

長周期波に対する荷役稼働率の評価法とその改善策

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*****

1. はじめに

苫小牧東港で「底うねり」と呼称される長周期動揺は港外から侵入した港内波浪中の長周期成分に起因し、船体と係留系の固有振動モードとの共振により増幅されていることが動揺と波浪の同時観測結果（松良ら，1994；菅沼ら，1995）からほぼ確認された。

また，この長周期動揺に対する荷役限界状態を実測値に基づき長周期波高で評価するとともに年間の港外長周期波の発生頻度と港内増幅特性から被害発生岸壁の荷役障害への影響度が簡易的に示された（菅沼ら，1995）。

一方，こうした実測値による現象の解明，実態把握とともに荷役障害の未然防止，長周期動揺の抑止といった実務的な対策面からのアプローチも重要である。

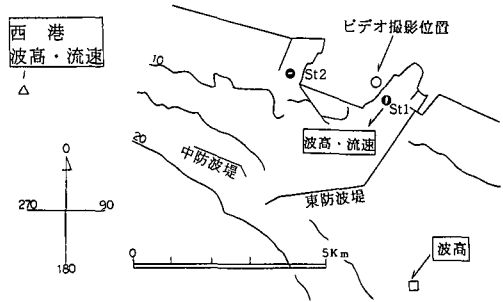
このうち，荷役障害未然防止の目安となる長周期動揺の予測については簡易ながら前回の報告で示されており（菅沼ら，1995），本論文では港湾の将来計画などへの現実的な対応をおこなう立場から対策工を検討する。まず，実測値により卓越長周期波出現時の長周期波の一般的な波浪特性を示すとともに増幅特性から将来本格的に供用が開始される係留地点における長周期動揺の可能性を検討する。

ついで，長周期動揺の抑止法として数値計算を用いて係留系の改善による動揺抑止効果を検討する。さらに，2ヶ年分の観測データと数値計算に基づく長周期波を考慮した稼働率の算定法を提案し，これにより現状を評価するとともに，防波堤の延伸等港形による対策効果を示す。

2. 卓越長周期波の一般性と増幅特性

2.1 現地観測体制

現地観測の調査位置図を図一1に示す。東港港外においては，平成5年9月～平成6年9月までは4時間毎に前半2時間，それ以降は24時間連続観測をおこなった。西港では，平成7年7月以前は毎正時の波高・波向の通年観測のみで，それ以降は24時間連続観測を実施した。着岸地点 St. 1では平成5，6年9月～12月および平成7年9月～11月に，St. 2では平成7年9月～12月にかけて連続観測をおこなった。



図一1 調査位置図

2.2 卓越長周期波出現時の波浪特性

苫小牧に到来する長周期波の特性は気象条件により異なる可能性があり，卓越長周期波出現時の波浪特性から苫小牧に到来する長周期波の一般性を検討する。図一2に苫小牧東港港外で観測された長周期波高卓越時（10，15 cm 出現時）の波高スペクトルと風，波の状況を示す。

港外の波高スペクトルの30秒以上の長周期側においては，いずれのケースも長周期波高 H_{L10} cm と15 cm のスペクトル密度はどの周波数帯でもほぼ対応し変化している。一方，短周期側においては，平成6年1月9日など強風下でピーク周期が10秒以下と短くなるのが特徴である。平成6年9月18日の場合，風は弱いにも関わらず，短周期側で10秒前後に2つのピークがみられるが，これは苫小牧近傍への台風の急接近に伴う現象と考えられる。

・正会員	工修	北海道開発局	苫小牧港湾建設事務所	第2計画課
・・		北海道開発局	苫小牧港湾建設事務所	第2計画課
・・・		北海道開発局	苫小牧港湾建設事務所	第2計画課長
.....	工修	北海道開発局	苫小牧港湾建設事務所	所長
.....	正会員	工博	北海道開発局開発土木研究所港湾研究室	副室長
.....	正会員	工博	運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室	室長
.....	正会員	工博	運輸省港湾技術研究所構造部海洋構造研究室	室長
.....	正会員	工博	鳥取大学工学部土木工学科	教授

