

動揺計算による係留船舶の長周期波荷役限界波高の評価

Estimation by numerical simulation of allowable wave height for cargo handling due to long-period waves in a port

北海道工業大学工学部社会基盤工学科 正員 白石 悟 (Satoru Shiraiishi)

1. はじめに

従来は港内静穏度の計算で用いられる限界波高は、そのまま荷役限界波高として取り扱われ、港内静穏度＝荷役稼働率として評価されてきた。しかしながら近年は係留船舶の動揺量を考慮して荷役稼働率が評価されるようになりつつある。荷役稼働率の評価には風波やうねりなどの通常波浪成分に対するものと長周期波に対するものがある。このうち長周期波に対する影響については、船舶の荷役障害記録に基づいて荷役限界波高を調査した事例はあるものの、長周期波に対する荷役限界波高は、通常波浪成分に対する数値(上田ら¹⁾)のようには詳細には検討されていない。これは、係留船舶の固有周期や長周期波の卓越周期帯によって係留船舶の動揺特性が大きく異なることから、荷役限界波高を一律に定めることが困難であることによる。

港湾の荷役稼働率の計算方法は「港湾の技術上の基準・同解説(以下、技術基準)」²⁾に示されている。この中で長周期波に対する荷役限界波高は表-1 のように設定されている。

表-1 長周期波に対する荷役限界波高

長周期波の有義波高のレベル	想定される条件	荷役限界波高(m)
1	サージングについて荷役許容動揺量が比較的大きな船種又はサージングの固有周期が1.5min以下の船舶(中型船:1,000～5,000DWT)	0.20
2	サージングについて荷役許容動揺量が中程度の船種及びサージングの固有周期が1.5min以下の船舶(一般貨物船:5,000～10,000DWT)	0.15
3	サージングについて荷役許容動揺量が小さな船種及びサージングの固有周期が2～3minの船舶(コンテナ船、鉱石船等:10,000～70,000DWT)	0.10

表-1 では、船種・船型別の条件や波向の影響が明確でないことから長周期波に対する荷役稼働率について、より詳細な評価をするためには、より細かな荷役限界波高の数値

を設定しておく必要がある。本研究では、さまざまな船種に対して長周期波に対する動揺計算を行って、荷役限界波高を検討することとした。このうち本論文では、一般貨物船、鉱石運搬船に関する計算結果を報告する。

2. 検討の手順

荷役稼働率の計算方法は「港内長周期波影響評価マニュアル³⁾(以下、マニュアル)」に示されている。荷役稼働率の算定法としては標準解析法と詳細解析法とがあるが、本研究では詳細解析法の手順を用いて、一般貨物船、鉱石運搬船に対して長周期波に対する動揺計算を行って、長周期波荷役限界波高を求めることとした。その際に、マニュアルに示されているUeda・Shiraiishi⁴⁾による荷役許容動揺量の提案値を用いた。表-2は一般貨物船と鉱石運搬船に対する荷役許容動揺量を示す。

表-2 荷役許容動揺量

動揺成分	一般貨物船	鉱石運搬船
SURGE (m)	± 1.0	± 1.0
SWAY (m)	+ 0.75	+ 1.0
HEAVE (m)	± 0.5	± 0.5
ROLL (°)	± 2.5	± 3.0
PITCH (°)	± 1.0	± 1.0
YAW (°)	± 1.5	± 1.0

注)SWAY は係船岸から離れる方向の量を示す。

本研究における長周期波荷役限界波高の計算手順を以下に示す。

①表-3に示す船種・船型に対して動揺計算を行う。その際の長周期波高(有義波高)は0.05、0.10、0.15mとする。基本計算ケースにおける係留索はナイロンエイトロープとし、初期張力は破断荷重の7%とする。また、防舷材は接岸速度を0.1m/sとして技術基準の方法で選定した定反力型防舷材とする。長周期波のスペクトルは与えた周期の範囲でエネルギー密度が一樣なもの(一様スペクトル)とする。

表-3 検討対象の船種・船型

船種	船型(DWT)
一般貨物船	1000、3000、5000、10000、30000、50000、100000、150000
鉱石運搬船	10000、30000、50000、55000、100000、150000

