

荷役稼働率に基づく長周期波対策効果の 評価手法

EVALUATION METHOD FOR LONG-PERIOD WAVES COUNTER PLAN BASED ON CARGO HANDLING OPERATION RATE

大島香織¹・森屋陽一²

Kaori OHSHIMA and Yoichi MORIYA

¹正会員 工修 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

²正会員 工博 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

Long-period waves cause failure of cargo handling and break mooring ropes in many ports. One of the counter plans against long-period waves is to extend offshore breakwater in a port. It is an effective way to reduce long-period waves in a port.

In this paper, we propose the method that evaluates such counter plans against long-period waves in terms of the cargo handling operation rate. We examined the difference of the cargo handling operation rate by changing evaluation indices, such as wave height, long-period wave height, and ship motion. Finally, we applied the proposed evaluation method to Hitachinaka port and investigated the effect of long-period wave counter plans.

Key Words : long-period waves, equation of Boussinesq, cargo handling operation rate

1. はじめに

近年, 周期数十秒～数分の長周期波が港湾における船舶の荷役稼働率の低下, 係留索や防舷材の破断事故等を発生させる支配的要因として注目されている。港内に侵入した長周期波の周期が係留船舶の動揺の固有周期と近いと, 共振現象により船体動揺が増幅され, 上述した事故の原因となる。その対策として, 波浪推算による長周期波発生予測などのソフト対策, 係留索や防舷材の材質の変更, 防波堤延伸による長周期波の進入抑制, 長周期波消波構造物の設置などのハード対策が提案されている。特にハード対策として構造物を新たに設置する場合, 多大な施工領域とコストが必要となるため, 事前に荷役稼働率の向上等の対策効果を適切に評価することが重要となる。従来は, 荷役稼働率を評価する際, 荷役限界波高を評価指標として用いることが多く, 港内静穏度計算より波高を求め, 荷役限界波高と比較し荷役稼働率を算出する手法が一般的に用いられてきた。しかしながら, 荷役障害の原因として長周期波が関係している事例が多いことが明らかになるに従い, 長周期波を考慮した荷役稼働率の算定の必要性が高まっている。

長周期波を考慮した荷役稼働率の評価手法として,

波高を指標とする手法や船体動揺量を指標とする手法などが提案されているが, 評価指標やその許容値の違いによる評価結果への影響などは十分に検討されていない。

本研究は, 荷役稼働率算定における評価指標やその許容値の違いによる荷役稼働率の算定結果への影響を検討し, 荷役稼働率算定手法の違いによる荷役稼働率の違いを明らかにする。さらに, 防波堤延伸によるハード対策を例として, 異なる評価指標により, 長周期波対策効果の試算を行う。

2. 長周期波対策評価手法

長周期波対策効果の評価フローを図-1に示す。これは, 「港内長周期波影響評価マニュアル」¹⁾で厳密解析法に分類されている手法と類似の手法である。長周期波と通常波浪を一体的に計算し, その結果を用いて船体動揺計算を行い, 船体動揺量を評価指標として荷役稼働率を算出する。同マニュアルには厳密解析法の他に, 荷役限界波高を船舶の大きさに応じて一定値で設定し評価指標とする方法(従来法), 長周期波成分と通常波浪成分の荷役限界波高をそれぞれ設定し評価指標とする方法(標準解析法), 長周

期波成分と通常波浪成分の船体動揺量を求め、荷役限界動揺量を評価指標とする方法(詳細解析法)などが紹介されている。詳細解析法は、長周期波と通常波浪を分けて計算する点が厳密解析法と異なっている。