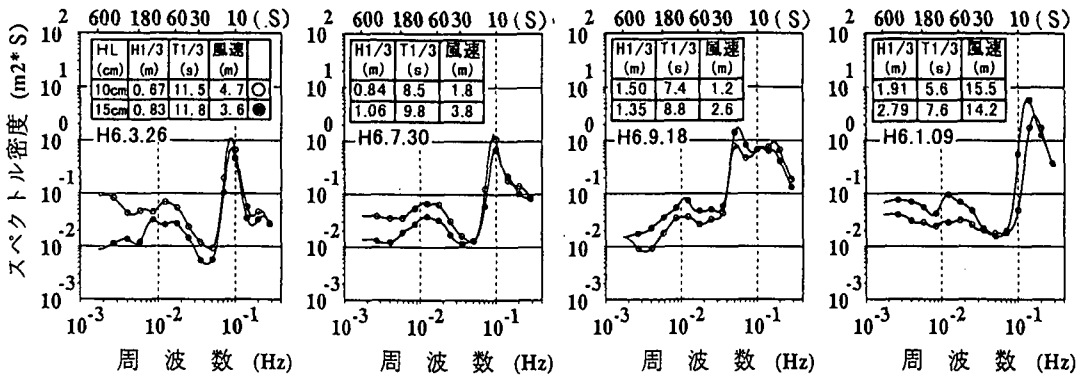


図-2 長周期波卓越時の波高スペクトル

以上より、短周期側では風などの影響をうけるため、その形状がばらついているが、長周期側ではどのケースにおいてもスペクトル形状はほぼ等しく、少なくとも長周期動揺に影響を及ぼす数分程度のレンジにおいてはほぼ同様の周期特性を持った波が苦小牧に到来していると推測される。

2.3 港内増幅特性の検討

問題としている数分程度の長周期波は、通常の周期十数秒程度までの波浪と異なり、いわゆる港内副振動の影響が顕著に現れ、周期、係留岸壁により増幅特性が大きく異なることが予想される。そこで、ここでは、港内外実測データをもとに周波数別の増幅特性を検討する。

まず、港内外波高スペクトルを30周波数の波に分離した後、個別波のエネルギーを波高に換算し、これらの平均値から周波数別増幅率 (St. 1/港外) を算定したものを図-3に示す。波向が西寄りになると増幅率が大きくなることや、動揺スペクトルピークがみられる数分程度のレンジで増幅率が大きくなっているのが特徴である。

また、今回の観測では、対象船舶及び係留条件は限定されていることから長周期波の地点別、波向別の増幅特性を簡易的に評価するため、増幅率についても昨年度にひきつづき長周期波高を用い検討する。東水路岸壁前面 (St. 1)、中央水路 (St. 2) の観測全期間の波向別平均増幅率を図-4に示す。St. 1、St. 2の波向による挙動は比較的一致しており、180°~200°のやや西寄りの波向で増幅率が大きくなるのが特徴である。これは、現況の港形は西側が大きく開いた形であるため、波向が西寄りになると西側の汀線境界で反射した波が港内に進入するためと考えられるが、図-5によると西寄りの波向の卓越長周期波の発生はほとんどみられないことから影響は大きくないと考えられる。一方、中央水路 (St. 2) については、現在、利用実績がほとんどないため問題とはなっていないが、東水路 (St. 1) に比べ1割程度増幅率が大きいことから今後の本格的供用後問題が生ずる可能性が高

