

高知港三里地区における長周期動揺低減システムの実証実験計画

川崎栄久*・田辺勇人**・西尾裕二***・松原宗伸****・菊地洋二*****

* 前(財)沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員
 ** 国土交通省 四国地方整備局 高知港湾・空港整備事務所 工務課長
 *** 国土交通省 四国地方整備局 高知港湾・空港整備事務所 工務係長
 **** 国土交通省 四国地方整備局 高知港湾・空港整備事務所 工務課
 ***** (財)沿岸技術研究センター 調査部 調査役

高知港三里地区の岸壁は、完成港形に至るまでの間、長周期波に対して所要の荷役稼働率が満足されていない。そのため長周期波対策として、平成 22 年度に「長周期動揺低減システム」(以下「システム」)が設置され、24,000DWT 級石炭船の荷役を対象とした実証実験計画を策定することとなった。本報告は、システムの特徴を踏まえて船体動揺シミュレーションによりその運用基準を定めたものである。

キーワード: 長周期波対策, 長周期動揺低減システム, 船体動揺シミュレーション

1. はじめに

高知市は浦戸湾を中心に発展してきたが、湾内の水深が浅く埠頭も狭いため5,000T 級以上の大型船舶の接岸が難しい。これを受けて外洋に面した三里地区に-8、-12m 岸壁が整備され、平成 10 年 3 月から一部供用が開始された¹⁾。-8m 岸壁には主にコンテナ船が就航しており-12m 岸壁には大型客船及び石炭船や石灰船のバルク船、護衛艦等が接岸している。しかし当該地区は外洋に面しており防波堤の整備が完了していないことから、年間の荷役稼働率が 97.5%を満足しておらず、長周期波による船体動揺の発生が非常に危惧されている。そこで国土交通省四国地方整備局は防波堤延伸を補完するために、平成 22 年度に(独)港湾空港技術研究所が開発したシステム^{2)~4)}を図-1 に示す埠頭用地に設置し 24,000DWT 級の石炭船を対象にシステムの効果を実証すべく実験を計画した。

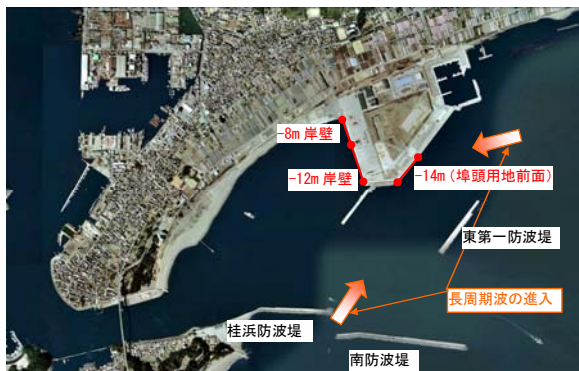


図-1 実験対象地区 (Google Earth に一部加筆)

2. 実証実験計画の概要

浦戸湾内水深が浅いため石炭荷役は舳によって行われている。ただし、実証実験は本船の船体動揺の低減効果を確認することが目的であるので、実験実施内容は対

象船舶の係留中、荷役作業の実施ありなしに係わらず、システムによる船体動揺低減効果を検証するため、係留方式の変更や船体動揺量等の計測データの取得をおこなうこととした。実験では、係留索の操作を行えるよう要員を配置するとともに、係船状態監視モニターを使用して係留状態の監視をおこない、係留の安全を第一に配慮した。

また、船体動揺量が過大になるなど係留が不安全な状態となった場合には、実験を中止し対象船舶の係留の安全を確保するよう努めた。実験計画書を作成する上で検討した項目を図-2 に記す。本報では紙面の都合により実験計画の項目の内、1. 2. 3. 5. について述べる。

