

苫小牧港西港区における長周期波対策工の概要とその効果について

室蘭開発建設部 苫小牧港湾事務所 計画課 ○松野 健
青野 奨
矢野 隆博

苫小牧港は、北海道の海上貨物の約5割を扱っており北海道経済を支える重要な役割を果たしている。特に西港区は本州航路の内貿ユニットロード貨物(フェリー、RORO、コンテナ)を多く取扱っており、定時性の確保が重要となっている。しかし近年、長周期波の影響による船体動揺により係留船舶の荷役障害(中断・延長)、係留索切断、タグボートによる押さえつけが必要となるなどの障害が発生し、利用に支障を来している。

苫小牧港西港区における長周期波対策工は、東防波堤背後の未利用水面に長周期波の反射波低減が可能な吸収層を持った対策工を設置し荷役障害等の低減を図るものであり、平成20年度より施工を開始した。本報告では、その構造設計の概要と施工期間中ではあるが効果把握のため行った波浪調査結果について報告するものである。

キーワード：長周期波、波浪

1. 長周期波対策工の検討経緯と配置

(1) 苫小牧港西港区の船体動揺被害状況

長周期波対策工施工箇所と各施設の位置についてを写真-1に示す。



写真-1 苫小牧西港区各施設の位置

近年、苫小牧港西港区では、特に入船ふ頭およびフェリーふ頭で船体動揺による被害が発生している。図-1は、その被害件数(平成13年～平成18年)を整理したものである。主な被害の内容は、荷役作業の中断、他バースへの避難、人導橋の使用不可、係留索の切断、動揺抑止のためのタグボート要請であった。旅客貨物輸送の定時制確保及び被害時対応における利用者の費用負担発生が問題となっていたため、利用者からは早急な対策が要請さ

れている状況にあった。

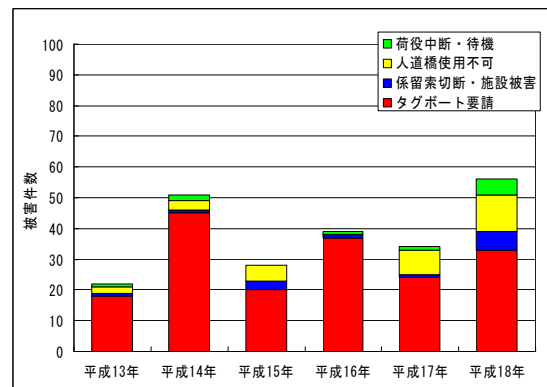


図-1 入船・フェリーふ頭 船体動揺被害状況

(2) 船体動揺要因と検討経緯

船体動揺被害の要因について検討した結果、長周期波を含む海象条件の変化による影響が大きいことが分かった。そこで長周期波対策について検討するため、平成15年度に学識者や有識者による検討委員会を設置して、平成18年度まで検討を進めてきた。平成19年度以降は、文献や他港の事例などを参考に長周期波対策工の構造および設計方法等について検討を行った。

(3) 長周期波対策工の配置

長周期波対策工の配置と形状は、検討委員会の検討結果等を基に、経済性、施工環境、周辺施設への影響等に

ついて総合的な検討を行い、**図-2**に示す東防波堤背後の未利用水面に長周期波対策工を設置することとした。形状は、中割石からなる吸収層と、その前面に設置した消波ブロックの2層構造となっているのが特徴である。その構造詳細については4章に示す。

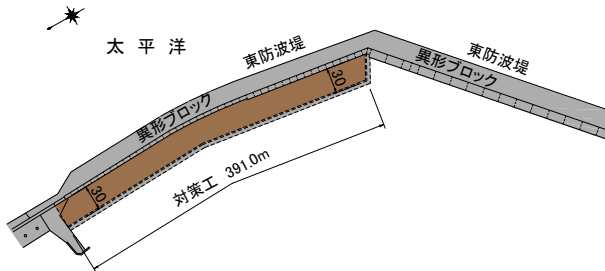


図-2 長周期波対策工設置箇所拡大図

2. 静穏度解析の概要

(1) 波浪変形計算モデルの設定

港内長周期波影響評価マニュアル¹⁾ (以後、マニュアル)によれば、港内長周期波の変形を求める数値計算方法として、「ブシネスク方程式を用いた非線形型波浪変形モデル(NOWT-PARI Ver4.6β)(H13.12) (独立行政法人港湾空港技術研究所)が示されている。数値計算モデルは、同モデルを用いて静穏度解析を行うこととした。

