

防波堤整備による長周期波抑止方策の検討

Prevention Method of Long Period Waves by Construction of Breakwaters

國田淳*・渥美洋一**・石澤健志*・関口信一郎*

木村克俊***・平石哲也****・川口勉*****

Atsushi Kunita, Youichi Atsumi, Kenji Ishizawa, Shin-ichiro Sekiguchi

Katsutoshi Kimura, Tetsuya Hiraishi, Tsutomu Kawaguchi

Termination of cargo handling caused by long period waves sometimes occurs in a port.

The estimation method of the rate of effective cargo handling days for long period waves is derived from the characteristics of long period waves observed in Tomakomai-port.

The countermeasures by breakwaters is proposed to improve the rate.

Keywords: long period waves, effective cargo handling days, breakwaters

1. はじめに

港内の静穏度については、一般に「係留施設前面において、年間を通じ 95～97.5%以上の稼働」が目標値とされているが、具体的には、中型船に周期数秒程度の波が作用した場合の調査結果から、荷役限界波高を50cmとした稼働率が用いられているのが通例である。

しかしながら、全国のいくつかの港湾においては、上記の荷役限界波高に満たない一見静穏な海象条件であるにもかかわらず、長周期成分の波が係留した船舶に荷役障害を引き起こす事態が生じている。

苫小牧港東港区において「底うねり」と称される船舶の長周期動揺も上記の典型的な例の一つであり、この現象は港外から侵入した波浪中の長周期成分に起因し、さらに船舶の係留系との共振により生じていることがこれまでの検討で明らかとなっている。

長周期動揺の抑止方策としては、係留系の改善や港形の改善等が考えられるが、港内全般で被害が生じている場合や不特定多数の船舶の利用が見込まれる場合には、十分に静穏な水域を提供するという港本来の役割に鑑み、防波堤の整備等による港形の改善策の検討が重要である。

そのため本研究は、通年の現地観測と水位変動シミュレーションとにより、港内の長周期波の増幅を再現するとともに、長周期波を考慮した荷役限界波高を用いた稼働率の形で港内静穏度を評価する手法を提案し、長周期波に対する抑止効果の高い防波堤配置の検討に資することを目的とした。

2. 長周期波に関する荷役稼働率の算定法

図-1に示すフローに基づき長周期波に関する荷役稼働率を算定する手法を提案する。

以下では、ケーススタディとして苫小牧港西港区と東港区における荷役稼働率を算定して静穏度の評価を行ってみる。

2-1 実測長周期波データの整理

苫小牧港東港区の港外において観測された2時間毎2年間（平成6年8月～平成8年7月）の実測データを整理した。整理に当たっては、港内増幅率の周期による変動が顕著であるため、FFT分解により周期30秒以上600秒までの30成分に分解して整理した。（図-2）

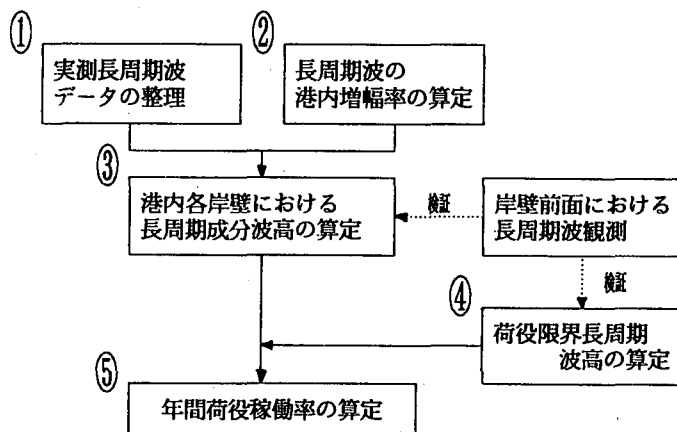


図-1 長周期波に関する荷役稼働率の算定フロー

* 北海道開発局室蘭開発建設部苫小牧港湾建設事務所(053 苫小牧市末広町1丁目1番1号)
 ** 正会員 北海道開発局室蘭開発建設部苫小牧港湾建設事務所
 *** 正会員 北海道開発局開発土木研究所環境水工部港湾研究室
 **** 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室
 ***** 正会員 日本ターナーサービス株式会社