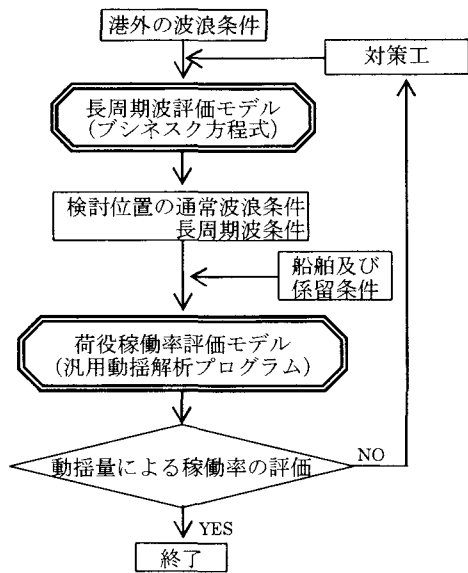


図-1 長周期波対策効果の評価フロー

3. 評価手法の違いによる荷役稼働率

(1) 検討条件

評価手法の違いによる荷役稼働率を比較するために、太平洋に直接面している常陸那珂港内の2地点(図-2)を対象に、表-1に示す5ケースに対して荷役稼働率を算出した。

A-1は図-1で示した手法で、ブシネスク方程式を用いて長周期波と通常波浪を同時に計算し、その結果を用い長周期波も考慮した船体動揺量計算を行うものである。ここで、船体動揺を算定する際の長周期波の外力を精度よく評価するために、中山ら²⁾に従い流速を用いた等価進行波高を用いて長周期波による外力を算定した。また、荷役稼働率の評価指標には荷役限界動揺量を用いている。

B-1は、従来一般的に用いられてきた手法であり、本検討ではグリーン関数法を用いた静穏度解析を行い、周期に関わらず一定の荷役限界波高を評価指標として荷役稼働率を算出している。この手法では長周期波は考慮されていない。B-2は、A-1と同じ波浪場計算結果を用い、通常波浪と長周期波を分けない全周波数帯の波高を算出する。評価指標は、B-1と同じ周期に寄らない荷役限界波高を用いている。この手法は、波浪場の計算には長周期波を考慮しているが、荷役稼働率の評価指標には長周期波を考慮していないものである。

C-1、C-2もA-1と同じ波浪場計算結果を用いている。C-1は、周期20～300sの長周期波成分の波高と、周期20s以下の通常波浪成分の波高を分けて算出し、

長周期波成分と通常波浪成分それぞれに対し荷役限界波高を設定し荷役稼働率を評価する。また、C-2では船に作用する長周期波の特性をより精度よく評価するため、長周期波成分の流速を用いた等価進行波高を用いた。通常波浪成分の波高と荷役稼働率の評価指標はC-1と同じである。

また、本検討の波浪場計算には、図-2に示した東防波堤が3,970m完成した時点の地形を用いている。

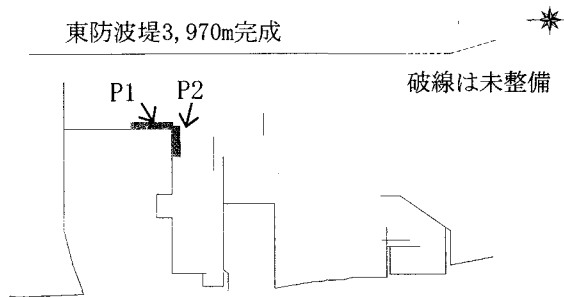


図-2 検討対象地点

表-1 検討ケース

ケース	評価指標			波浪場計算	波浪の取扱い	
	指標	長周期波	通常波浪		長周期波	通常波浪
A-1 (提案手法)	動揺量	○	○	ブシネスク方程式	○*	○
B-1 (従来法)	波高	×	○	港内静穏度	×	○
B-2	波高	×	○	ブシネスク方程式	○ (全周波数帯)	
C-1	波高	○	○	ブシネスク方程式	○	○
C-2	波高	○	○	ブシネスク方程式	○*	○

*等価進行波高より算出

(2) 港内静穏度計算

従来法のB-1において、港内の波高の算出はグリーン関数法を用いた。常陸那珂港外の波浪出現頻度より計算条件を設定し、設定した条件について波高比を算定した。結果を表-2, 3に示す。周期14sの波向NE, ENE以外はP2よりP1の波高比が大きくなる傾向がみられた。

表-2 波高比算出結果(P1)

周期 (s)	波向				
	NE	ENE	E	ESE	SE
6	0.17	0.10	0.09	0.17	0.31
8	0.19	0.13	0.13	0.19	0.30
10	0.17	0.13	0.10	0.20	0.29
12	0.18	0.13	0.13	0.16	0.24
14	0.24	0.18	0.18	0.25	0.33

表-3 波高比算出結果(P2)