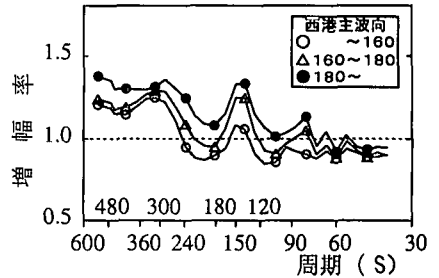


図-3 周波数別増幅率

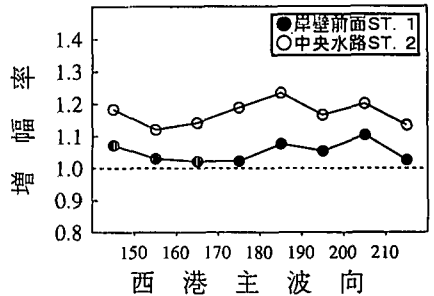


図-4 波向別増幅率

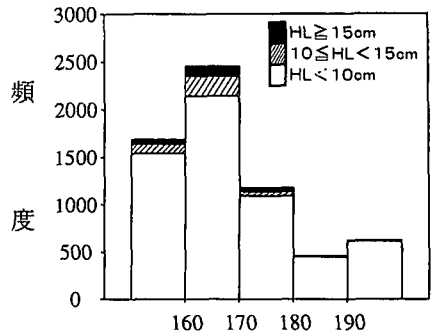


図-5 波向別出現頻度

いといえる。

3. 係留系による動揺抑止効果について

問題となっているサージング方向の長周期動揺は船体と係留系の固有振動モードと波高スペクトルの長周期成分との共振現象により増幅されていると考えられる。そこで、係留方法と係留索の材質を変更することでピーク周波数をずらし、これにより動揺量を減少させる方法とその動揺抑止効果について検討する。

検討は、実際に船体動揺が生じた平成6年9月18日のエナジーパイオニアを対象とし、表-1に示すように索数、索径、索材など係留条件を変えて『浮体動揺プログラム』によりおこなった。入力波は実際に荷役を中止した2～4時のデータをFFTにより48成分に分離したもので、入射波向は船首から170°の方向から与えた。計算結果は表-2に示すが、改善効果についての検討は、(1)式から求まる現況 case 1 を基準とした動揺量減少率と1本当たりにかかる荷重の最大値に安全率を見込んだ値と索の切断荷重の関係によりおこなった。

$$EF = (S_{C1} - S_{Cx}) / S_{C1} \times 100 \quad \cdots \cdots (1)$$

EF; 動揺量が減少する割合

S_{C1} ; CASE 1 の計算動揺量

S_{Cx} ; 対象ケースの計算動揺量

係留索の本数を現行16本から2倍(32本)、4倍(64本)にした case 2, 3 ではある程度の改善効果は期待で

表-1 係留条件

		索 種	索径	索数
現況	case 1	クレモナ	75 mm	16 本
	case 2	クレモナ	75 mm	32 本
	case 3	クレモナ	75 mm	64 本
索径	case 4	クレモナ	100 mm	16 本
	case 5	ナイロン	75 mm	16 本
索材	case 6	ワイヤ	40 mm	9 本
	case 7	ワイヤ	40 mm	16 本

表-2 計算結果

	切断荷重	伸び率	両振幅 動揺量	動揺量 減少率	荷重の 最大値
case 1	48.6 tf	26 %	2.63 m	—	3.8 tf
case 2	48.6 tf	26 %	2.28 m	13 %	4.5 tf
case 3	48.6 tf	26 %	1.87 m	29 %	3.3 tf
case 4	36.6 tf	26 %	2.25 m	14 %	3.0 tf
case 5	150.0 tf	26 %	2.22 m	16 %	3.0 tf
case 6	90.7 tf	3.5 %	1.07 m	59 %	65.6 tf
case 7	90.7 tf	3.5 %	0.81 m	69 %	67.0 tf

きる。しかし、現行の係留設備では通常備えうるビットウインチの数から20本以上の綱取りは不可能と考えられることから係留索の索数では現実的な対応は難しいと考えられる。次に、索径を75 mmを100 mmに変更した case 4 やクレモナロープをナイロンに変更した case 5 では、15%程度の改善効果はみられるものの大きな効果は期待できないといえる。また、索材をワイヤに変えた case 6, 7 の場合、動揺量が減少する割合は大きい、1本当たりにかかる最大荷重に安全率2.5を考慮すると切断荷重以上となることからワイヤによる対策は不可能といえる。