2-2 長周期波の港内増幅率の算定

高山法による通常の静穏度評価に当たっては、港内各係留施設前面における波高比が用いられる。
長周期波を考慮した今回の計算では、運輸省港湾技術研究所の港内副振動計算法を用いて、波向別周期別の水位変動シュミレーション計算を行う。これは、長波の運動方程式と連続の式を差分展開し、任意地点における水位変動を計算するものであり、基本式は以下のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} &= -g(h + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ \frac{\partial q_y}{\partial t} &= -g(h + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} \end{aligned} \right\}$$
$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right)$$

ζ：静水面からの水位変動量

h：水深

g：重力加速度

q_x, q_y：x, y方向の単位幅当たり流量

ここで、港口部におけるエネルギー損失項は、

$$\Delta \zeta l = f_R \cdot \frac{u^2}{2g}$$

u：港口流速
f_R：港口損失係数=1.5

また、水深が浅い港内における海底摩擦によるエネルギー損失は、

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g n^2}{(h + \zeta)^{4/3}} u |u|$$

n：マンニングの粗度係数=0.025

とした。

入力波は、船体動揺発生時(H6.9.18 2~4時)の2時間分の実測波をFFT分解して得られた周期30秒以上600秒までの30成分波を独立した正弦波として与えた。

波向きについては、来襲頻度を考慮しSSE, 170°, S, SSW, 220°の5波向きで算出し、これらの中間波向については、直線内挿して求めた。

計算例を図-3に示す。

2-3 港内各岸壁毎の長周期波高の整理

2-1で求めた港外実測波と2-2で求めた港内増幅率とを掛け合わせるにより、図-4に示す港内各岸壁位置における周期別長周期成分波高を求めるとともに、次式により岸壁前面長周期波高を求めた。