周期 (s)	波向				
	NE	ENE	E	ESE	SE
6	0.15	0.08	0.08	0.12	0.21
8	0.15	0.10	0.09	0.13	0.22
10	0.13	0.09	0.08	0.14	0.19
12	0.18	0.11	0.11	0.14	0.20
14	0.29	0.21	0.16	0.18	0.23

(3) ブシネスク方程式を用いた波浪場計算

従来法のB-1以外の解析では、Madsenら³⁾の修正ブシネスク方程式（補正係数 $B=1/21$ ）を用い、港内の波浪変形計算を行った。波向別に3種類の地形を用いて計算を行っている。地形の一例を図-3に示す。

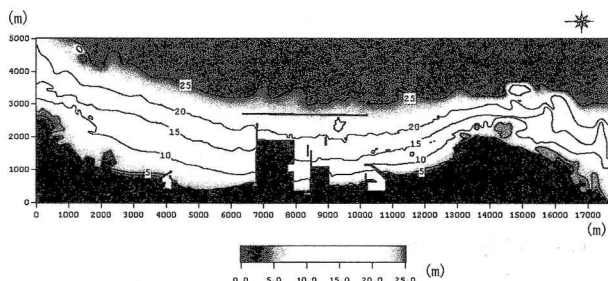


図-3 計算に用いた地形(波向:ENE, E, ESE)

計算格子はx方向10m, y方向10m, 時間ステップ0.2sとした。入射波は長周期波も考慮した多方向不規則波とし、中畑ら⁴⁾に従い以下に示す手順で作成した。①通常波浪はB-M型スペクトル、長周期波はSand⁵⁾に従うものとして周波数スペクトルを設定する。②通常波浪、長周期波ともに方向分布は光易型方向分布に従うものとする。③通常波浪、長周期波の主波向は同じであるとし、通常波浪の方向集中度は $S_{max}=25$ 、長周期波の方向集中度はSand⁵⁾に従うものとする。④通常波浪、長周期波ともに自由波であると考え、位相差および波向の割付には乱数を用いて、エネルギー等分割によるシングルサンメンション法により入射波の時系列を作成する。本方法は長周期波の観測結果がなくとも、通常波浪の観測結果より入射波を作成することができる。また、岸壁は反射率1.0に、消波ブロックを設置してある護岸は反射率0.4に、岸側の海浜は反射率0.2となるようにスポンジ層を設定した。計算ケースは表-4に示すように、港外の波浪出現頻度より16ケース設定した。

波高を評価指標として荷役稼働率を算出するため、対象地点における各ケースの有義波高を求めた。全周波数帯の結果を図-4、周期20s以下の通常波浪成分の結果を図-5、周期20~300sの長周期波成分の結果を図-6、長周期波成分の流速2成分より求めた結果を図-7に示す。

全周波数帯(図-4)と通常波浪成分(図-5)の有義波高を比較すると、長周期波成分は通常波浪に比べてそのエネルギーが小さいため、通常波浪成分のほうが3~10%程度小さな値を示す。一方、長周期波成分の有義波高(図-6)と流速から算出した等価進行波の有義波高(図-7)を比較すると、長周期波は反射壁前面では重複波の腹になるため、全体的に長周期波の波高は流速による等価進行波高に比べて大きな値となる。しかしながら、ケース14のP1やケース16のP2では長周期波の波高は等価進行波高より小さくなっており、条件によっては、岸壁に沿った方向の重複波の影響により、長周期波の波高は流速による等価進行波高よりも小さくなってしまう場合もある。

表-4 計算ケース一覧

ケース	有義波高(m)	有義波周期(s)	主波向(方位)
1	1.5	8.4	NE
2	1.5	8.4	ENE
3	1.5	8.4	E
4	1.5	8.4	ESE
5	1.5	8.4	SE
6	2.5	9.4	NE
7	2.5	9.4	ENE
8	2.5	9.4	E
9	2.5	9.4	ESE
10	2.5	9.4	SE
11	3.5	10.4	ENE
12	3.5	10.4	E
13	3.5	10.4	ESE
14	3.5	10.4	SE
15	4.5	10.4	E
16	4.5	10.4	ESE