(2) 静穏度解析の条件設定

現況港形(H19時)と将来港形について、**図-3**に示す。現況及び将来港形、さらに対策工を整備した港形に対して静穏度評価を行い静穏度向上効果について検討した。

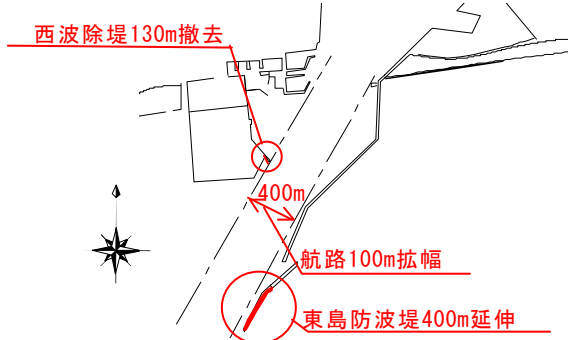


図-3 将来港形の現況港形との差異

代表的な計算条件は、**表-1**に示した。長周期波の入射波高については、波高0.1m程度でも船の固有周期に共振して船体動揺を発生させる場合があり、ほとんど減衰せず港内に伝播することを考慮し、荷役限界波高0.1m~0.2mのうち、下限値である0.1mに設定した。周期は苫小牧西港沖(勇払沖)における長周期波発達時の波浪スペクトル分布より長周期波帯の卓越周期である90sとした。波向は多頻度波向のSSE、S、SSWの3方向とした。長周期波対策工の反射率は、マニュアルに示されている長周期波対策施設である両面スリットケーソン護岸+捨石吸収層を参考にして、0.7と設定した。荷役限界波高はマニ

ュアルに示されている0.1m~0.2mとした。

表-1 代表的な計算条件

計算条件	設定値
計算領域	17.1km×10.6km
格子間隔	20m
対策工反射率	0.7
入射波高 (m)	0.10m
周期 (s)	90s
スペクトル形状	実測スペクトル
波向	SSE,S,SSWの3波向
Smax	10
波向別波高頻度表	1999年~2003年
荷役限界波高 (m)	0.1m~0.2m

(3) 静穏度解析の結果

静穏度解析の結果を**図-4**に示す。静穏度解析を行った結果、長周期波対策工整備前の現況港形においては、長周期波に対してほとんどのふ頭で港湾技術基準²⁾による目標荷役稼働率(97.5%)を満足せず、将来港形においても約半数のふ頭が満足しない状況であったが、長周期波対策工を整備することで現況港形に対して晴海ふ頭を除く各ふ頭において目標荷役稼働率を満足し、将来港形に対しては全てのふ頭で満足する結果が得られた。

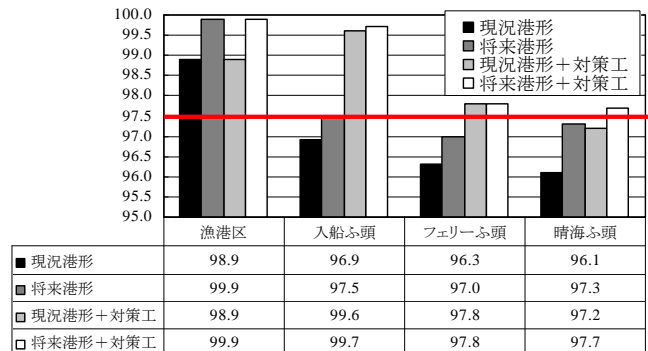


図-4 主なふ頭の静穏度解析結果

4. 構造諸元とその算定根拠

(1) 構造諸元及び算定根拠

長周期波対策工の構造諸元及びその算定根拠を**表-2**に、構造図を**図-5, 6**に示す。

表-2 諸元一覧

	甲部	乙部	設計沖波	算定根拠・参考文献
吸収層天端高	+2.2m	+2.1m	長周期波	文献3)
吸収層所要幅	30m	30m	長周期波	文献4)
消波工所要重量	(4 t型) 1.181 t	(4 t型) 1.949 t	50年確率波	() は経済比較による決定重量 ハドソン式
消波工天端高	+3.1m	+3.0m	-	被覆工と同一天端高とする。
消波工天端幅	2.8m	2.8m	-	ブロック2個並び
被覆工所要重量	(2 t型) 0.720 t	(2 t型) 1.189 t	50年確率波	() は経済比較による決定重量 ハドソン式
被覆工所要幅	3.94m 以上	5.09m 以上	50年確率波	文献6)