$$HL = 4.0 \times \sqrt{\sum_i (Z_i \cdot HLi)^2}$$

i

HL：岸壁前面長周期波高
Z_i：周期成分毎の増幅率
HL_i：周期成分毎の港外波高
i：周期成分

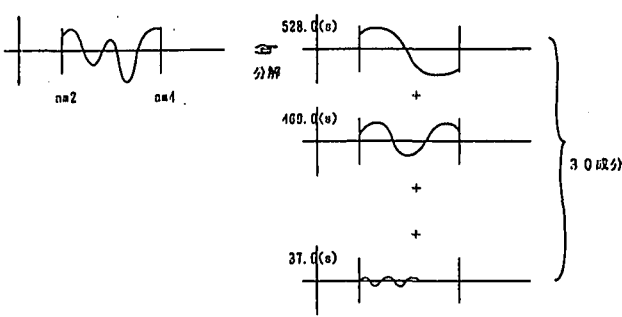


図-2 実測長周期波データの整理

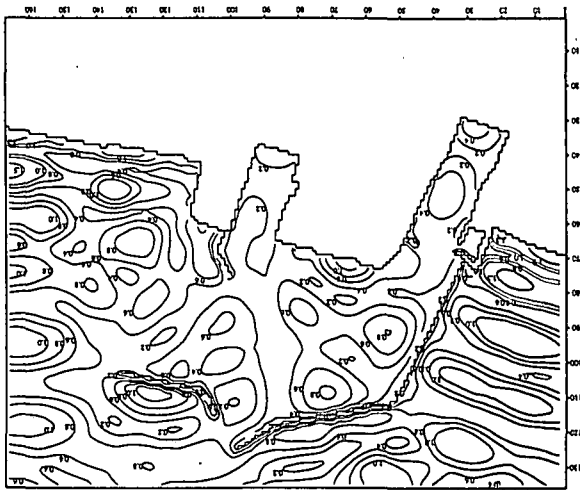


図-3 港内増幅率の計算例

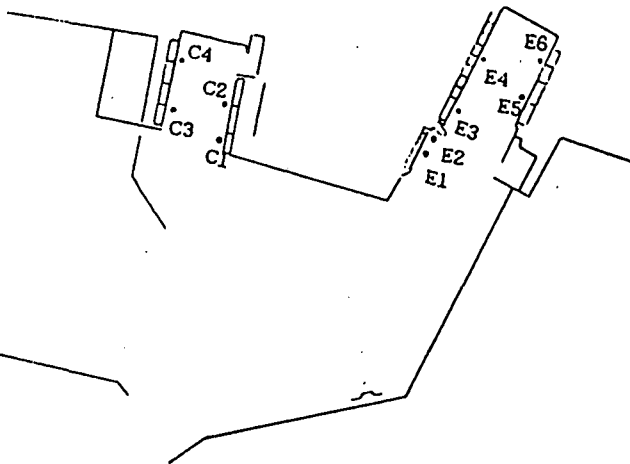


図-4 検討対象岸壁位置図(東港区)

図－４中の E1における岸壁前面長周期波高を波向別、波高階級別に集計した例を表－１に示す。

表－１ 岸壁別長周期波高の集計例

〔将来港形 E1〕						
波向	長 周 期 波 高 (cm)					計
	～5	5～10	10～15	15～20	20～	
150	1107 18.5%	374 6.3%	60 1.0%	22 0.4%	24 0.4%	1587 26.6%
160	1369 22.9%	689 11.5%	150 2.5%	54 0.9%	39 0.7%	2301 38.5%
170	695 11.6%	316 5.3%	46 0.8%	20 0.3%	34 0.6%	1111 18.6%
180	268 4.5%	125 2.1%	7 0.1%	3 0.1%	6 0.1%	409 6.8%
190	82 1.4%	71 1.2%	2 0.0%	1 0.0%	0 0.0%	156 2.6%
200	49 0.8%	61 1.0%	7 0.1%	1 0.0%	0 0.0%	118 2.0%
210	21 0.4%	52 0.9%	6 0.1%	2 0.0%	4 0.1%	85 1.4%
220	93 1.6%	96 1.6%	5 0.1%	3 0.1%	11 0.2%	208 3.5%
計	3684 61.7%	1784 29.9%	283 4.7%	106 1.8%	118 2.0%	5975 100.0%

2-4 荷役限界長周期波高の算定

港内各係留施設毎の対象船舶標準船型を対象に運輸省港湾技術研究所の浮体動揺計算プログラムを用いた船体動揺シミュレーションを実施し、荷役限界を引き起こす長周期波高を求めた。なお、船種別の荷役限界動揺量は、上田、白石らの提案する荷役許容動揺量（表－２）を準用した。

苫小牧港東港区の各係留施設別の荷役限界長周期波高を表－３に示す。

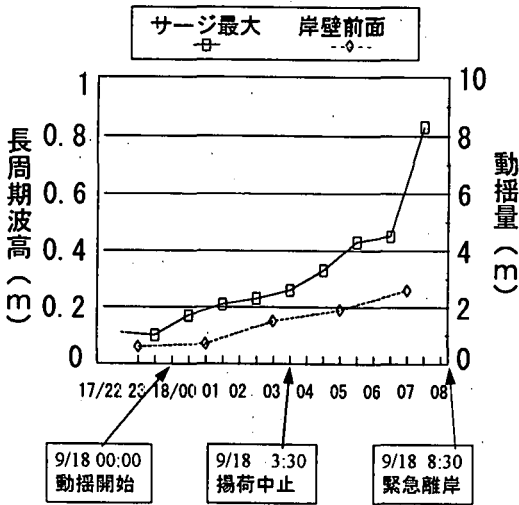
なお、平成６年９月に E1 岸壁で生じた船体動揺の経時変化を図－５に示すが、実際にもサージ方向動揺量が両振幅約 2m を超えた状況で荷役を中止しており、この時の長周期波高は約 10cm となっている。このことから、表－３で求めた荷役限界長周期波高は、当港における現象を概ね再現できていると考える。