以上より、索径を100 mmにした場合や、索材をナイロンに変更した係留条件では、ある程度の改善効果がみられるが、抜本的な改善にはなっておらず、また、本検討で用いた係留索の諸元は新品のものであり老朽化による材質の劣化は考慮に入れていないことから係留系による動揺抑止効果はあまり期待できないといえる。

4. 長周期波高未超過確率の評価法と対策工

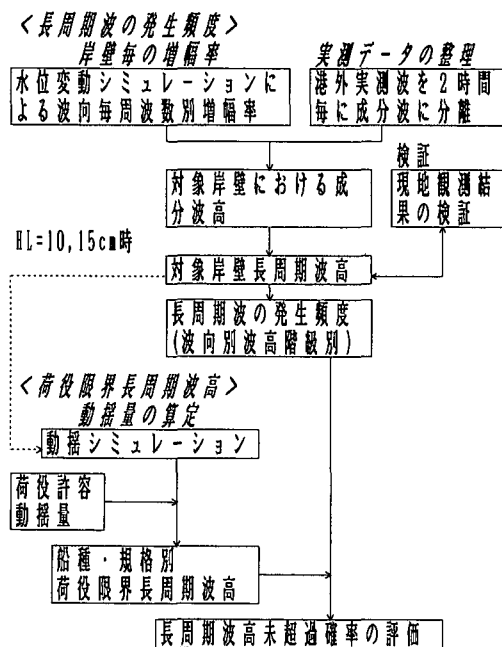
4.1 長周期波高未超過確率の評価法

係留条件の変更による動揺抑止対策は大幅な稼働率の改善効果を期待できないことから防波堤の延伸など港形を変えることによる対策効果を検討する。防波堤の延伸効果などは通常、港外における波高・周期の結合分布および港外と港内の波高比に基づいて算定される稼働率によって評価される。ところが、稼働率の算定には、通常の波に対しては高山法を用いて算定される波高比を用いて算定されるが、長周期波を対象として稼働率を算定した事例はほとんどない。そこで、係留各岸壁における長周期波高未超過確率に基づく稼働率の新しい評価法を提案し、これを用いた対策工の事例を示す。図-6に示す評価法は、苫小牧港で観測された2ヶ年分の港外実測データと水位変動シミュレーションを用いて対象岸壁における長周期波の発生頻度を算定し、これと船体動揺計算による荷役限界長周期波高を組み合わせ、各岸壁における長周期波高未超過確率を評価する方法である。

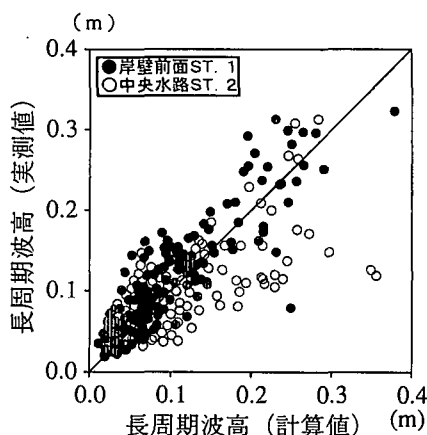
まず、対象岸壁における長周期波の発生頻度については、水位変動シミュレーションにより西港の波向とこの波向毎の各対象岸壁での周波数別増幅率を算定する。

次に、西港波向別の東港港外の2ヶ年分2時間毎の実測成分波高にこれを用いて、対象岸壁における成分波高を求め、この各成分波のエネルギー和を波高に換算した長周期波高を整理することで長周期波の発生頻度を算定する。