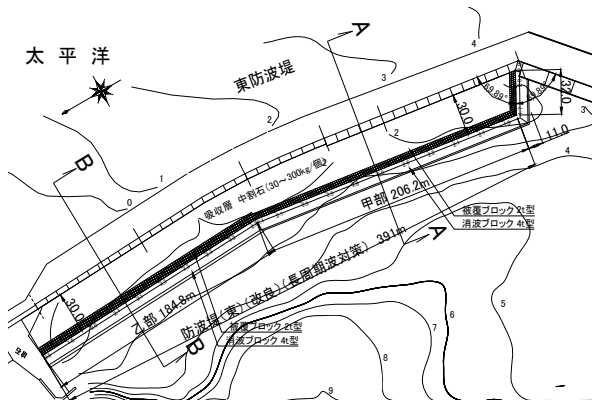


図-5 平面図

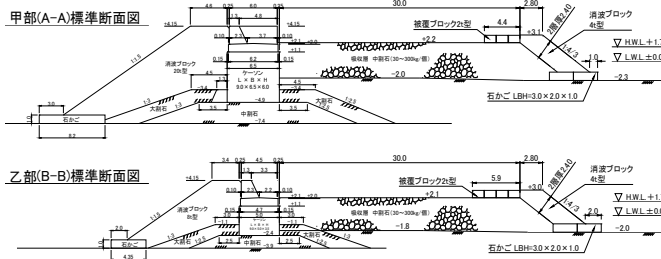


図-6 断面図

(2) 長周期波対策工の目標反射率

長周期波に対する対策工の目標反射率は、両面スリットケーソン+捨石吸収層に関する模型実験結果³⁾で反射率が0.7以下になったこと、模型実験・理論式による検討結果⁴⁾で吸収層幅確保により反射率0.7以下が可能と分かったこと、マニュアルに示されている両面スリットケーソン護岸+捨石吸収層の参考値が0.7になっていること等を考慮して期待できる上限値として0.7と設定した。

(3) 設計波について

a) 施設形状決定に用いる設計波

長周期波対策として必要な吸収層の諸元算定には長周期波を設計波に用いた。設計沖波は、苫小牧西港沖(勇払沖)における過去5年間の波向別出現頻度表(表-3)により、最高波高を用いた。沖波に対する施設前面波高比は、ブシネスク方程式で算出した値を用いた。設計波を算定した結果、波向S、沖波波高0.47mの現況港形において前面波高が最大となり、甲部0.60m、乙部0.50mをそれぞれ

表-3 長周期波の波向別波高出現頻度表

波向	波高ランク (m)						計	最高波高 (m)
	~ 0.049	0.050 ~ 0.099	0.100 ~ 0.149	0.150 ~ 0.199	0.200 ~ 0.299	0.300 ~		
E~SE	162 (0.81)	91 (0.46)	22 (0.11)	7 (0.04)	0 (0.00)	0 (0.00)	282 (1.41)	
SSE	2,962 (14.85)	2,123 (10.64)	691 (3.46)	201 (1.01)	69 (0.35)	6 (0.03)	6,052 (30.34)	0.33
S	6,625 (33.21)	4,048 (20.29)	1,410 (7.07)	443 (2.22)	211 (1.06)	30 (0.15)	12,767 (64.00)	0.47
SSW	261 (1.31)	163 (0.82)	49 (0.25)	12 (0.06)	2 (0.01)	0 (0.00)	487 (2.44)	0.25
SW~W	317 (1.59)	33 (0.17)	9 (0.05)	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	359 (1.80)	
計	10,327 (51.77)	6,458 (32.38)	2,181 (10.93)	663 (3.32)	282 (1.41)	36 (0.18)	19,947 (100.00)	