表－２ 船種別荷役許容動揺量

船 種	サージ	スウェイ
貨物船	±1.0	±0.75
鉱石運搬船	±1.0	±1.0

表－３ 荷役限界長周期波高の算定結果

	水深 (m)	対 象 船 舶 (DW)	両振幅動揺量				荷役限界長
			サージ		スウェイ		周期波高 (c m)
			HL=10	HL=15	HL=10	HL=15	
E1	-14	鉱石船 80,000	230	393	42	47	10
E2	-5.5	貨物船 2,000	127	184	44	58	15
E3	-12	貨物船 30,000	244	375	56	84	10
E4	-7.5	貨物船 5,000	206	261	48	90	10
E5	-12	貨物船 30,000	210	389	48	58	10
E6	-10	貨物船 10,000	219	287	22	48	10
C1	-10	貨物船 10,000	184	247	30	41	10
C2	-14	貨物船 50,000	155	315	40	70	10
C3	-9	貨物船 10,000	176	250	94	121	10
C4	-9	貨物船 10,000	172	310	25	50	10



図－５ 長周期波高と船体動揺量の同時観測（E1 岸壁）

2-5 荷役稼働率の算定

2-3で求めた港内各係留施設毎２年分の長周期波高算定値について、2-4で求めた荷役限界長周期波高の出現頻度を整理し、この未超過の確率をもって、荷役稼働率とした。

現況の苫小牧港西港区及び東港区の荷役稼働率の算定結果を図－６及び図－７に示す。

西港区現況港形では、最低でも 95%以上、港内全域を通じて概ね 98.5%が確保されているが、これに比べ東港

区では全体に静穏度が低くなっている。両者の港内増幅率を比較してみると、西港区が港内ほぼ全域で 0.1 程度なのに対し、東港区ではところどころ増幅率が高くなっていることがわかる。このように、自然条件が似通った地域でも、防波堤形状や水路の掘込形状の違いにより、荷役稼働率は大きく変化することから、防波堤形状等の改善によりある程度の静穏度の改善が可能であることが推測される。

毎年被害が報告されている東水路-14m岸壁前面は 93.4%となったが、これは、過去 5 年間の当岸壁における実際の稼働率 93%（総利用日数 532 日中被害日数35日）をほぼ再現するものとなっている。また、今後本格的に供用が予定されている中央水路は、東水路よりも静穏度が低くなっており、今後東水路と同様な現象が懸念される結果となった。