尚、波向については、長周期波の発生主要因がセットダウン波であると考えた場合、長周期波がその搬送波であるうねり成分波浪とほぼ同じ波向を持つことから波向



図一六 長周期波高未超過確率評価法



図一七 実測長周期波高と計算長周期波高

は通常の波向を用いた。

本評価法で用いた水位変動シミュレーションの精度については、波高についての2ヶ年分の実測と計算の長周期波高の比較図を図一七に示すが、東水路 (St. 1), 中央水路 (St. 2) とともに再現性は高く、妥当性が検証できたといえる。

一方、各係留岸壁における荷役限界長周期波高については、荷役の可否を判断するには、通常、荷役限界状態を波高・周期・波向で評価することから、長周期動揺に対しても長周期波高及びその波向により評価する必要があると考えられる。ところが、長周期波の特性は港の位

表一三 荷役許容動揺量

船 種	サージ (m)	スウェイ (m)
貨 物 船	±1.0	+0.75
鉱石運搬船	±1.0	+1.0

表一四 荷役限界長周期波高

	水深 (m)	対 象 船 舶	荷役限界長周期波高
E 1	-14	鉱石船 80,000 DW	10 cm
E 2	-5.5	貨物船 2,000 DW	15 cm
E 3	-12	貨物船 30,000 DW	10 cm
E 4	-7.5	貨物船 5,000 DW	10 cm
E 5	-12	貨物船 30,000 DW	10 cm
E 6	-10	貨物船 10,000 DW	10 cm
C 1	-10	貨物船 10,000 DW	10 cm
C 2	-14	貨物船 50,000 DW	10 cm
C 3	-9	貨物船 10,000 DW	10 cm
C 4	-9	貨物船 10,000 DW	10 cm

置及び係留地点などにより異なり、長周期波高から一義的に荷役限界状態を評価することは難しいと思われる。

このうち、苦小牧に到来する波の一般特性は2.2により示されたが、2.3より係留岸壁により増幅特性が異なることが確認された。したがって、係留岸壁毎に異なる増幅特性を考慮して荷役限界長周期波高を定める必要があると思われる。そこで、苦小牧における港外実測波から計算された岸壁前面の長周期波高卓越時 ($H_L=10, 15\text{cm}$ 出現時) の長周期側と短周期側の成分波を用いて船体動揺計算をおこない、表一三に示す上田、白石らの提案値 (1988) に基づく荷役許容動揺量を用いて図一八(C) の検討港形に係留する船舶を対象に船種・船型別の荷役限界長周期波高を評価した。

尚、短周期側の成分波の算定は、長周期波卓越時の東港港外実測波の $H_{1/3}$ に高山法による各係留地点の増幅率を乗じた波高と、東港沖実測波の $T_{1/3}$ を用いて光易型スペクトルによりおこなう。尚、対象船舶の諸元については標準船型の諸元を用いた。

厳密には、岸壁の波高スペクトル形状は港形、係留条件により異なると考えられることから、検討する港形・係留岸壁の全てについて荷役限界長周期波高を算定する必要があると思われる。しかし、実質的に膨大な作業を伴うので現実的でなく、また、表一四に示すように今回の検討では、係留地点による差はほとんどみられなかった。そこで、少なくとも苦小牧港に限っては、船種船型及び入射波向から一義的に荷役限界長周期波高を定めることができると考え、各バースの荷役限界状態を表一四により評価した。

