

# 係岸船舶の動揺に基づく荷役許容波高の提案及び稼働率

上田 茂\*・白石 悟\*\*・大島弘之\*\*\*・浅野恒平\*\*\*

## 1. まえがき

港湾施設の技術上の基準・同解説(1989)(以下、技術基準)では、『停泊又は係留の用に供される泊地であって、係岸前面のものにあつては、年間を通じ95~97.5%以上の停泊又は係留日数を可能とする静穏度を確保することを原則とする。』と記述されており、対象船舶の船種、船型、荷役方式によっても異なるが、荷役限界波高(有義波高,以下本論文では、波高は有義波高を指す。)は、小型船においては0.3m,中・大型船においては0.5m,超大型船においては0.7~1.5mとされている。このように技術基準においては、泊地の静穏度は波高に基づいて規定される。しかしながら、係岸に係留される船舶の動揺は、船舶の諸元、波浪、風、係岸の構造、防衝工、係留索等の諸量の関数であるので、係岸における荷役の可否は、それらの条件を考慮して評価するのがより合理的である。実際に、外洋性港湾の一部においては、係岸前面の波高が前述の波高以下であっても係留船舶の動揺により荷役に支障をきたしている事例がみられる。

Ueda(1987)は、係留船舶の動揺を考慮して荷役の稼働率を評価する手法を提案した。図-1は荷役の稼働率の計算手順を示したものであり、係留船舶の動揺数値シミュレーション結果に基づき、荷役の可否によって規定される係留船舶の荷役許容動揺量を用いて、船種、船型、波向、波周期別に荷役許容波高を求め、これと波高と周期の結合頻度分布とから荷役の稼働率を計算する。

また、Ueda・Shiraishi(1988)は荷役の中断事例を調査し、これらの事例について行った係留船舶の動揺数値シミュレーションに基づいて荷役許容動揺量を提案した。しかし、荷役許容動揺量に基づいて稼働率を求めるには、個々のバースにおいて対象船舶ごとに膨大な計算をしなければならないため、港湾計画に極めて煩雑となる。そこで、本論文では、船種、船型ごとに、波向、波周期、波高を変えて係留船舶の動揺数値シミュレーション

を行い、その結果に基づいて荷役許容波高を提案する。また、提案した荷役許容波高に基づく港湾の稼働率の計算例を示す(上田他,1994)。

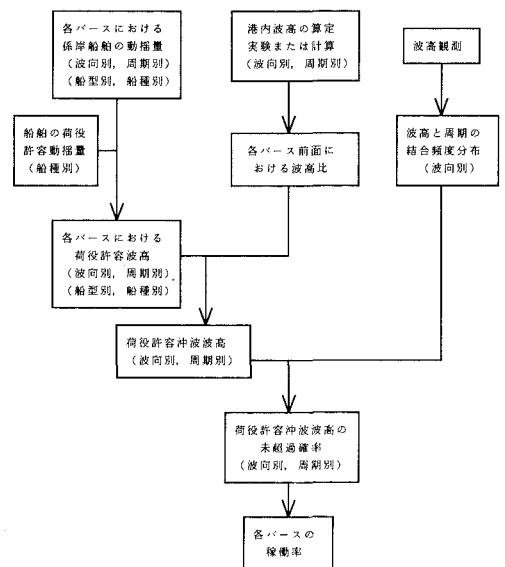


図-1 係留船舶の動揺を考慮した稼働率の計算手順

## 2. 荷役許容波高の算定方法

### 2.1 荷役許容波高の算定手順

以下の手順に従い荷役許容波高を求める。

- ① 船種、船型ごとに、波浪条件(波向、波高、波周期)、係留条件(係留索、防舷材)などを変えて係留船舶の動揺シミュレーションを行う。計算結果は係留船舶の動揺量及び防舷材の変位の統計処理を行い、最大値・最小値を求める。動揺にはドリフト成分があるので、動揺の平均値からの最大値・最小値の振幅を求める。ただし、スウェイは係岸から離れる量が荷役の可否に影響するので、離れる量の最大値(動揺の原点からの振幅)を求める。
- ② 数値シミュレーションを行って求めた動揺量について、動揺成分別に、波高と動揺量の振幅の絶対値の最