②各ケースごとの動揺計算より動揺6成分(SURGE, SWAY, HEAVE, ROLL, PITCH, YAW)の各動揺量の最大値と最

小値を求める。求めた動揺量の最大値と最小値より、SURGE については全振幅の 1/2 を、SWAY は係船岸から離れる値（ここでは最小値）、HEAVE, ROLL, PITCH, YAW は最大値と最小値のうち絶対値の大きい値をそれぞれ求め、それらと長周期波高の関係について最小二乗法によって比例係数を求め、表-2に示した荷役許容動揺量を用いて長周期波荷役限界波高を求める。

動揺計算における流体力係数の設定方法については、一定係数法と遅延関数法とがあり、後者の方がより精度が高いが、流体力係数を適切に与えれば、長周期動揺の主たる成分のSURGEに対しては両者の計算値の相違は大きくない（白石ら⁵⁾）ことから、本研究では取り扱いのより簡便な一定係数法を用いた。その際のSURGEに対する減衰係数は久保ら⁶⁾による実船観測の結果を参考に設定した。

3. 長周期波スペクトルの影響の検討

長周期波に対する係留船舶の動揺は、主として周期 2～3min の成分が支配的である。また、マニュアルにも長周期波に対する荷役稼働率評価の際の長周期波の周期成分を 30～300s と定義していることから本研究においても 30～300s として与えている。しかしながら、長周期波のスペクトルの周波数帯の与え方による影響を確認するために、30～300s に加えて 30～450s、30～600s と変化させて計算を行った。

表-4は波向 0°について長周期波荷役限界波高を示す。これらの数値は、SURGE のみから長周期波荷役限界波高を求めたものであるが、(SURGE, SWAY, HEAVE, ROLL, PITCH, YAW)のすべての最小波高より求めた荷役限界波高と一致しており、表に示す事例においては、長周期波荷役限界波高は SURGE によって決まっている。また、表に示すように、長周期波スペクトルの周期の範囲の相違が長周期波荷役限界波高に及ぼす影響はここで与えた 3 つの条件相互の間で大きくないことがわかる。

表-4 長周期波スペクトルの周期範囲と
長周期波荷役限界波高の関係(波向 0°)

船種・船型	波スペクトルの周期範囲(s)		
	30～300	30～450	30～600
一般貨物船 10000DWT	0.082	0.088	0.092
一般貨物船 50000DWT	0.076	0.086	0.074
鉱石運搬船 30000DWT	0.083	0.078	0.076
鉱石運搬船 100000DWT	0.100	0.098	0.102

(単位:m)

4. 係留索の特性の影響の検討

4.1 初期張力の影響

係留索としてナイロンエイトロープを用い、初期張力の影響について調べた。初期張力については破断荷重の比として与えており、例えば7%とは、破断荷重の 7% の値を初期張力として与えて計算していることを意味する。初期張力を 0%、3.5%、7%の各条件に対して動揺計算を行い、長周期波荷役限界波高を求めた。

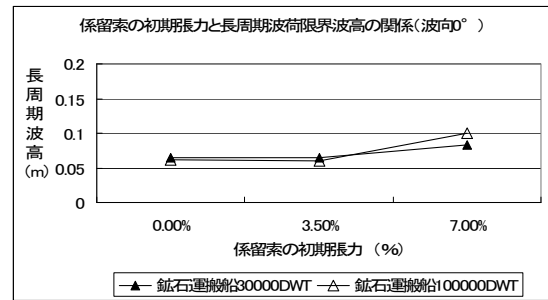


図-1 係留索の初期張力と長周期波荷役限界波高の関係

図-1は横軸に係留索の初期張力の破断荷重に対する比を、縦軸に長周期波荷役限界波高をとり両者の関係を示している。図-1より、初期張力を大きくとることにより長周期波荷役限界波高が大きくなることがわかる。すなわち、係留索の初期張力を大きくすることは長周期波に対して動揺抑制効果がある。

4.2 係留索の材質の影響

係留索としてはナイロンエイトロープを用いて一連の動揺計算を行うこととしたが、より剛性の大きなポリプロモノエイトロープ、キョーレックスエイトロープに対する計算を行って比較した。図-2は一般貨物船 10000DWT、50000DWT、鉱石運搬船 30000DWT、100000DWT について波向 0°に対する長周期波荷役限界波高を示す。一般貨物船 10000DWT に対しては、係留索の剛性が大きくなるにつれて長周期波荷役限界波高が大きくなることがわかる。