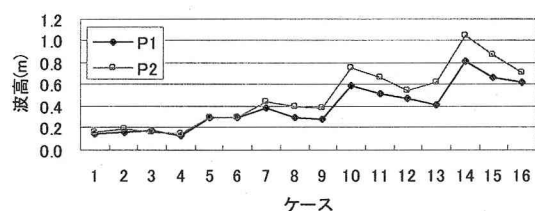


図-4 全周波数帯有義波高

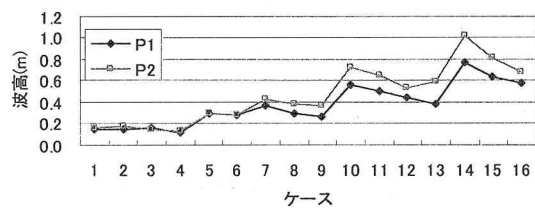


図-5 通常波浪成分有義波高

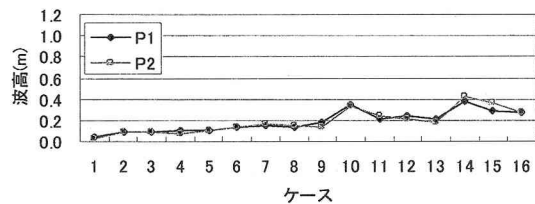


図-6 長周期波成分有義波高

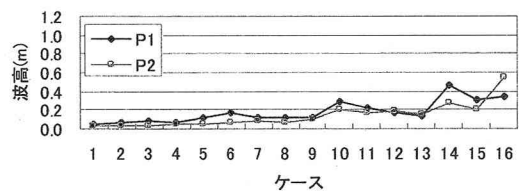


図-7 長周期波成分の等価進行波の有義波高

(4) 船体動揺量計算

係留船舶の動揺量を計算する際に外力となる波浪は、ブシネスク方程式の計算結果を用いて、船舶重心位置での水位と流速から算出した。ここで、通常波浪成分は水位のパワースペクトルを用い、エネルギー等分割で10成分の波の振幅と周期を求め、長周期成分は流速2成分より等価進行波の水位を評価し、

その水位を用いて通常波浪成分と同様に10成分の振幅と周期を求め外力条件とした。

船体動揺量計算は、通常波浪成分と長周期波を考慮した動揺量を精度よく評価するため、久保ら⁶⁾のメモリー影響関数を用い時系列的に解く手法を用いた。本検討で対象とする船舶は、P1は70,000DWTの鉱石貨物船、P2は50,000DWTの一般貨物船とし、その諸元を表-5に示す。また、係留索や防舷材は上田ら⁷⁾を参考とし標準的な設定を行い、係留索に初期張力40kNを与えている。

係留船舶動揺量の時系列の計算結果より、その最大値を図-8、9に示す。これより、本検討の係留条件では、サージングの前後の動揺量の差は小さく、また、サージングよりスウェイングのほうが大きくなる傾向にあることが明らかとなった。

表-5 対象船舶諸元

		P1	P2
トン数	DWT	70,000	50,000
水深	m	18	14
全長	m	224	216
垂線間長	m	215.0	202.8
幅	m	32.2	31.5
深さ	m	18.2	17.5
喫水	m	7.94	6.73
排水量	kN	428,623	276,556

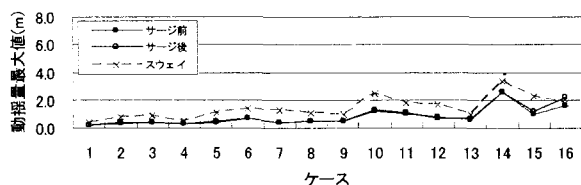


図-8 動揺量最大値 (P1)

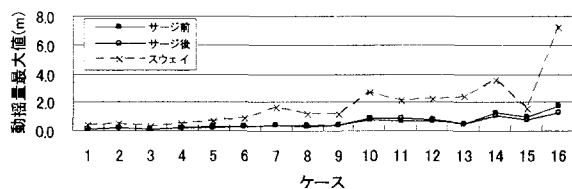


図-9 動揺量最大値 (P2)