\* 正会員 工 博 鳥取大学教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 博(工) 運輸省港湾技術研究所 構造部 海洋構造研究室長

\*\*\* 東洋建設株式会社

表-1 荷役許容動揺量の提案値

船種	サージ (m)	スウェイ (m)	ヒープ (m)	ロール (°)	ピッチ (°)	ヨウ (°)
一般貨物船*	±1.0	+0.75	±0.5	±2.5	±1.0	±1.5
穀物運搬船*	±1.0	+0.5	±0.5	±1.0	±1.0	±1.0
鉱石運搬船*	±1.0	+1.0	±0.5	±3.0	±1.0	±1.0
油槽船(外航)*	±1.0	+0.75	±0.5	±4.0	±2.0	±2.0
油槽船(内航)*	±1.5	+0.75	±0.5	±3.0	±1.5	±1.5
コンテナ船** (LO/LO)	±0.5	+0.3	±0.3	—	—	—
コンテナ船** (RO/RO-Side)	±0.3	+0.2	±0.1	—	—	—
自動車運搬船**	±0.3	+0.2	±0.1	—	—	—

(注) \* Ueda・Shiraishi (1988) の提案値

\*\* Bruun (1981a 及び 1981b) の提案値

大値の関係を求める。すなわち、波高と各動揺成分の最大値との回帰式を求める。

- ③ ②で求めた回帰式を用いて、動揺成分ごとに船舶の動揺が荷役許容動揺量以下となる波高、すなわち、動揺成分別の荷役許容波高を求める。また、同様に防舷材の最大変位が許容変位を越えない波高を求める。係留船舶の荷役許容動揺量としては、表-1 に示す値を用いる。このうち、一般貨物船、油槽船(内航及び外航)、穀物運搬船、鉱石運搬船については Ueda・Shiraishi (1988) による提案値、その他の船種については、Bruun (1981a 及び 1981b) の提案値である。表中の一は、荷役許容動揺量の値が提案されていないことを示す。また、自動車運搬船については、コンテナ船(RO/RO-Side) と同等とした。

- ④ 動揺成分別及び防舷材の最大変位から求められる荷役許容波高の最小値をもって当該条件における荷役許容波高とする。ただし、この値が現行の技術基準の荷役限界波高を越える波高については、技術基準の荷役限界波高を荷役許容波高とする。

2.2 数値シミュレーションの条件

図-2 は動揺数値シミュレーションにおける座標系と波向、風向を示したものである。

なお、動揺シミュレーションを効率良く行なうため、あらかじめ荷役状態、風条件などが荷役許容波高に及ぼす影響を検討し、計算条件を整理した(白石他, 1994)。

a) 船舶の条件

i) 船種・船型

本論文で対象とした船舶は、一般貨物船、タンカー、コンテナ船(LO/LO)、コンテナ船(RO/RO-Side)、自動車運搬船、穀物運搬船、鉱石運搬船である。表-2 は、それぞれの船種について荷役許容波高の検討を行った船型を示す。

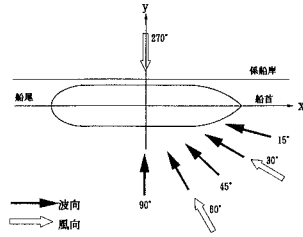


図-2 座標系, 風向及び波向の定義

表-2 検討した船型の一覧表

船種	船型 (×10 <sup>3</sup> ) (DWT または GRT)												
	1	3	5	10	20	30	40	50	60	100		150	200
一般貨物船	○	○	○	○		○		○		○	○		DWT
タンカー	○	○	○	○		○		○		○	○	○	DWT
コンテナ船					○	○	○						DWT
自動車運搬船	○	○	○	○	○								GRT
穀物運搬船					○	○	○		○	○			DWT
鉱石運搬船				○	○	○		○		○			DWT

一般貨物船(10,000 DWT・波向45°)