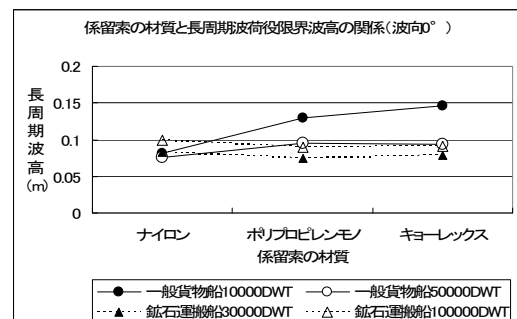


図-2 係留索の材質と長周期波荷役限界波高の関係

表-5 係留索の材質とSURGEの固有周期の関係

船種・船型	係留索の材質		
	ナイロン	ポリプロモノ	キョーレックス
一般貨物船 10000DWT	71.1	53.3	49.2
一般貨物船 50000DWT	139.3	106.4	100.4
鉱石運搬船 30000DWT	113.9	85.1	81.3
鉱石運搬船 100000DWT	175.6	138.3	135.3

(単位:s)

表-5は各条件に対するSURGEの固有周期を示している。ナイロン、ポリプロモノ、キョーレックスの順に係留索の剛性が大きくなるので、SURGEの固有周期が短くなっている。

ことがわかる。一般貨物船 10000DWT について係留索の材質が硬くなるにつれて長周期波荷役限界波高が大きくなるのは SURGE の固有周期が大幅に短周期側に変化している効果と考えられる。

5. 船型と波向の影響の検討

長周期波荷役限界波高の設定にもっとも影響を及ぼすと考えられる船型と波向の影響を考察する。長周期波スペクトルとしては、周期 30～300s の一様スペクトル、係留索の特性としてはナイロンエイトロープ(初期張力 7%)として計算を行っている。

表－6は、一般貨物船について船型・波向別の長周期波荷役限界波高を示す。表では、上段が SURGE の動揺量のみを考慮した荷役限界波高を、下段はすべての動揺成分を考慮した荷役限界波高を示している。SURGE 以外の成分で長周期波荷役限界波高が小さくなるのは 1000DWT のときと波向 60° のときである。これらの条件では、主として SWAY により長周期波荷役限界波高が最小となる。図－3 は船型・波向と長周期波荷役限界波高の関係を示したものである。ただし、SURGE の動揺量のみを考慮した長周期波荷役限界波高を示している。

波向 0°, 15°, 30°, 45°, 60° の計算結果を比較すると、長周期波荷役限界波高は波向 0° では波向 60° に対するよりも約半分になっていることがわかる。一方、波向 0°, 15°, 30° に対する長周期波荷役限界波高の相違は小さい。また、船型の影響については 10000DWT 以下の中型船では 30000DWT 以上の大型船よりも長周期波荷役限界波高が大きいことがわかる。

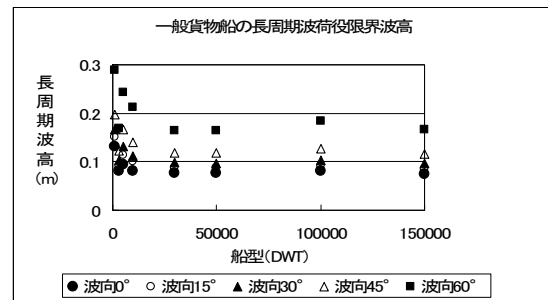
表－7は、鉱石運搬船について船型・波向別の長周期波荷役限界波高を示す。また、図－4は船型・波向と長周期波荷役限界波高の関係を示したものである。ただし、図－3と同様に SURGE の動揺量のみを考慮した長周期波荷役限界波高を示している。

表－6 一般貨物船の長周期波荷役限界波高 単位(m)