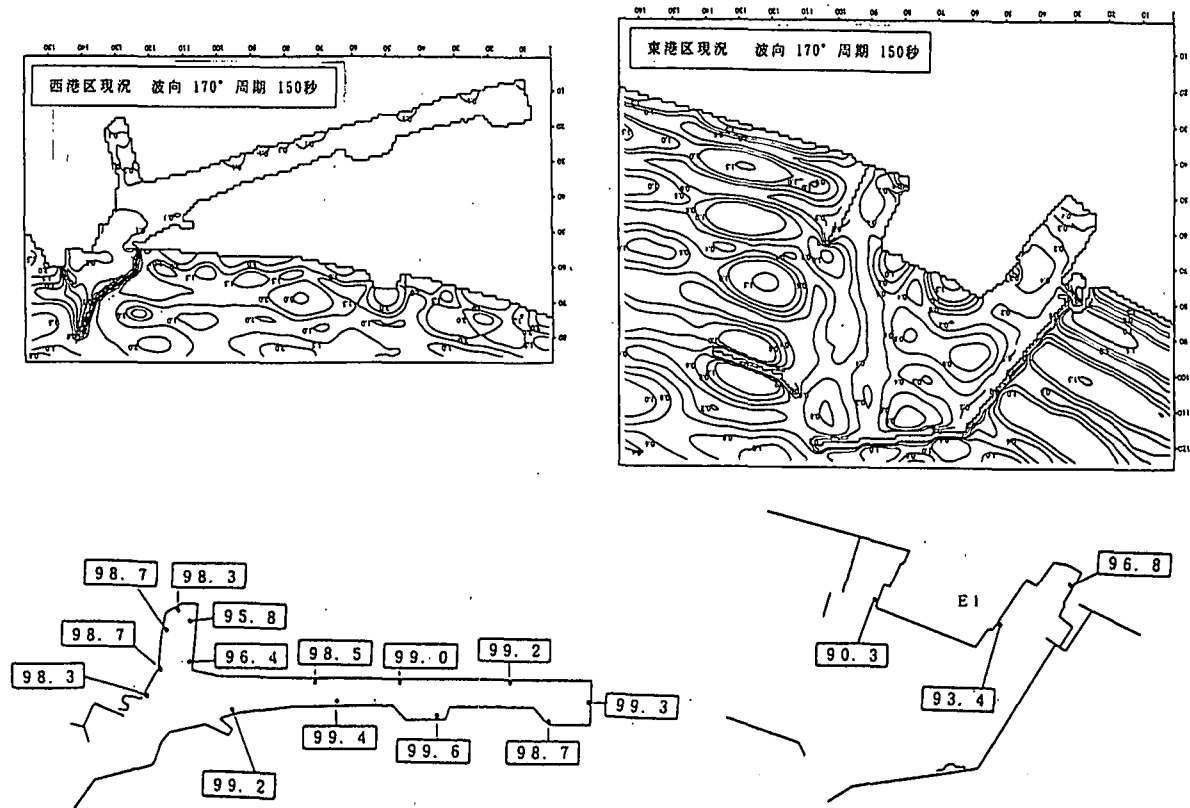


図-6 港内増幅率と荷役稼働率の算定結果（西港区現況） 図-7 港内増幅率と荷役稼働率の算定結果（東港区現況）

3. 防波堤整備による長周期動揺の改善効果

今回提案した手法を用い、防波堤の規模、配置を種々変化させて静穏度を評価することにより、様々な防波堤による長周期動揺の改善効果を定量的に検討した。本稿においては、以下の代表的な 6 港形について検討結果を示す。

3-1 想定港形 I（基本港形）

将来の具体的な整備計画を考慮しつつ、図-8 のような港形を想定して検討を行った。

現況港形と比べ、中央水路に500mの防波堤等を新たに想定したほか、東水路、中央水路において現況より500m程度内陸側への掘込を想定した。

中央水路500mの防波堤の整備により中央水路東側で一部静穏度が改善される結果となったが、一方で水路の掘込による副振動の影響も見られ、全体には大幅な改善は見られない。とりわけ、新たに供用を想定した中央水路西側はかなり低い結果となった。

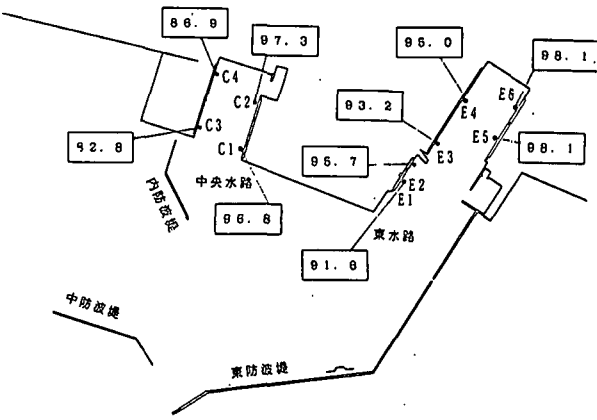


図-8 荷役稼働率の算定結果（東港区想定港形 I）

3-2 想定港形Ⅱ（水路口防波堤による効果）

次に、両水路口部に300m程度の防波堤をそれぞれ配置した場合を想定した。

この場合は、静穏度が改善される傾向は見られたが、その度合は小さく、中央水路西側は、依然として低い稼働率となっている。(図-9)

3-3 想定港形Ⅲ（西側港口防波堤による効果）

水路口部における小規模な防波堤では、改善効果が小さかったことから、港口部における防波堤整備を想定する。

まず、西側開口部を 1km 程度の防波堤を整備する場合を考えた。この場合は、全体に静穏度が低下しており、これは、西側からの長周期波の侵入を抑制する効果よりも港内を囲い込むことに伴い副振動を助長する傾向が強いためと推測される。(図-10)

3-4 想定港形Ⅳ（南側港口防波堤による効果）

次に、南側開口部を、1km程度の防波堤で遮蔽する場合を考えた。

この場合は、特に中央水路に対する改善効果が大きく、全体で見ても最低 95%以上の静穏度が確保される結果となった。事業化に向けては別途コスト等の詳細な比較が必要であるが、今回想定した港形比較においては、南側港口の防波堤が長周期波の抑止に有効であることがわかった。(図-11)

3-5 想定港形 V (西側開口部閉鎖による効果)

