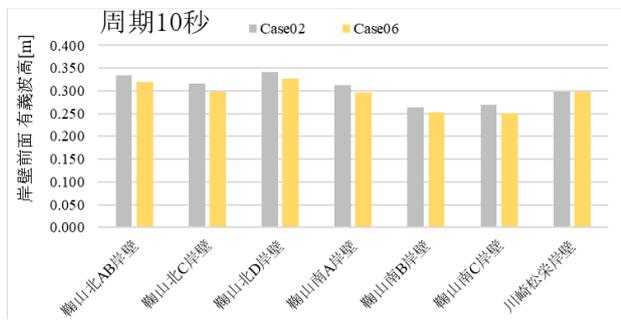
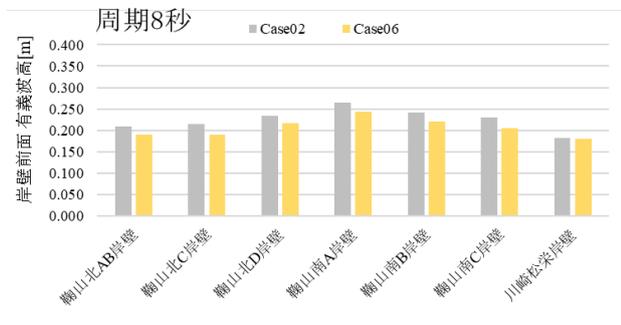


図-10 Case02,06における各岸壁前面有義波高の比較

Case02,07における各岸壁前面の有義波高を比較した結果を図-11に示す。鞠山防波堤のマウンドを南に延伸したCase07の岸壁前面波高は、Case02に比べて、鞠山北・南地区の岸壁前面波高は増加する傾向にある。その一方で、川崎松栄岸壁の有義波高は減少する傾向にある。

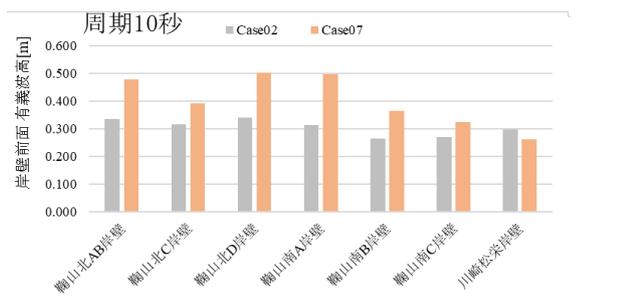
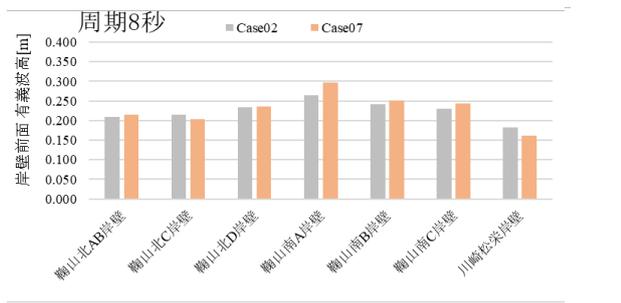


図-11 Case02,07における各岸壁前面有義波高の比較

以上より、鞠山防波堤の延伸を行うことで、岸壁前面の有義波高が小さくなり、港内静穏度の向上効果があると考えられる。また、鞠山防波堤堤頭部を消波ブロック等で被覆することにより屈折波を消波工が減衰させ、港内の静穏度向上に効果があると考えられる。

一方で鞠山防波堤の嵩上げにより鞠山防波堤における越波・越流を抑制することは可能であるが、敦賀港の場合は通常時の港内静穏度の評価対象となる波高は、越波・越流する波浪よりも屈折、回折して岸壁に到達する波浪の影響を大きく受けることから、嵩上げは通常時の港内静穏度対策としては効果的ではないと考えられる。なお、マウンドのみを延伸すると港内波高が増加する現象は、マウンド上での波浪の屈折により港内に侵入する波浪が大きくなるためと考えられる。

5. 港内静穏度の評価

(1) 荷役稼働率の算定

評価対象地点の対象船舶については現在敦賀港に就航している船舶を対象とし、表-6に示す。

表-6 評価対象地点と対象船舶の一覧

岸壁名称	船種	船長	載貨重量ト (DWT)
鞠山北AB岸壁	内貿RORO船 (北海道航路)	179.9m	6,300t
鞠山北C岸壁	石炭船	228.99m	81,896 t
鞠山北D岸壁	フェリー	224.5m	6,565t
鞠山南A岸壁	内外貿コンテナ船	148.27m	12,664 t
鞠山南B岸壁	内貿RORO船 (北海道航路)	179.9m	6,300t
鞠山南C岸壁	内貿RORO船 (九州航路)	167.7m	6,205t
川崎松栄岸壁	外貿RORO船	149.57m	5,690 t

荷役限界波高を設定するに当たり、対象岸壁に入射する波向を整理した。図-12に評価対象岸壁と波向の関係を示す。鞠山南A~C岸壁、川崎松栄岸壁の波向は、港外から入射した波浪が防波堤で回折して各岸壁に到達するものとして、防波堤の先端と各岸壁を結んだ角度として設定した。

鞠山北AB~D岸壁は、鞠山南岸壁からの反射波が各岸壁に到達するものとして、鞠山南岸壁と各岸壁を結んだ角度として設定した。但し、鞠山北岸壁には、港内で多重反射した波浪が到達することから、入射波向を特定することは難しく、荷役障害発生時の実績等を踏まえて入射波向を設定した。