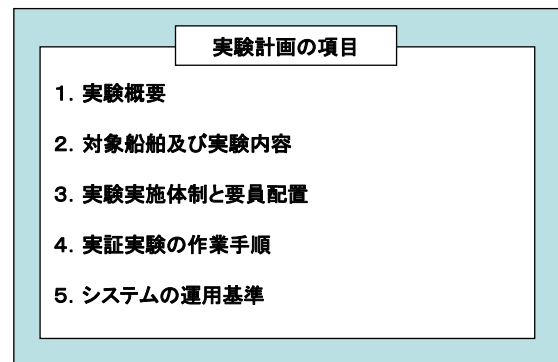


図-2 実験計画の検討項目

2.1 実験概要

通常、荷役稼働率を向上させるためには防波堤の延伸を行うが、荷役稼働率 97.5%を満足させるためには整備期間が長期にわたる難点がある。反面、システムは整備期間が非常に短いうえに、荷役稼働率が低いバースの稼働率を向上することができる。先例として、石巻港雲雀野地区での実験運用が挙げられる⁵⁾。

ここでシステムのご概念をつぎに示す。1本の係留索を硬い係留索(テトロンダイニーマ)と軟らかい係留索(ナイロン)で構成して、船上と陸上のウインチの巻取りによって索の構成比を変えることで係留系の固有周期を変化させて長周期波との共振を防ぐものである。その概念を図-3に記す。ここでは船上のウインチにはナイロンの索が収納されて、陸上のウインチにはテトロンダイニーマ製の索が収納されているが、両者はシャックルによって接続されている。それぞれの係留索の性能曲線を図-4に示す。この図よりダイニーマはナイロンよりもバネ係数が高いことがわかる。このようなことから陸上係留索(ダイニーマ)の構成比を変えることで固有周期は図-5のとおり変化する。以上を踏まえてシステムは以下のとおり実施される。

- ① 波高計測装置により計測されたデータから、長周期波のエネルギースペクトラム密度(卓越周期)を算出する(図-6参照)。
- ② 係留系制御システム(コンピュータ)によって長周期波との共振を防ぐ最適な固有周期が算出される(図-6参照)。
- ③ 船舶を係留する索のバネ係数を陸上と船上のウインチによって変更し、共振(船体動揺)を防止する。