3-4で南側港口の防波堤が有効であることがわかったが、これを端的に検証するため、西側港口と南側港口を遮蔽した仮想港形で比較を試みた。想定港形Ⅴは、西側港口を閉鎖したケースを想定したものであるが、想定港形Ⅲでみられるように、単純な遮蔽では、囲い込みに伴う副振動の影響が卓越すると考えられることから、中防波堤を無限延長して計算した。これによれば、西側からの長周期波が完全に遮蔽されることから、一様に静穏度が向上するが、中央水路西側はやや低めの値である。(図-12)

3-6 想定港形Ⅵ（南側開口部閉鎖による効果）

南側港口を閉鎖した場合も一様に静穏度が向上するが、特に中央水路への改善効果が大きく、全体に95%以上が確保されている。従って、この計算結果からも、特に静穏度が懸念される中央水路に対しては、南側港口の遮蔽が効果的であることがわかる。

(圖-13)

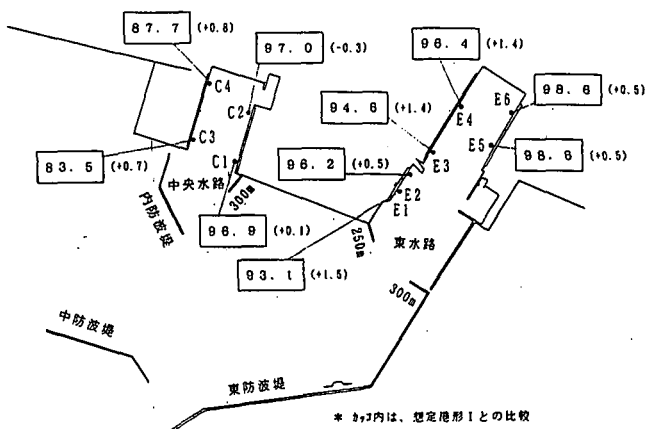


図-9 荷役稼働率の算定結果（東港区想定港形Ⅱ）

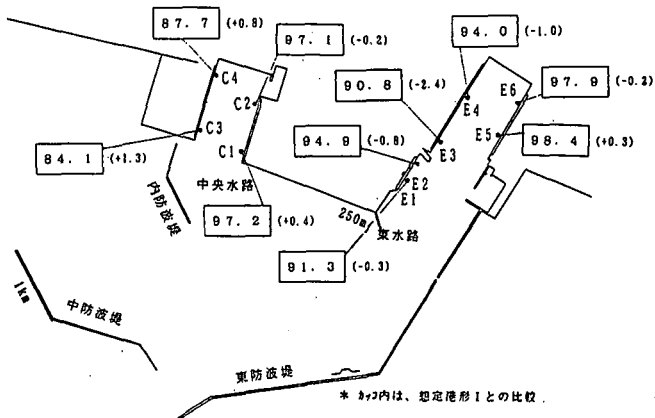


図-10 荷役稼働率の算定結果（東港区想定港形Ⅲ）

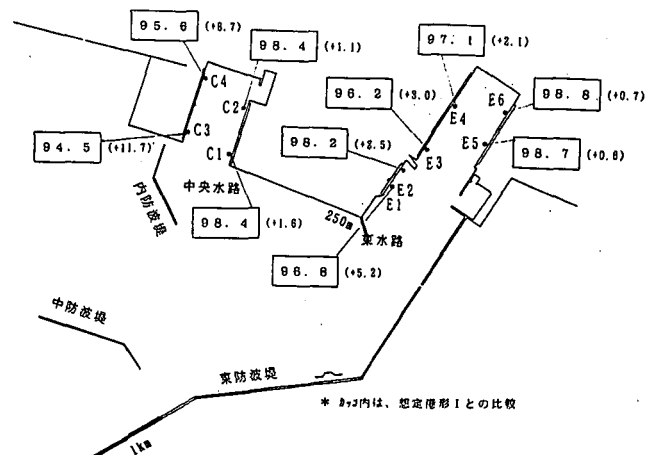


図-11 荷役稼働率の算定結果(東港区想定港形Ⅳ)