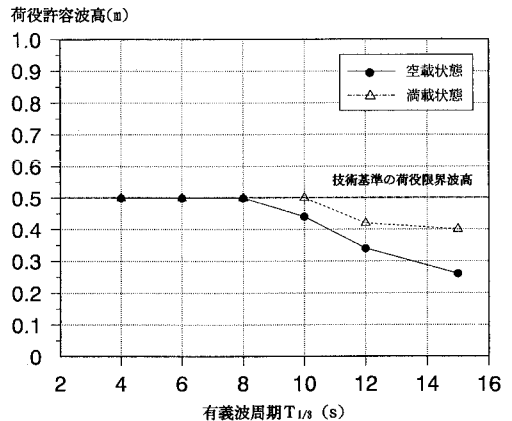


図-3 荷役状態による荷役許容波高の相違

ii) 荷役状態

図-3 は、一般貨物船(10,000 DWT、波向 45°)の空載状態及び満載状態における荷役許容波高を比較したものである。荷役許容波高は満載時よりも空載時の方が小さくなるので、動揺数値シミュレーションにおける船舶の荷役状態は空載状態とした。

b) 波浪条件

波向は 15°, 30°, 45°, 60°とした。また、有義波周期(以下、単に波周期と記す)は、4, 6, 8, 10, 12, 15sとした。波高は 0.1~0.7m の範囲で計算しているが、超大型船(100,000 DWT 以上)については技術基準の荷役限界

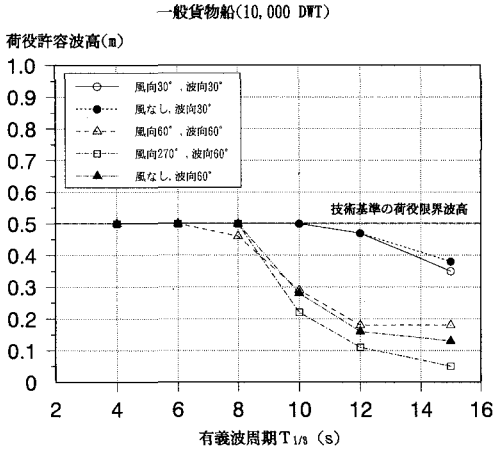


図-4 風速・風向が荷役許容波高に及ぼす影響

波高が0.7m~1.5mであるため、波高1.0m, 1.5m, 2.0mについても計算を行った。

c) 風の条件

係留船舶の動揺には風向及び風速が影響する。図-4は、一般貨物船(10,000 DWT, 空載状態)について波向30°及び60°の条件について風の条件の相違による荷役許容波高を示したものである。波向30°の場合には、平均風速10 m/s, 風向30°と無風状態とについて比較したが、両者の差異は小さい。また、波向60°では、平均風速10 m/s, 風向60°よりも無風状態の荷役許容波高は小さい。これに対して平均風速10 m/s, 風向270°の荷役許容波高は、無風状態及び平均風速10 m/s, 風向60°の条件の場合よりも小さい。風向270°は船舶を係船岸から離す方向に風が作用する条件であり、係留船舶の動揺に対しては風の影響が卓越しており、係船岸から離れるスウェイの動揺量によって荷役許容波高が決まる。この場合には仮に防波堤を整備し港内の波高を低減させても稼働率はあまり向上しないことになる。したがって、荷役許容波高の算定においては、船舶を係船岸に押しつける風向のみを考えることとする。また、図-4に示すように、風の影響はそれ程大きくないことから、風の条件としては無風状態として動揺数値シミュレーションを行うものとする。

d) 係船岸の構造

係船岸の構造は直立岸壁として、係船岸の反射率を0.9とした。ただし、タンカーの100,000 DWT~200,000 DWTについてはドルフィン構造として反射率を0.0とした。

e) 防衛工

我が国で製造されているゴム防舷材を検討の対象にした。防衛工は港湾技研資料 No. 729 (上田・白石, 1992) に示した方法で選定した。係留船舶の動揺量は防衛工の