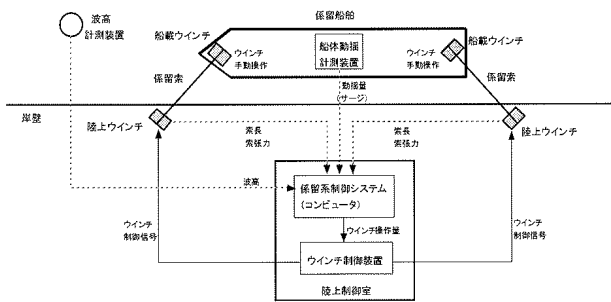


図-3 システムの概念図

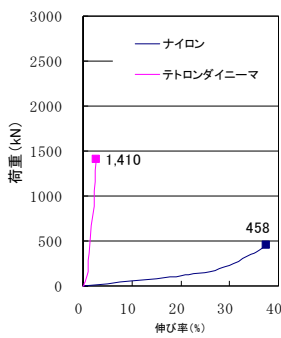


図-4 係留索の性能曲線

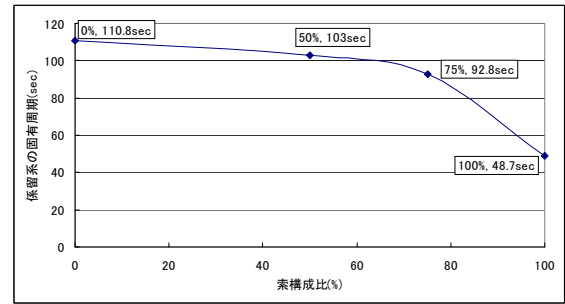


図-5 索構成比に対する固有周期の変化

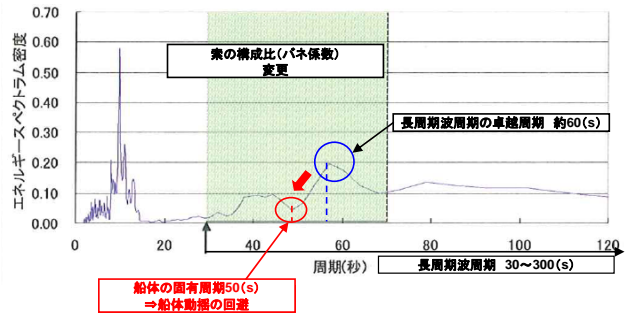


図-6 共振(船体動揺)の回避

2.2 対象船舶および付帯設備

対象船舶は24,000DWT級の石炭船を想定した。船舶の詳細を表-1に示す。対象バースには係留系支柱6基、ゴム防舷材6基、波高計、風向風速計およびウインチ2基が設置されている(図-7参照)。実験では、システムによる船体動揺低減効果を確認するために、外力(長周期波高・周期、風向、風速)、6自由度の船体動揺量、係留索張力、防舷材反力等を計測することとした。なお係留索および防舷材の性能を表-2に示す。

表-1 実験対象船舶の詳細

船型	24,000DWT級石炭船
積載状態	満載
総トン数	14,941 GT
載貨重量トン数	24,669.38 DWT
全長(Loa)	158.0 m
垂線間長(Lpp)	149.5 m
型幅(B)	25.0 m
型深(D)	13.5 m
船首喫水	8.653 m
船体中央喫水	9.440 m
船尾喫水	10.227 m

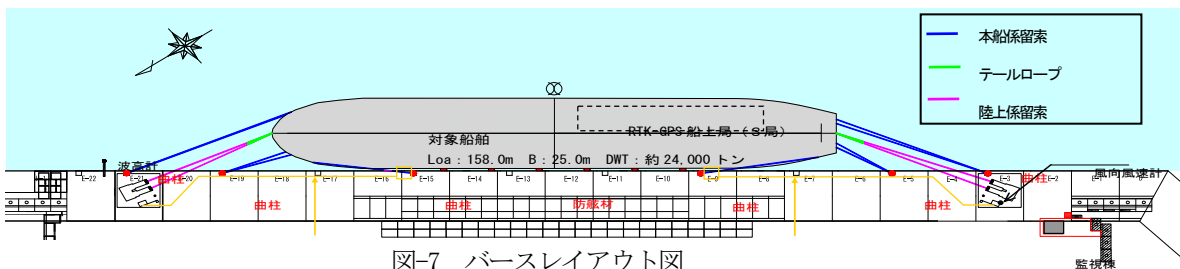


図-7 バースレイアウト図

表-2 係留索および防舷材の性能

項目	安全使用数値
本船係留索 (ナイロン)	120 kN
陸上係留索 (ダイニマ)	470 kN
防舷材反力	705 kN
防舷材歪み	52.5 %

※ 安全使用数値は、限界値に安全率を乗じて求めた。

2.3 実験実施体制と要員配置

実験実施体制と要員配置を立案する上で、考慮すべき事項は三里地区における港湾荷役の実態を考慮することであった。石炭荷役では曳船業者や綱取業者等を一元的に管理していないために、港湾荷役関係者の協力を得る必要があり、また実証実験をすることで通常の荷役に作業がプラスアルファされるため、荷役関係者の実験協力が不可欠であった。このためワーキンググループを数回開催して、港湾荷役関係者の合意を得ながら体制と要員配置を決定した (図-8, 9 参照)。