上段：出現頻度 下段：出現率

設計波に採用した。周期は前述した苫小牧西港沖(勇払沖)における長周期波帯の卓越周期である90sとした。

b) 堤体の安定計算に用いる設計波

東島防波堤がまだ施工途中のため、10年確率波(現況港形)、50年確率波(将来港形)について計算した結果、波高が大きくなる50年確率波を採用した。(表-4)

表-4 設計波(確率波)一覧表

設計沖波	区間	波向	周期	前面波高	潮位	採用
			T(sec)	H _{1/3} (m)		
50年確率波	甲部	S10E	13.0	2.2	最浅部 H.W.L	◎
	乙部	SSW	11.0	2.6	最深部 H.W.L	◎
10年確率波	甲部	S10E	13.0	1.5	最浅部 L.W.L	
	乙部	SSW	11.0	2.0	最浅部 H.W.L	

(4) 吸収層天端高について

吸収層は、石材の供給量を考慮して中割石とした。吸収層天端高は、長周期波に対してエネルギーを確実に減衰させるためには水面上にある必要があるため、文献³⁾を基に長周期波高の半波高及び吸収層内の水位上昇分20%を見込んで式(1)により算定した。

$$\begin{aligned} \text{天端高} &= \text{設計満潮位} + \text{入射波の半波高} + \text{水位上昇量} \\ &= \text{H.W.L} + 0.5\text{HL} + 0.2\text{HL} \end{aligned} \quad (1)$$

(※HL=長周期波の入射波高)

(5) 吸収層幅について

a) 吸収層必要幅の算定

数値計算の目標反射率を0.7に設定しており、目標反射率を満足する吸収層の必要幅を確保する必要がある。吸収層幅は、模型実験・理論式による検討結果⁴⁾(図-7)を参考に目標反射率に対する必要幅を求めた。

目標反射率0.7からB/L=0.076が読み取れ、長周期波の卓越周期90sにおける波長Lから求めた吸収層の基本幅を表-5に示した。なお、形状補正係数ζとは、理論式が直立透水堤から導かれた式であるため、吸収層前面の形状

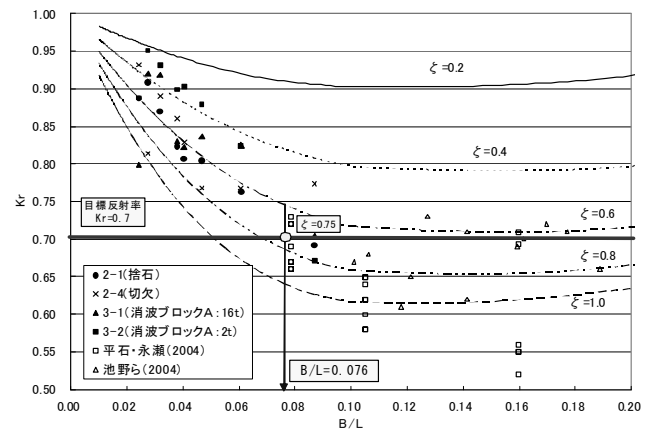


図-7 実験値及び理論式による反射率計算結果

表-5 吸収層の基本幅(直角入射)

区間	平均水深	潮位	水深+潮位	周期	波長L	B/L	基本幅B
甲部	-2.0m	+1.7m	3.7m	90s	541.5m	0.076	41.2m
乙部	-1.8m	+1.7m	3.5m	90s	526.7m	0.076	40.0m

による補正（吸収性能を低減）を行うためのパラメータであり、吸収層の法勾配1:4/3より4/3の逆数をとったものである。

b) 波向を考慮した必要幅の検討

実験⁴⁾においては、防波堤および護岸に対して0°の直角入射条件で行っているが、実際の港湾では多方向からの入射を考慮する必要があると考えられる。波の不規則性を考慮した補正の検討については、平成17年度に実施した現地観測結果を基に検討を行った（図-8,9）。図-9に、苫小牧西港沖（勇払沖）と東防波堤背後の観測地点の波向相関を示した。この結果によると、東防波堤背後の波向は、勇払沖の波向変化にあまり影響を受けず、東防波堤に沿った波向SWが卓越傾向にあった。そのため、対策工に入射する波向を波向SWに設定し、必要幅（吸収層の基本幅）について補正を行い吸収層幅を計算した。