(5) 荷役稼働率評価指標の設定

荷役稼働率を算出する際に評価指標として用いた、荷役限界動揺量を表-6に、荷役限界波高を表-7に示す。評価指標は、港湾の施設の技術上の基準・同解説⁸⁾および港内長周期波影響評価マニュアル¹⁾を参考にして設定した。マニュアルでは、長周期波に対する荷役限界波高は、船舶の固有周期や長周期波の卓越周波数により船舶の動揺特性が異なるため明確な値が示されておらず、過去の調査結果より示されている参考値を使用することとなっている。そこで、C-1の長周期波の荷役限界波高はマニュアルの参考値より10cmと15cmの2種類設定し、比較検討を行うこととした。

表-6 荷役限界動揺量

	サージ	スウェイ
鉱石運搬船	±1.0m	±1.0m
一般貨物船	±1.0m	±0.75m

表-7 荷役限界波高

ケース	通常波浪	長周期波
B-1	50cm	—
B-2	50cm	
C-1	50cm	10cm
C-2		
C-1'	50cm	15cm

(6) 荷役稼働率の評価

評価手法による荷役稼働率の違いは、長周期波を考慮しない従来法(B-1)との違いを議論するため、従来法の荷役稼働率に対する各手法で算出した荷役稼働率の比率で整理した(表-8)。

表-8 従来法(B-1)に対する荷役稼働率の比率

評価指標	ケース	検討地点	
		P1	P2
船体動揺量	A-1	0.94	0.85
波高	B-1 (従来法)	1.00	1.00
	B-2	1.01	0.99
	C-1	0.72	0.79
	C-1'	0.95	0.96
	C-2	0.86	0.97

その結果、長周期波を考慮した船体動揺量を評価指標にした場合(A-1)、従来法に比べ荷役稼働率が低下することが明らかとなった。

従来法(B-1)と、全周波数帯の波高を評価指標として荷役稼働率を求めた結果(B-2)にはほとんど差が見られなかった。これより、異なる手法(グリーン関数法とBoussinesq方程式法)で港内波浪を算出した場合でも、評価指標に長周期波を考慮しなければ算出される荷役稼働率には大きな差が現れないことが明らかとなった。

次に、長周期波の荷役限界波高の違いによる荷役稼働率について比較を行ったところ、大きく異なる結果が得られた(C-1, 1')。マニュアルに明確な長周期波の荷役限界波高が示されていない背景から考えても、長周期波の荷役限界波高の設定は慎重に行う必要がある。評価指標として長周期波の波高を用いた場合(C-1)と等価進行波高を用いた場合(C-2)を比較すると、従来法(B-1)に対する荷役稼働率の比率の値は異なるものの、P1よりもP2の比率が大きくなるという傾向は同じであった。

船体動揺量を指標にした場合(A-1)と(等価進行波高も含めた)波高を指標とした場合(C-1, 1', 2)を比較すると、P1とP2の荷役稼働率の比率の傾向が逆になる。これは、荷役稼働率に影響する高波浪の条件(ケース11以上)において、長周期波成分の有義波

高(図-6, 7)は、P1とP2で大きな違いが見られないのに対して、船体動揺量(図-8, 9)のスウェイングはP1に比べてP2が大きいためである。また、P1とP2では対象船舶が異なるため、スウェイングの荷役稼働率動揺量が異なり、P2の方が小さいことも一因であると考えられる。

以上より、荷役稼働率は外力としての波浪条件だけでなく、荷役稼働率動揺量にも依存するため、荷役稼働率の定量的な議論を行うには、船体動揺量を評価指標とする必要がある。

しかしながら、船体動揺量を評価指標として荷役稼働率を算定するには、船体動揺計算を必要とするため、かなりの労力がかかるとともに、港湾計画上、対象船舶の特定が難しい場合もあり、船体動揺量を評価指標とできない場合もある。そのような場合に、長周期波対策工の効果算定するには、過去の知見や船体動揺量の算定結果との比較により、慎重に波高の算定方法や荷役稼働率波高の設定を行えば、波高を評価指標として用いる方法も、比較的有効な手法の1つになると考えられる。