図-8 港湾利用者とのワーキング状況

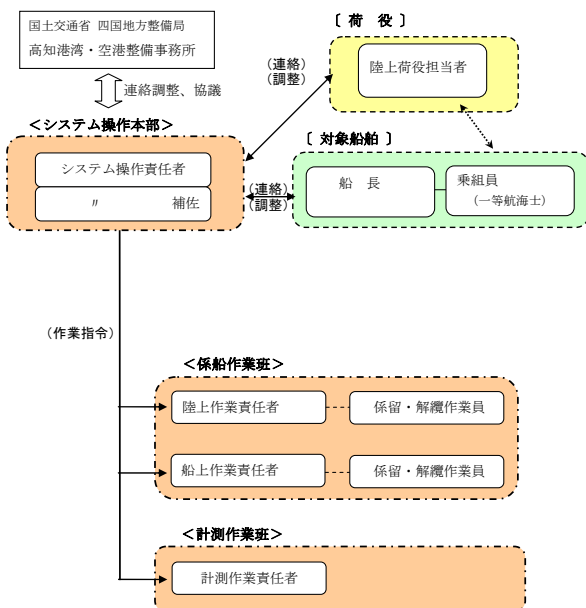


図-9 実証実験の体制

2.4 運用基準

システムの運用基準を設定するには、荷役限界波高と係留限界波高を算出する必要がある。長周期波に対する、6自由度の船体動揺量をシミュレーションによって求めこれらの限界波高を設定することとした。

(1) 長周期波に対するシミュレーションの実施

係留時における船体動揺は、船体に働く流体力および時刻歴応答の2段階の計算により、シミュレートした。

なお、計算を行なう際には以下の条件を仮定した。

○バースの水深を考慮する。

○長周期波の入射波は、微小振幅の規則波とする。

○船体運動および流体運動は、微小振幅で定常調和振動するものとする。

船舶が係留されている状態において風、波および潮流の外力が作用する場合、船体動揺は (1) 式に示す6自由度の運動方程式で表わされる。

$$\sum_{j=1}^6 \{M_{ij} + m_{ij}(\infty)\} \cdot \ddot{x}_j(t) + \sum_{j=1}^6 \int_0^t L_{ij}(t-\tau) \cdot \dot{x}_j(\tau) \cdot d\tau + \sum_{j=1}^6 N_{ejj} + \sum_{j=1}^6 (C_{ij} + G_{ij}) x_j(t) = F_i \dots \dots (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (1)$$

ここで、

$$L_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty B_{ij}(\omega) \cos \omega t d\omega$$

$$m_{ij}(\infty) = A_{ij}(\omega) + \frac{1}{\omega} \int_0^\infty L_{ij}(t) \sin \omega t dt$$

- M_{ij} : 船体の質量
- $m_{ij}(\infty)$: 不変付加質量
- $x_j(t)$: 動揺量
- τ : 積分変数
- $L_{ij}(t)$: メモリー影響関数
- C_{ij} : 船体の復原力係数
- N_{ejj} : 粘性減衰力
- G_{ij} : 係留力係数
- ω : 角周波数
- $F_i(t)$: 外力和 (波, 風, 潮流等)
- $A_{ij}(\omega)$: 付加質量
- $B_{ij}(\omega)$: 減衰係数
- t : 時刻
- i, j : 船体動揺 6 自由度の項

(2) シミュレーションの条件と結果

外力条件は風および潮流は設定せず、長周期波は波高 (5, 10, 15cm), 周期, 波向き (相対波向 40° , 170°) を表-3 のとおり設定した。それに対して実験対象船舶の動揺量と荷役および係留限界波高を確認するために、船舶の固有周期は、48.7, 92.8, 103, 110.8(s)の5ケースとした (図-5 参照)。固有周期に対応する係留方式は、通常の係留方式 (陸上係留索 0% / 本船係留索 100%), ウインチ方式 (陸上係留索 50% / 本船係留索 50%), ウインチ方式 (陸上係留索 75% / 本船係留索 25%), ビット方式 (