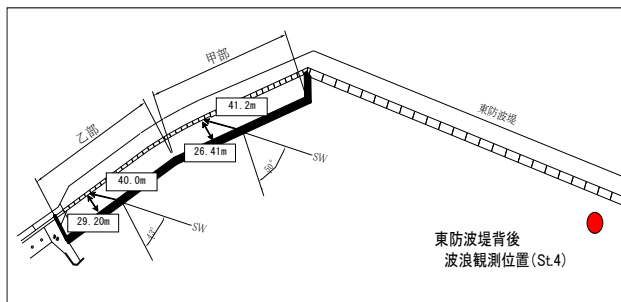


図-8 波浪観測位置・入射角の模式図

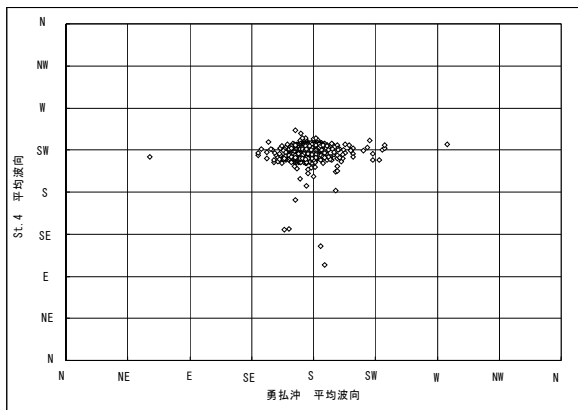


図-9 勇払沖・St.4の波向相関

入射角により補正した吸収層の決定幅を表-6に示した。計算の結果、吸収層の必要幅は30mとなった。

表-6 入射角補正した吸収層幅

区間	波向	入射角 β (deg)	補正值 $1/\cos \beta$	基本幅 B_0 (m)	補正幅 $B_0/(1/\cos \beta)$	決定幅 B (m)
甲部	SW	50	1.56	41.2	26.41	30
乙部	SW	43	1.37	40.0	29.20	

(8) 消波工について

設計波（50年確率波）を用いた安定計算の結果、吸収層に大割石を使用しても所要重量を満足できないため、法面保護のために前面に消波ブロックを設置することと

した。なお、文献⁵⁾によれば、吸収層に異なる粒径の層を設けることにより、一様な吸収層（中割石）の場合よりも長周期波反射率を低減できるとされており、消波ブロック設置によってその効果も期待できる。消波工天端高は、吸収層天端保護を目的とする被覆ブロックの安定性を考慮し、被覆ブロック天端高と同一とした。

(9) 被覆工について

吸収層天端には、港内側からの越波等から吸収層を保護するため、被覆ブロックを設置することとした。この吸収層天端保護を目的とした被覆ブロックの諸元に関する基準が存在しないことから、所要重量の算定はハドソン式を準用し、所要幅は文献⁶⁾を基に越波水の打ち込み位置を算定し、吸収層法肩から打ち込み位置までの範囲を保護することとした。文献⁶⁾では、傾斜堤背後の越波水の運動を図-10のとおりモデル化し、自由落下した越波水の打ち込み位置 X_b における流速 V_b を用いた被覆材の安定質量算定式を提案している。同算定式による安定質量は、水面下にある被覆材を対象としていることから、越波水打ち込み位置の算定式のみを準用した。なお、東防波堤からの越波による吸収層天端への影響は小さいため、東防波堤側の被覆材は不要とした。