4. 防波堤の延伸による荷役稼働率の試算

(1) 試算条件

長周期波対策として防波堤の整備が進んだ場合、対象地点(P1, P2)の荷役稼働率がどのように向上するか検討を行った。本検討に用いた地形はT-1～3の3ケースである。T-1は3章で用いた地形と同じ東防波堤が3,970m完成した港湾形状(図-2)、T-2は東防波堤が完成した港湾形状(図-10)、T-3は東防波堤が完成し、南防波堤が1,000m施工完了した港湾形状(図-11)である。T-3で設定した南防波堤は、P2地点の正面に施工されるため、この方向からの長周期波の進入を防ぐことにより、P2地点の荷役稼働率が向上すると考え検討対象に加えた。これらの地形を用い、その他の諸条件は3章と同じとし、長周期波を考慮した船体動揺量を用いる手法(A-1)と等価進行波高を用いる手法(C-2)で、荷役稼働率を算出した。ここで、波高を指標とする手法の代表として、等価進行波高を用いる手法を取り上げたのは、波高よりも等価進行波高を用いた方が船体動揺量を精度よく評価できる(中山ら²⁾)ためである。

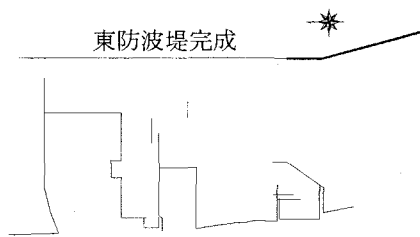


図-10 T-2(東防波堤完成)

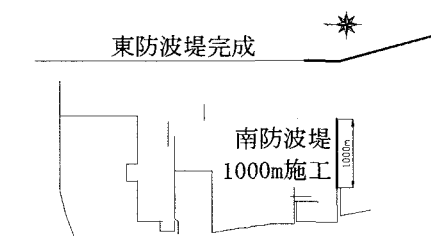


図-11 T-3(東防波堤完成+南防波堤1000m施工)

(2) 試算結果

船体動揺量の最大値(スウェイング)の結果を図-12, 13に示す。これより、防波堤を延伸したことで全体的に船体動揺量が低下していることがわかる。特に荷役稼働率に影響する高波浪の条件での、P2における低下が顕著である。次に、長周期波成分の等価進行波の有義波高を図-14, 15に示す。船体動揺量と同様に、防波堤を延伸することで有義波高は全体的に低下している。動揺量や有義波高で、波浪条件によっては、T-1よりも大きな値が存在するのは、防波堤の延伸により回折による重複波の腹節の位置が変化したためであると考えられる。

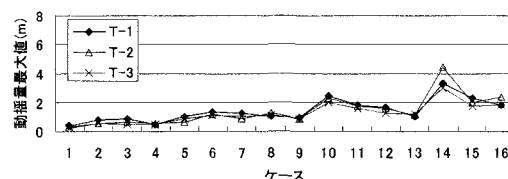


図-12 動揺量最大値(swaying:P1)

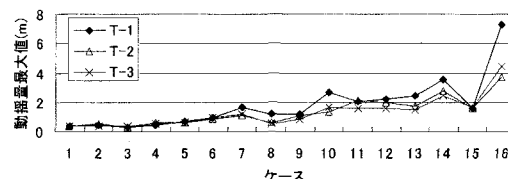


図-13 動揺量最大値(swaying:P2)

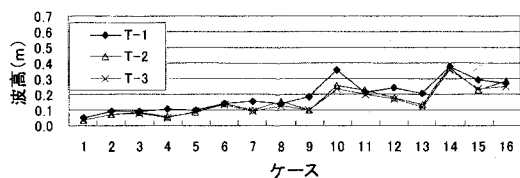


図-14 長周期波成分の等価進行波の有義波高(P1)

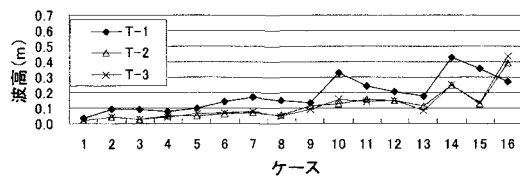


図-15 長周期波成分の等価進行波の有義波高(P2)

また、防波堤の延伸による荷役稼働率の向上を比較するため、3章と同様に従来法(B-1)の荷役稼働率に対する、荷役稼働率の比率を算出した。その結果を表-9, 10に示す。この結果、いずれの手法においても防波堤の延伸による荷役稼働率の向上が算定