陸上係留索 100% / テールロープ 10m) である。ここで、ビット方式の係留図を図-10に示す。ビット方式は船上のビットに直接、陸上索およびテールロープを係止するので索構成比は変更できないが、最も固有周期が小さい方式である。一方ウインチ方式は船上のウインチを介して陸上索を接続するので、任意の固有周期(索構成比)に変更できる方式である。ビット方式で用いられるテールロープは、陸上係留索と船体の擦れ防止を目的としている。シミュレーションは表-4のとおり、計24ケース実施した。

表-3 長周期波の条件設定

項目	計算条件	備考
波高	5cm、10cm、15cm	対象船舶の長周期波に対する荷役限界波高10cmをふまえ設定
周期	30~300秒	一様スペクトルとする
波向	40° (右舷船首40°)	東第一防波堤東側開口部から対象岸壁に向けて進入すると想定
	170° (右舷船尾10°)	桂浜防波堤と南防波堤の間から対象岸壁に向けて進入すると想定

※波向の備考については、図-1参照のこと。

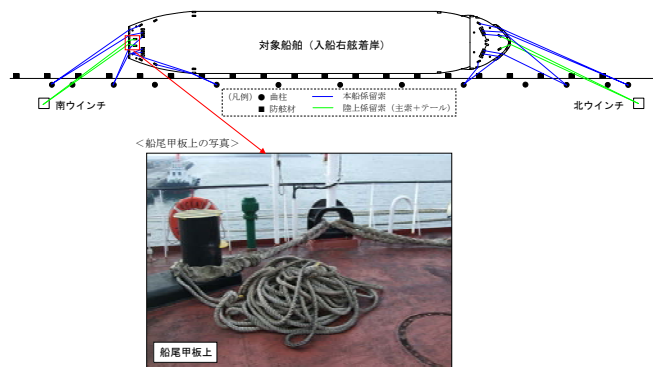


図-10 ビット方式による係留(他港の事例)

表-4 シミュレーションケース総括表

No.	係留方式		波		相対波向(deg°)
	係留索の構成比率		波高(m)	スペクトル形状	
1	ウインチ方式	陸上係留索 0%	0.05	一様スペクトル	40 (右舷船首40°)
2		本船係留索 100%	0.10		
3			0.15		
4		陸上係留索 50%	0.05		
5		本船係留索 50%	0.10		
6			0.15		
7		陸上係留索 75%	0.05		
8		本船係留索 25%	0.10		
9			0.15		
10	ビット方式	陸上係留索 100%	0.05	一様スペクトル	170 (右舷船首10°)
11		テールロープ 10m	0.10		
12			0.15		
13	ウインチ方式	陸上係留索 0%	0.05	一様スペクトル	170 (右舷船首10°)
14		本船係留索 100%	0.10		
15			0.15		
16		陸上係留索 50%	0.05		
17		本船係留索 50%	0.10		
18			0.15		
19		陸上係留索 75%	0.05		
20		本船係留索 25%	0.10		
21			0.15		
22	ビット方式	陸上係留索 100%	0.05	一様スペクトル	170 (右舷船首10°)
23		テールロープ 10m	0.10		
24			0.15		

シミュレーション結果を表-5に示す。表の中で“○”は評価値以内、“×”は評価値オーバーをあらわす。考察を以下に示す。

表-5 シミュレーション結果

係留方式	着眼点	相対波向 40°			相対波向 170°				
		評価項目	評価値	5cm	10cm	15cm	5cm	10cm	15cm
ウインチ方式	(通常の係留方式)	船体動揺量	±1.0m	○	×	×	○	×	×
	陸上係留索 0%	係留索張力	120kN	○	○	○	○	○	○
	本船係留索 100%	防舷材歪み	52.5%	○	○	○	○	○	○
	陸上係留索 50%	船体動揺量	±1.0m	○	×	×	○	×	×
	本船係留索 50%	係留索張力	120kN	○	○	○	○	○	○
		防舷材歪み	52.5%	○	○	○	○	○	○
ビット方式	陸上係留索 100%	船体動揺量	±1.0m	○	○	×	○	○	×
	テールロープ 10m	係留索張力	470kN	○	○	○	○	○	○
		防舷材歪み	705kN	○	○	○	○	○	○