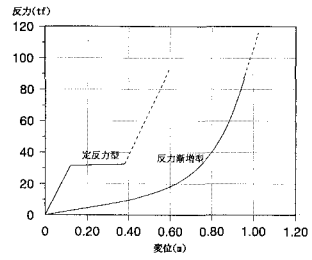


図-5 防衛工の変位復元力特性

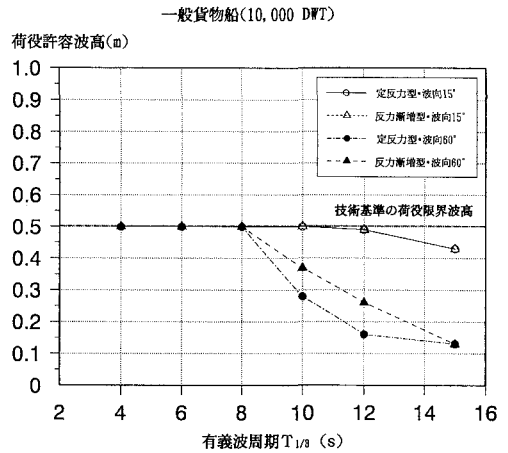


図-6 防衛工の特性が荷役許容波高に及ぼす影響

変位復元力特性により異なるが、ここでは、一般貨物船(10,000 DWT, 空載状態)について、定反力型と反力漸増型の防衛工を用いた場合の動揺量を比較し、計算条件を決定する。図-5は計算に用いた防衛工の変位復元力特性である。

図-6は一般貨物船(10,000 DWT, 空載状態)について防衛工の変位復元力特性の相違による荷役許容波高を示したものである。波向15°の場合には防衛工の変位復元力特性の相違による荷役許容波高の差異はない。波向60°の場合には、長周期波側で定反力型の防衛工の場合に荷役許容波高は小さくなる。したがって、定反力型の方が、荷役許容波高を小さく与えるので、これを用いて荷役許容波高の計算を行う。

f) 係留索

係留索及び係留方法は各船型ごとに同一とした。ただし、係留索の初期張力は切断荷重の7%相当とした。

3. 荷役許容波高の算定及び提案

3.1 荷役許容波高の算定及び考察

図-7は、一般貨物船の10,000 dwt 船型について求めた荷役許容波高を示したものである。図では、波向15°、

30°, 45°, 60°に対する計算結果を●, ○, △, □で示している。また、図中の二点鎖線は、技術基準の荷役限界波高を示すものであり、本論文で提案する荷役許容波高の上限とした。

図-7において、まず同一の波向において波周期に対する荷役許容波高の変化をみると、波周期が長くなるほど、荷役許容波高は小さくなる。これは長周期波側になるほど係留船舶の動揺量が大きくなるためである。また、同一波周期について比べると、船舶に対して船側方向から波が入射するほど荷役許容波高は小さくなる。これは、波向が90°に近づくにしたがって、スウェイ、ロールの動揺量が大きくなるためである。

次に、船舶の船型と荷役許容波高の関係を調べる。図-8は、一般貨物船について波向45°、波周期10sの条件で各船型と荷役許容波高の関係を示したものである。

表-3 一般貨物船の荷役許容波高の提案値

船型	波向(°)	波周期(s)					
		4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	15.0
1,000 DWT	15	0.50	0.35	0.25	0.20	0.10	0.00
	30	0.50	0.30	0.20	0.15	0.10	0.00
	45	0.50	0.30	0.10	0.10	0.10	0.00
3,000 DWT	15	0.50	0.50	0.45	0.30	0.30	0.20
	30	0.50	0.50	0.40	0.20	0.20	0.20
	45	0.50	0.50	0.25	0.10	0.10	0.15
5,000 DWT	15	0.50	0.50	0.50	0.45	0.35	0.30
	30	0.50	0.50	0.50	0.40	0.25	0.25
	45	0.50	0.50	0.50	0.25	0.20	0.15
10,000 DWT	15	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.40
	30	0.50	0.50	0.50	0.50	0.45	0.40
	45	0.50	0.50	0.50	0.45	0.35	0.25
30,000 DWT	15	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	30	0.50	0.50	0.50	0.50	0.45	0.25
	45	0.50	0.50	0.50	0.50	0.45	0.25
50,000 DWT	15	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	30	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	45	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.35
100,000 DWT	15	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.15
	30	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.05
	45	1.50	1.50	1.50	1.15	0.80	0.40
150,000 DWT	15	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	0.90
	30	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	0.75
	45	1.50	1.50	1.50	1.30	0.90	0.40
	60	1.50	1.50	1.50	0.65	0.45	0.10