荷役限界波高は港内長周期波影響評価マニュアルに基づき、対象船舶及び波浪条件を踏まえ0.25~0.5mの範囲で設定した。

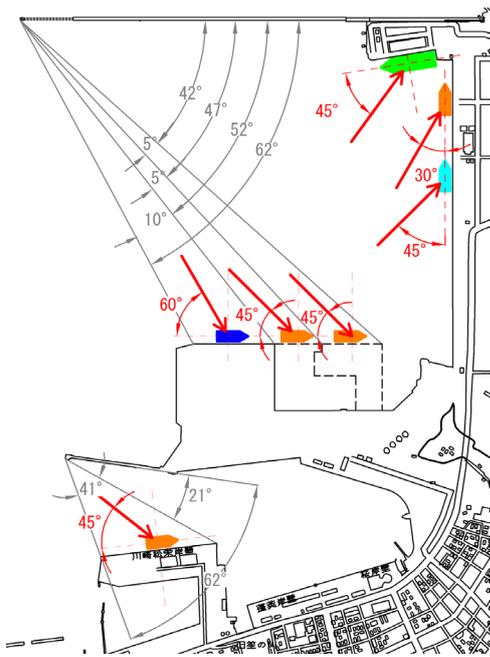


図-12 評価対象岸壁に対する入射角度

(2) 荷役稼働率の算定結果

各岸壁における荷役稼働率の算出結果を図-13に示す。

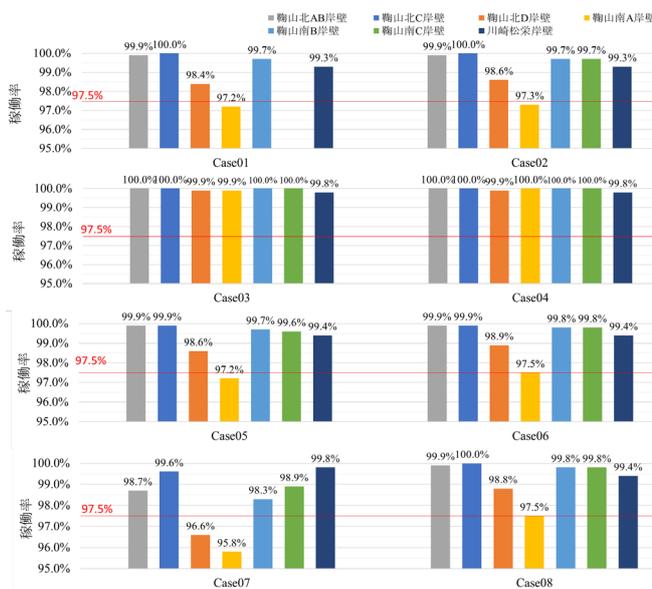


図-13 各岸壁における荷役稼働率の算出結果

Case01において鞠山南A岸壁の荷役稼働率は所要荷役稼働率である97.5%を下回った。Case02においても同様に鞠山南A岸壁の荷役稼働率が所用荷役稼働率を下回った。

Case03およびCase04において全ての岸壁で荷役稼働率は所要荷役稼働率を上回った。鞠山防波堤堤頭部から南へ延伸することにより、港内に入射する回折波の影響により現況港形で所用荷役稼働率を満足していなかった鞠

山南A岸壁の荷役稼働率が所用荷役稼働率を満足するまで向上した。また、Case03よりCase04の荷役稼働率が高いことが示された。

Case05において鞠山南A岸壁の荷役稼働率が所用荷役稼働率を下回った。Case02との比較より、鞠山防波堤の嵩上げによる荷役稼働率の向上効果は確認できなかった。

Case06において全ての岸壁で荷役稼働率は所要荷役稼働率を満足した。Case02,Case03及びCase04と比較して鞠山防波堤堤頭部の消波工被覆を行う改良方法は荷役稼働率を向上させることが期待できる。

Case07において鞠山北D岸壁および鞠山南A岸壁の荷役稼働率は所用荷役稼働率を下回った。鞠山防波堤のマウンドのみを延伸した場合、川崎松栄岸壁を除くすべての対象岸壁において、到達する回折波を低減させることが出来ず、荷役稼働率が低下する可能性が示された。

Case08において全ての岸壁で荷役稼働率は所要荷役稼働率を上回った。しかし、Case02及びCase06との比較より鞠山防波堤の嵩上げによる荷役稼働率の向上効果は確認できなかった。

以上よりCase03及びCase04の鞠山防波堤の堤頭部を南に延伸させる改良方法が敦賀港の各岸壁における荷役稼働率を最も向上させる改良方法であることが示された。しかし、鞠山防波堤の延伸には時間を要する可能性があり、敦賀港において荷役障害が発生している状況を鑑み、早期に施工可能な工法が求められている。そのため、各岸壁の所用荷役稼働率が確保できる可能性が示されているCase06の鞠山防波堤堤頭部の消波工被覆を行う対策を行うことで、鞠山防波堤の延伸と比較して早期にかつ低コストでの施工が可能である。

6. まとめ

以上の結果により、本検討において以下のことが示された。

- ・ブシネスクモデルVer5.2を使用することにより港内の状況を詳細に反映した港内静穏度を評価することが可能になるため、埠頭や防潮堤が海岸線から突き出た位置にあることにより複雑な波浪の透過や反射が生じる地形条件を持つなど港内静穏度対策に課題のある港に対して、ブシネスクモデルVer5.2を用いて検討を行うことが非常に有効であることが確認された。

- ・対策工毎の港内静穏度評価の結果とそれらの対策に要する費用や期間の比較により、より高い精度で、静穏度向上効果の高い工法を費用対効果を踏まえて検討することが可能となる。

- ・敦賀港においては、鞠山防波堤堤頭部の消波工被覆を行う対策が高い静穏度向上効果を示しており、防波堤堤頭部の延伸工事と比較して、早期にかつ低コストで施工可能な工法として港内静穏度の向上が期待できる。