船型 (DWT)	波向(°)				
	0	15	30	45	60
1000	0.131	0.152	0.167	0.198	0.290
	0.057	0.061	0.065	0.067	0.070
3000	0.081	0.092	0.102	0.123	0.169
					0.160
5000	0.095	0.113	0.131	0.166	0.244
				0.155	0.170
10000	0.082	0.100	0.111	0.141	0.213
					0.178
30000	0.076	0.088	0.098	0.119	0.165
50000	0.076	0.087	0.097	0.118	0.165
100000	0.080	0.093	0.104	0.128	0.184
					0.137
150000	0.074	0.086	0.096	0.116	0.166
					0.077

注) 下段はすべての動揺成分を考慮したときの荷役限界波高

鉱石運搬船の場合には、船型ごとの長周期波荷役限界波高の差はあまり大きくないことがわかる。しかし、150000DWT では、50000DWT, 100000DWT に比べて長周期波荷役限界波高がやや小さくなる傾向にある。

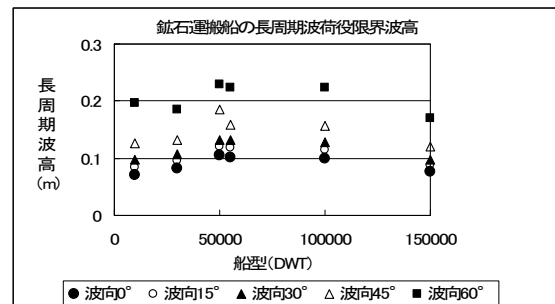


図－3 一般貨物船の長周期波荷役限界波高

表－7 鉱石運搬船の長周期波荷役限界波高 単位(m)

船型 (DWT)	波向(°)				
	0	15	30	45	60
10000	0.070	0.084	0.098	0.127	0.196
	0.052	0.053	0.051	0.050	0.046
30000	0.083	0.096	0.107	0.131	0.185
50000	0.105	0.120	0.132	0.186	0.229
55000	0.102	0.118	0.131	0.159	0.224
100000	0.100	0.115	0.128	0.157	0.223
150000	0.076	0.087	0.098	0.120	0.170
					0.132

注) 下段はすべての動揺成分を考慮したときの荷役限界波高



図－4 鉱石運搬船の長周期波荷役限界波高

6. SURGE の固有周期と長周期波荷役限界波高の関係

長周期波荷役限界波高は SURGE の固有周期と関係することからこれについて考察する。図－5は一般貨物船、鉱石運搬船について船舶の載荷重量トン(DWT)と固有周期の関係を示す。図には動揺計算結果の SURGE の時系列波形から求めた動揺有義周期も示している。動揺有義周期は 150000DWT で固有周期よりもやや短い、その他の場合には固有周期とほぼ一致している。船舶の載荷重量トン(DWT)が大きくなるに従い SURGE の固有周期が長くなっている。これは船舶の質量が大きくなるのに比べて、船舶が艀装する係留索の剛性が相対的に大きくならないためである。長周期波の卓越周期帯が 2～3min であるとする、50000～100000DWT の船舶が固有周期の点からも、もっとも

影響を受けやすいことが、この図よりわかる。

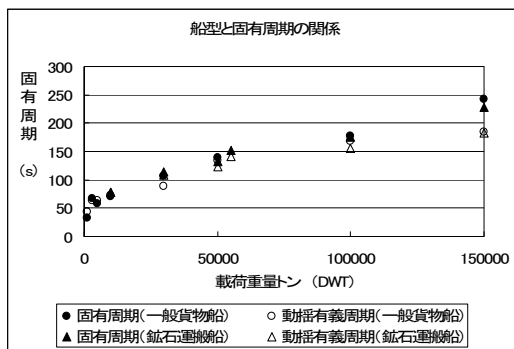


図-5 船型とSURGEの固有周期の関係

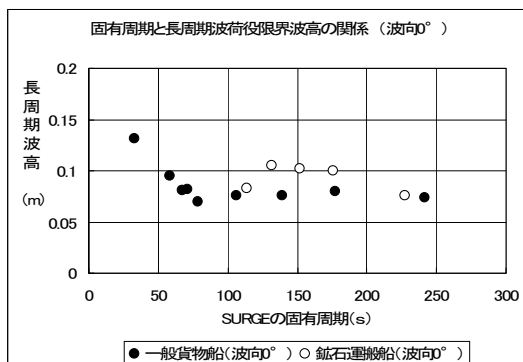


図-6 固有周期と長周期波荷役限界波高の関係 (波向 0°)