(単位：m)

同一波浪条件では船型が大きくなるにしたがって荷役許容波高は大きくなる。これは、大型船になるにしたがって係留船舶の動揺量が小さくなるためである。

3.2 荷役許容波高の提案

3.1で計算した荷役許容波高(単位：m)の小数点以下2桁を2捨3入または7捨8入し、0.05mごとに整理し、船種・船型別の荷役許容波高を提案する。表-3は、一般貨物船の船型別の荷役許容波高の提案値である。他の船型についても同様に提案している(上田他, 1994)。

4. 荷役許容波高に基づく稼働率の計算

4.1 計算条件

係留船舶の動揺を考慮した稼働率については、Ueda(1987)が計算例を示しているが、その際の計算では荷役許容波高が厳密に設定されていなかったため、本論文では荷役許容波高の提案値を用いて検討を行う。

計算においては、外洋性の港湾(A港)の波向別の港外波の波高と周期の結合分布表を用いる。港湾に入射する波向は、4方向(E, ESE, SE, SSE)である。表-4は、A港の港内静穏度模型実験に基づいて求めた防波堤の整備前及び整備後のP2, P3, Tのバースの港外波に対する波高比を波向別に示したものである。また、表-5は、船種、船型、波向の条件を示したものである。

一般貨物船(10,000 DWT)

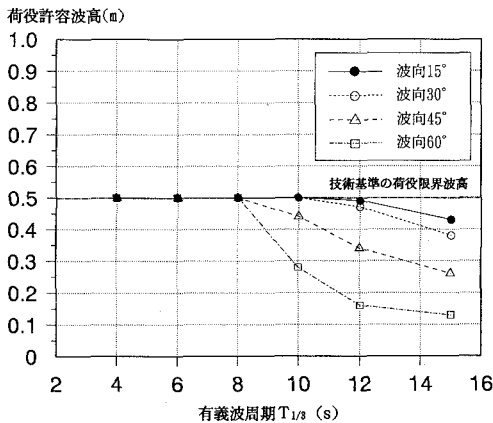


図-7 荷役許容波高(一般貨物船, 10,000 DWT)

一般貨物船(波向45°・波周期10s)

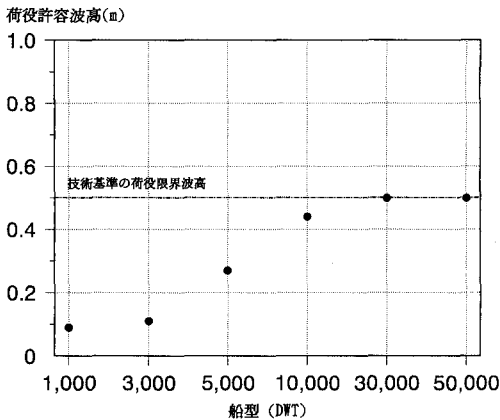


図-8 船型と荷役許容波高の関係

表-4 各バースにおける波高比

条件 バース名	防波堤整備前				防波堤整備後			
	波 向				波 向			
	E	ESE	SE	SSE	E	ESE	SE	SSE
P 2	0.26	0.66	0.21	0.25	0.23	0.16	0.10	0.15
P 3	0.17	0.34	0.15	0.16	0.17	0.10	0.12	0.09
T	0.33	0.68	0.22	0.22	0.30	0.35	0.18	0.17

表-5 稼働率の計算条件

バース名	船 種	船 型	波 向
P 2	タンカー	5,000 DWT	60°
P 3	タンカー	3,000 DWT	45°
T	一般貨物船	30,000 DWT	60°