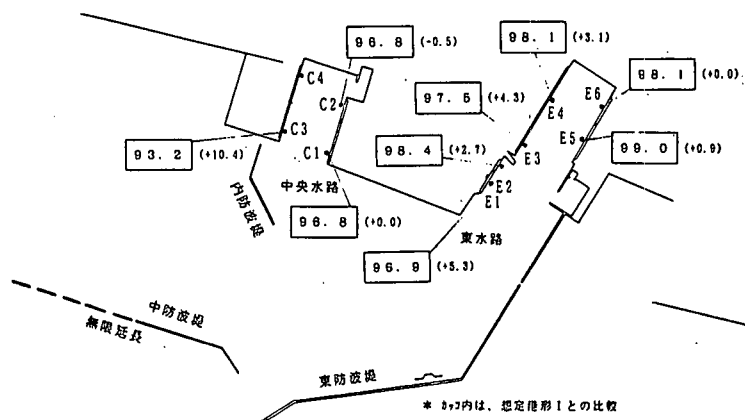


図-1 2 荷役稼働率の算定結果(東港区想定港形V)

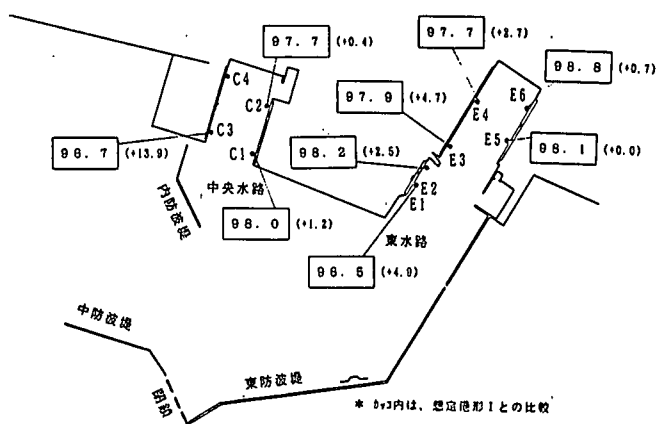


図-1 3 荷役稼働率の算定結果(東港区想定港形VI)

4. まとめ

- (1) 長周期波を考慮した港内の静穏性を定量的に評価する手法を提案した。具体的には、港外の波浪データの整理と港内の水位変動シミュレーションとにより、通常の静穏度評価と同様に荷役稼働率の形で静穏度を評価することが可能である。

本研究においては、苫小牧港を対象としてケーススタディを行い、再現性の検証を行った。

現状では、長周期波動揺の被害がほとんど報告されていない西港区では、港内ほぼ全域で98%以上の静穏度が確保されていたのに対し、東港区では、現在最も利用頻度の高い東水路-14m岸壁で約93%と推定され、本手法により実際の被害率をほぼ再現することができた。

- (2) 本手法を用い、防波堤の規模、配置を種々変化させて静穏度の評価を行うことにより長周期波に対する遮蔽効果の高い港形の提案に活用できることを示した。

苫小牧港東港区においては、将来計画されている両水路の掘込がさらに進んでいくと、水路内の副振動により静穏度が低下する傾向が見られた。静穏度改善のための対策工としては、南側の港口からの長周期波の侵入を低減させることが有効と考えられ、具体的には、南側の港口に約1kmの防波堤を整備することにより、現状の西港区と同程度の静穏性が確保される見通しを示した。

最後に、観測・解析を進めるに当たり「苫小牧港東港区静穏度対策検討委員会(委員長:上田茂 鳥取大学工学部教授)」に御指導を賜った。ここに厚く御礼申し上げる次第である。

(参考文献)

- 1) 神谷昌文・渥美洋一・國田淳・関口信一郎・木村克俊・平石哲也・白石悟・上田茂(1996):長周期波に対する荷役稼働率の評価法とその改善策, 海岸工学論文集, 第43巻, pp891-895.
- 2) 菅沼史典・神谷昌文・渥美洋一・小泉信夫(1995): 現地観測による長周期波の発生頻度と船体動揺発生予測の検討, 海岸工学論文集, 第42巻, pp951-955.
- 3) 高山知司・平石哲也(1988): 数値計算と現地観測による港内副振動特性の検討, 港湾技術資料No. 636.
- 4) 上田茂・白石悟(1983): 係留船舶の動揺計算法とその評価, 港湾技術研究所報告第22巻4号, pp181-218.
- 5) 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3号, pp1-34.