できている。

以上より、荷役稼働率の算出に等価進行波高を用いても、防波堤延伸の効果は評価できており、定性的に長周期波対策の効果を判断することは可能であると考えられる。しかし、荷役稼働率の定量的な評価は難しく、荷役稼働率の値の議論をする場合には、船体動揺量を指標とした荷役稼働率の算定を行う必要があると考える。

また、船体動揺量を評価指標とし荷役稼働率を算出する手法は、防波堤の延伸による長周期波対策以外にも、係留索や防舷材の変更、長周期波消波構造物の設置の効果も評価することが可能であり、総合的な長周期波対策を検討する上で有効な手法と考えられる。

表-9 防波堤を延伸した際の荷役稼働率の比率
(船体動揺量による荷役稼働率より算出)

検討地点	T-1 (A-1)	T-2	T-3
P1	0.94	0.96	0.97
P2	0.85	0.89	0.93

表-10 防波堤を延伸した際の荷役稼働率の比率
(等価進行波高による荷役稼働率より算出)

検討地点	T-1 (C-2)	T-2	T-3
P1	0.86	0.90	0.93
P2	0.97	0.98	0.99

5. まとめ

荷役稼働率算定における評価指標やその許容値の違いによる荷役稼働率の算定結果への影響を検討し、荷役稼働率算定手法の違いを明らかにした。さらに、防波堤延伸によるハード対策を例として、異なる評価指標により、長周期波対策効果の試算を行った。その結果は次の通りである。

- ①荷役稼働率を評価する際、長周期波を考慮する場合は、考慮しない場合に比べて、荷役稼働率は小さい値となる。
- ②長周期波高を評価指標とした荷役稼働率は、波高の算定方法や荷役限界波高の設定により、値が大きく異なる。マニュアル¹⁾に明確な長周期波の荷

役限界波高が示されていない背景から考えても、波高の算定方法の選択や長周期波の荷役限界波高の設定は慎重に行う必要がある。

- ③長周期波対策の効果評価であれば、波高を指標とした荷役稼働率を用いることは可能である。しかし、荷役稼働率の定量的な評価は難しく、荷役稼働率の値を議論する場合には、船体動揺量を指標とした荷役稼働率の算定を行う必要があると考える。

本研究では、複数の評価手法による荷役稼働率の違いを相対的に評価した。しかし、求めた荷役稼働率と現地の荷役稼働率との詳細な比較を行うまで至っていない。実際に稼働率を検討する場合には、それぞれの手法について精度や適応性を考慮し、現地の実地の稼働状況も参照し、適切な条件で各手法を用いることが望ましい。

謝辞：本研究を行なうにあたり、助言を頂いた茨城県港湾振興監 松原裕氏に深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) (財)沿岸技術センター：港内長周期波影響評価マニュアル，2004.
- 2) 中山晋一・森屋陽一・関本恒浩：港内係留船舶の水平面運動発達機構とその推定精度向上，海岸工学論文集，第47巻，pp.856-860，2000.
- 3) Madsen,P.A.,R.Murray and O.R.Sorensen：A new form of the Boussinesq equation with improved linear dispersion characteristics, Part 1, A slowly-varying bathymetry, Coastal Eng., Vol.15, pp.371-388,1991.
- 4) 中畑禎・落合敏浩・柏原裕彦・花山格章・森屋陽一・関本恒浩：冬期日本海の現地観測に基づく浅海域への入射長周期波の評価，海岸工学論文集，第48巻，pp.256-260，2001.
- 5) Sand, S. E.：Long waves in directional seas, Coastal Eng., Vol.6, pp.195-208, 1982.
- 6) 久保雅義・斉藤勝彦・下田直克・岡本俊策：岸壁前面係留浮体の不規則波による船体動揺の時系列解析について，海岸工学論文集，第35巻，pp.687-691，1988.
- 7) 上田茂・白石悟・大島弘之・朝野恒平：係留船舶の動揺に基づく荷役限界波高の提案および稼働率，海岸工学論文集，第43巻，pp.916-920，1994.
- 8) (社)日本港湾協会：港湾施設の技術上の基準・同解説，1999