4.2 稼働率の計算結果

表-6 は、荷役許容波高の提案値を用いて求めた稼働率の計算結果を示したものである。また、現行の技術基準の値による稼働率の計算結果についても併記している。

本論文の荷役許容波高の提案値を用いた荷役の稼働率は、長周期波の作用する外洋性の港湾では、現行の技術基準の方法による稼働率よりも低下する。防波堤の整備前についてP2バースにおける稼働率は、船舶の動揺量を考慮した荷役許容波高に基づくものは65.9%であるのに対して、従来の方法では80.8%である。以下、同様にP3バースではそれぞれ89.9%、97.5%、Tバースではそれぞれ63.8%、78.8%である。また、防波堤の整備後についてP2バースにおける稼働率は、船舶の動揺量を考慮した荷役許容波高に基づくものは96.1%であるのに対して、従来の方法では99.5%である。以下、同様にP3バースではそれぞれ98.1%、99.3%、Tバースではそれぞれ82.7%、96.3%である。

以上より、著者の一人がすでに示しているように、長周期波の作用する外洋性の港湾においては、長周期波の作用による係留船舶の動揺を考慮して稼働率を求めると従来の方法による値よりも小さくなる。

5. 結 論

本論文における主要な結論は以下のとおりである。

- 1) 一般貨物船、タンカー、コンテナ船(LO/LO)、コンテナ船(RO/RO-Side)、自動車運搬船、穀物運搬船、

表-6 稼働率の計算結果

計算条件 バース名	防波堤整備前		防波堤整備後	
	現行技術基準 (荷役限界波高)	提案値 (荷役許容波高)	現行技術基準 (荷役限界波高)	提案値 (荷役許容波高)
P 2	80.8%	65.9%	99.5%	96.1%
P 3	97.5%	89.9%	99.3%	98.1%
T	78.8%	63.8%	96.3%	82.7%

鉱石運搬船について荷役許容波高を提案した。

- 2) 荷役許容波高は、波周期が長周期波側になるにしたがって小さくなる。
- 3) 同一波周期において荷役許容波高は船舶に作用する波向が90°に近づくにしたがって小さくなる。
- 4) 同一波向、同一波周期については、船型が大型になるほど、荷役許容波高が大きくなる。
- 5) 荷役許容波高の提案値に基づいて、荷役の稼働率を計算した。荷役の稼働率は、従来から指摘されているように長周期波の作用する外洋性の港湾では、現行の技術基準による計算値よりも低下する。

6. あとがき

本論文では、係岸船舶の動揺を考慮した荷役許容波高を提案した。今後は、本提案による荷役許容波高を用いて荷役の稼働率を計算し、港湾計画に反映させることにより、我が国の港湾整備水準がより一層向上することを期待する。

参 考 文 献

上田 茂, 白石 悟 (1992): 係岸船舶の動揺に基づく防衝工の設計について, 港湾技研資料, No. 729, 55p.  
 上田 茂他 (1994): 係岸船舶の動揺に基づく荷役許容波高及び稼働率, 港湾技研資料, No. 779.  
 白石 悟他 (1994): 係岸船舶の荷役許容波高に及ぼす各種要因の影響の検討, 土木学会第49回年次講演会  
 日本港湾協会 (1989): 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (改訂版), 下巻, p. 12.  
 Bruun, P. (1981a): Port Engineering, 3rd Edition, Gulf Publishing, pp. 350-351.  
 Bruun, P. (1981b): Breakwater or Mooring System?, The Dock and Harbour Authority, Vol. 62, No. 730, pp. 126-129.  
 Ueda, S. (1987): Motions of moored ships and their effect on wharf operation efficiency, Report of Port and Harbour Res. Inst., Vol. 26, No. 5, pp. 319-373.  
 Ueda, S. and S. Shiraisi (1988): The allowable ship motions for cargo handling at wharves, Report of Port and Harbour Res. Inst., Vol. 27, No. 4, pp. 3-61.