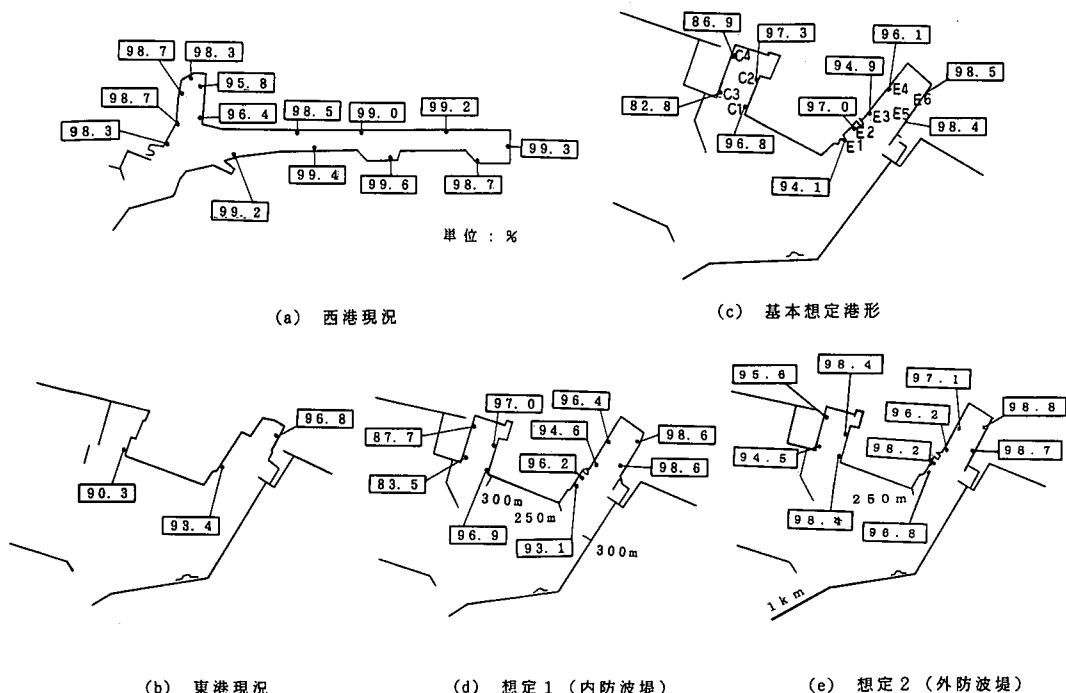


図-8 長周期波高未超過確率算定例

4.2 長周期波に対する対策工

算定結果については、図-8(b)に示すように St.1 の未超過確率が 93.4% となり、現地のヒアリングによる実際の利用状況 93% 程度（着岸日数 532 日中利用日数 497 日）を再現しているといえる。また、中央水路では 90.3% と低くなっているが、これは 2.4 に示す増幅特性を反映している。一方、西港では、図-8(a)に示すように最低値でも 95% を満たしており、また、西港においては実際に被害の報告もないことから未超過確率の閾値は 95% 程度ではないかと推測される。そこで、とりあえずの目標値を 95% と定め、図-8(c)を基本形として防波堤の延伸など対策工の検討をおこなった。まず、図-8(d)の内防波堤のみの対策では、顕著な改善効果はみられなかった。一方、図-8(e)に示す外防波堤の建設効果は非常に大きく最低値でも 94.5% と、ほぼ目標値を満たすことから港外から進入する長周期波に対しても防波堤の建設は有効であることが示された。

5. 結 論

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- ①長周期動揺に影響を及ぼす長周期波の一般特性を示すとともに、長周期波の波向別の増幅特性から将来供用

が開始される岸壁における動揺の可能性を示した。

- ③係留索の本数、径、素材など係留条件を変更することによる対策を検討したが、有効な方法を提案することはできなかった。
- ④港外実測値と数値計算を用いた長周期波高の未超過確率の算定法を示すとともに、外防波堤の延伸など有効な対策工を提案した。

最後に、検討を進めるにあたり、「苫小牧港海域調査検討委員会」（委員長・谷野賢二 開発土木研究所水産土木研究室長 ～平成 5 年度）、ならび「苫小牧東港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 平成 6 年度～）より貴重なご意見を賜った。

また、データ解析、図面作成には日本データサービス(株)のご協力を得た。併せて、ここに御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 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, pp. 951-955.
- 松良精三・渥美洋一・菅沼史典・宮本義憲 (1994): 波群に拘束された長周期波の港内における増幅特性と船体動揺に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 71-75.