① 通常の係留方式およびウインチ方式

通常の係留方式(陸上係留索 0% / 本船係留索 100%)、ウインチ方式(陸上係留索 50% / 本船係留索 50%)およびウインチ方式(陸上係留索 75% / 本船係留索 25%)では、船体動揺量が長周期波高10cmの条件下において許容値(評価値)を超える結果となり、係留索張力および防舷材歪みは長周期波高15cmの条件下においても許容値以内であった。ウインチ方式を実施する場合は、通常の係留方式(陸上係留索 0% / 本船係留索 100%)、ウインチ方式(陸上係留索 50% / 本船係留索 50%)およびウインチ方式(陸上係留索 75% / 本船係留索 25%)を前提に、荷役限界波高である長周期波高6cm前後を上限として、船体動揺量が許容値を超えないように留意して実験する必要がある。

② ビット方式

船体動揺量は長周期波高15cmの条件下において許容値を超える結果となり、係留索張力および防舷材反力は長周期波高15cmの条件下においても許容値以内であった。他の係留方式に比べて、最も長周期動揺の低減効果があった。ただし、今回の計算結果からは荷役限界波高の具体的な数値が不明である。そのため実験に当たっては長周期波高の出現傾向を実測値等から予め想定し、船体動揺量の観測を行いながら、許容値を超えないように安全に留意して実験を実施する必要がある。

3. 運用基準の設定

以上を踏まえ、実験はビット方式及びビット方式データと比較することを目的に通常方式で行うこととし、係留限界波高および荷役限界波高を表-6のとおり設定した。なお、荷役限界波高は表-5の船体動揺量の計算結果によるものである。これにより実験開始前あるいは実施中に、岸壁前面の波高計データと比較することで実験の開始あるいは継続可否を確認することが可能となった。ただし実際には、荷下ろしの進捗に伴う船体の質量や長周期波のスペクトル形状が時々刻々変化する。実験では、波高一船体動揺量等の関係をモニタリングによって注視

し、必要に応じて運用基準を改定しなければならない。

表-6 運用基準の設定

	通常方式 (陸上係留索 0% 本船係留索 100%)	ビット方式
荷役限界波高	約 6cm	約 10cm
係留限界波高	15cm 以上 (安全を鑑みて運用基準は 15cm 以下とする)	

4. おわりに

実験計画の作成により、港湾荷役関係者も含めた高知港三里地区における今後の実証実験の実施が可能となった。シミュレーションによりシステムの運用基準を定めたが、今後の実験を行いながら運用基準値を検証し改定していくことで、より時間の効率化と安全性を図った実験ができるものと期待される。

参考文献

- 1) 国土交通省四国地方整備局高知港湾・空港整備事務所：平成 21 年度第 2 回「今後の高知港を考える会」資料，http://www.pa.skr.mlit.go.jp/kouchi/A/thinks/thinks_kochi.htm, 2010.
- 2) 米山治男・佐藤平和・白石悟：係留策による長周期動揺低減システムの開発—水理模型実験および試設計—，港湾空港技術研究所資料，No.1056，pp. 1-29，2003.
- 3) 米山治男・白石悟・佐藤平和：係留船舶の長周期動揺低減システムの水理模型実験による検証，海洋開発論文集，第 20 巻，pp.1299-1304，2004.
- 4) 港湾空港技術研究所・地盤構造部海洋構造研究室：係留船舶の長周期動揺低減システムの開発，港湾空港技術研究所資料，pp.1-43，2005.
- 5) 国土交通省東北地方整備局塩釜港湾・空港整備事務所：平成 21 年度石巻港雲雀野地区長周期動揺低減システム検討業務報告書，2003.