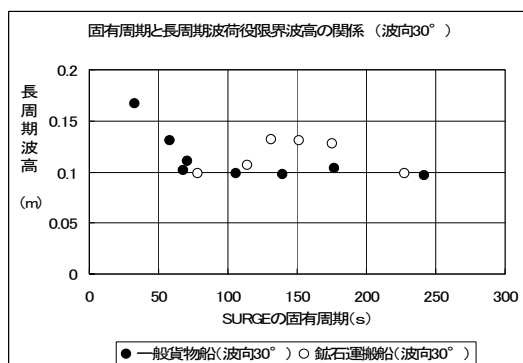


図-7 固有周期と長周期波荷役限界波高の関係 (波向 30°)

図-6、図-7は一般貨物船、鉱石運搬船について、波向 0°、30° のときの SURGE 固有周期と長周期波荷役限界波高の関係を示す。一般貨物船については、固有周期の短いときに長周期波荷役限界波高が大きくなる傾向が見られる。技術基準では長周期波の有義波高のレベル2のとき(固有周期 1.5min 以下)に荷役限界波高が 0.15m、レベル3のとき(固有周期 2~3min)に荷役限界波高が 0.20mと設定されている。波向 0°のときには、計算で得られた長周期波荷役限界波高は技術基準の数値よりもやや小さいが、波向 30°についてはおおむね一致している。

7. まとめ

技術基準では、長周期波に対する荷役限界波高が示されているが、船種・船型ごとに詳細な数値が示されていないことから、本研究では、一般貨物船、鉱石運搬船に対して動揺計算を行って長周期波荷役限界波高について考察した。以下に本研究のまとめを記す。

(1) 長周期波荷役限界波高は波向 0°の場合にもっとも小さくなり、波向が大きくなるにつれて長周期波荷役限界波高も大きくなることから係船岸位置における長周期波の波向の把握と設定は重要であるが、かりに波向に関する情報が十分に把握できない場合には波向 0°として荷役稼働率を求めれば安全側の評価となる。

(2) 長周期波スペクトルの周波数帯を変化させた計算結果の相違はあまり大きくない。

(3) 係留索の初期張力の差による長周期波荷役限界波高の差は大きい。係留索の初期張力を大きくすることは長周期波に対して動揺抑制効果大きい。

(4) 係留索の材質を変化させた計算では貨物船 10000DWTの場合に係留索の剛性が大きいときに長周期波荷役限界波高が大きくなった。このとき、SURGE の固有周期は短周期側に大きく変化している。

8. 今後の課題

本研究で得られた計算結果は、長周期波に対する荷役稼働率を計算する際の荷役限界波高を求めたものであって港湾計画を行う上での有用な情報となる。本研究では、一般貨物船と鉱石運搬船についての計算結果を示している。今後、他の船種についても計算を進める予定である。なお、長周期波のスペクトルとして一様スペクトルを与えているが、実際の港湾の長周期波は港湾特有の形状の影響を受けて一様とまらないことも多い。今後はこのようなスペクトル形状の影響も加味することによって、より詳細な長周期波荷役限界波高についての考察を加えていく必要がある。なお、本論文に示した動揺計算結果は北海道工業大学平成19年度卒業生の宮崎慧君、成田真一君の両名が卒業研究として実施したものから引用している。この場をかりて両君に謝意を表す。

参考文献

- 1) 上田茂、白石悟、大島弘之、浅野恒平:係岸船舶の動揺に基づく荷役許容動揺波高の提案および稼働率、海岸工学論文集、Vol.41、pp.916~920、1994.
- 2) (社)日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解説、pp. 181~183、2007.
- 3) (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」、pp.15~28、2004.
- 4) Ueda,S. and Shiraishi,S: The allowable ship motions for cargo handling at wharves, Report of Port and Harbour Research Institute, 27-4, pp.3~61, 1988.
- 5) 白石悟、久保雅義、榊原繁樹、笹健児:長周期船体動揺の数値計算による再現性に関する研究、海岸工学論文集、Vol.46、pp.861~865、1999.
- 6) 久保雅義、今枝彬郎、奥村宗行:長周期船体運動計測装置の試作と計測結果について、神戸商船大学紀要、第2類、第28号、pp.289~298、1980.