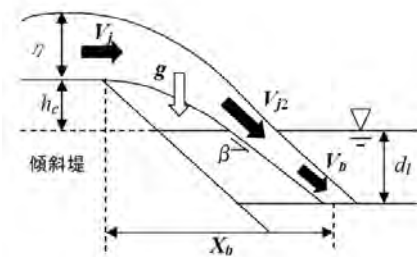


図-10 越波水の打ち込みモデル

5. 波浪調査の結果

(1) 波浪調査の概要

長周期波対策工の効果検証のためにデータ収集を目的として波浪調査を行った。図-11にその観測位置を示す。

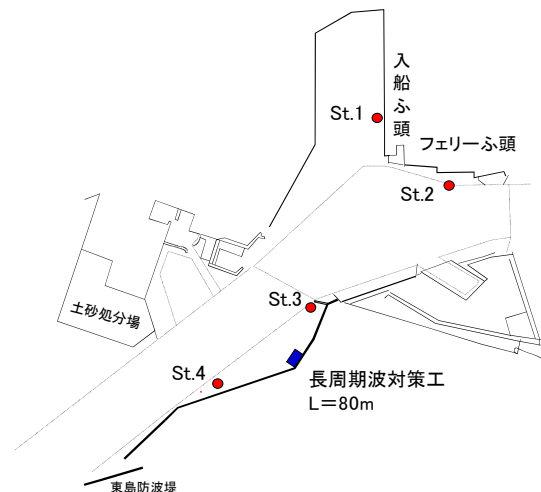


図-11 波浪観測位置

調査は平成20年11月10日から平成21年2月9日までの約3カ月間行い、波高、波向等について観測した。現地施工は10月末より始まり、12月下旬に約半分、2月下旬に平成20年度施工延長80mを完成していた。(表-7)

表-7 施工状況及び観測期間

	10月	11月	12月	1月	2月
施工状況		大削石投入 石カゴ設置 12 14 20 28	中削石投入 半削石投入 11 19 24	後覆ブロック設置 消波ブロック設置 削石投入 7 17 20	後覆ブロック設置 消波ブロック設置 削石投入 4 11 24
波浪観測状況		設置 10	点検 11	点検 9	撤去 9

(2) 観測期間中の海象・荷役障害等の状況

観測期間中に港外波高が2m以上となったのは11月に5回、1月に3回観測されたが、3mを超えるものはなかった。長周期波高は港外最大で12月17日の0.26m、港内では1月15日にSt.3で0.20mを記録していた。フェリーの船体動揺を抑えるためにタグボートが出動した回数は計2回あり、平成20年11月19日と平成21年1月15日にそれぞれ係留補助を行っていた。この2回について整理したところフェリー到着予定時刻の約3~5時間前にフェリー埠頭前面(St.2)の有義波高が0.6mを超えていた場合にタグボートが出動していた。長周期波高も有義波高の発達と共に大きくなっており、11月19日のタグボート出動時には港外最大波高で0.16mを記録していた。

(3) 波浪観測結果

今回の観測結果における施工初期の11月と概成しつつ

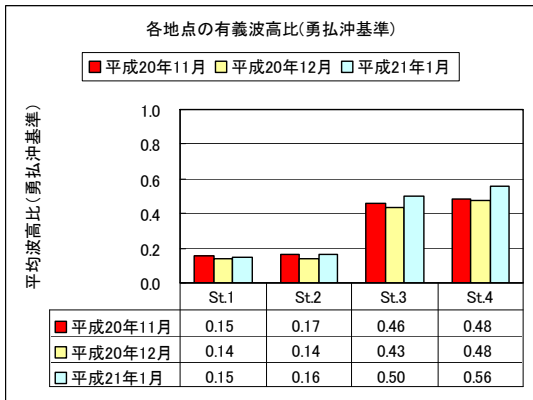


図-12 各期間の平均波高比(通常波)

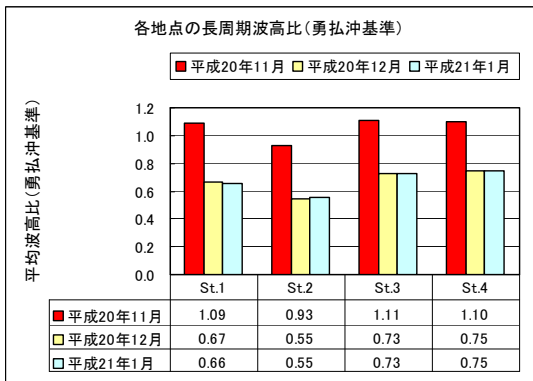


図-13 各期間の平均波高比(長周期波)

あった1月の沖波との施設前面平均波高比を比較した結果、有義波では特に変化が見られなかったが、長周期波は11月以降全地点で0.4程度平均波高比が低下していた。(図-12,13) この傾向によれば施設を延伸することにより、さらなる波高低減効果が期待されるところである。

(4) 過年度調査結果との比較

表-8に平成17年度(平成17年7月22日~10月9日)と平成20年度(平成21年1月9日~2月8日)の長周期波の沖波との平均波高比を示す。平成17年度港形と長周期波対策工を除く平成20年度港形はほぼ同一である。平成20年度分は長周期波対策工が概ね概成している1月の結果を用いている。St.3は平成20年度に設置位置を航路側へ約30m移動しているため参考値とする。平成20年度の結果は平成17年度から比べて0.2~0.5程度の範囲で全体的に低下していた。なお、St.4も波高比が低下しているが、波長が長い前面のSt.4にも対策工の影響が働き、港奥のみならず港内全体の長周期波に対して効果が表れているものと推察される。

表-8 平成17年度と平成20年度の比較(長周期波)

平成17年度

対象地点	長周期波		平均波高比		
	全観測期間	波向別			
		SSE	S	SSW	
St.1	0.94	1.00	0.95	1.10	
St.2	0.72	0.77	0.73	0.89	
St.3	1.12	1.23	1.14	1.15	
St.4	1.19	1.25	1.23	1.21	

平成20年度 (H17港形+長周期波対策工 L=80m)

対象地点	長周期波		平均波高比		
	1月	波向別			
		SSE	S	SSW	
St.1	0.66	0.64	0.66	0.64	
St.2	0.55	0.53	0.56	0.52	
St.3	0.73	0.70	0.76	0.70	
St.4	0.75	0.73	0.74	0.69	

■ : 過年度より低減
■ : 過年度より増加

6. まとめ

今回整理した苫小牧港西港区における長周期波対策工の検討及び施工開始後の波浪調査結果について以下にまとめる。

- ① 静穏度解析を行った結果、東防波堤背後に長周期波対策工を配置することにより、将来港形において全てのふ頭前面の水域で目標稼働率97.5%を満足する結果となった。
- ② 苫小牧港西港区における長周期波対策工の設計条件と吸収層天端高、吸収層幅などの諸元根拠を既往文献、現地観測結果等により整理した。
- ③ 長周期波対策工の効果検証のためにデータ収集を目的として波浪調査を行い、平成20年度の現地観測結

果では、観測期間および施工延長がまだ短いものの、施工開始直後に比べて概成時には各地点の長周期波平均波高比が低減する傾向が確認された。また平成17年度の観測結果と比較しても各地点の平均波高比が低減している傾向が確認された。

難であるため、現地観測データと数値計算による総合的な検討を行う必要があると考えられる。

謝辞：最後に、苫小牧港西港区における長周期波対策工を検討するにあたり、ご指導ご協力頂いた検討委員会委員をはじめとする関係者各位に、深く感謝の意を表す。

7. 今後について

これまでの報告結果から、今後の課題について以下に整理する。

- ① 今回の波浪観測データは、平成20年度の3ヶ月間のもので単年度短期間で評価したものであり、波浪条件によって長周期波対策工の効果が変動する可能性もある。そのため、今後も継続して様々な波浪条件下での現地観測データの取得が重要であると考えられる。
- ② 長周期波対策工の反射率は、水理模型実験や解析等による検討がほとんどであり、実海域における長周期波対策工の検討事例は少ない状況にある。今後の効果検証のために実反射率の算定にあたっては、長周期波の性質上、現地観測データのみでは算定が困

参考文献

- 1) (財)沿岸技術研究センター：港内長周期波影響評価マニュアル，2004
- 2) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説(上)，2007
- 3) 港湾空港技術研究所：長周期波護岸吸収性能調査報告書，H15.2
- 4) 山田晶子，国栖広志，爲弘哲也，小平田浩司，平石哲也：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，2005
- 5) 平石哲也，永瀬恭一：長周期波対策護岸の最適構造に関する実験，海岸工学論文集，第51巻，2004
- 6) 早川哲也，森昌也，梅沢信敏，土井善和，遠藤強：環境共生を目的とした傾斜堤背後小段の耐波安定性，第44回平成12年度北海道開発局技術研究発表会論文集