

# 高知港三里地区長周期動揺低減システムの実証試験について

菊地 洋二\*・土田 真二\*\*・小泉 勝彦\*\*\*・杉浦 悠介\*\*\*\*

\* (一財) 沿岸技術研究センター 調査役

\*\* (一財) 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 高松港湾空港技術調査事務所 副所長

\*\*\*\* 前 国土交通省 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 技術開発課技術開発係長

高知港三里地区岸壁(-12m)では、防波堤整備が行われているものの、長周期波の影響によると思われる港内静穏度の低下や係留障害が発生している。そのため、長周期波に対する係留系の対策として「長周期動揺低減システム」が構築されている。このシステムは、係留系の固有周期を波浪の卓越周期からずらすことにより、共振を抑制するものである。この度、係留中の実船の動揺量や係留索の張力等を測定する実証試験を実施し、このシステムの効果の検証を行った。

キーワード: 長周期波, 固有周期, 係留索, ウィンチ, 船体動揺シミュレーション

## 1. はじめに

近年、長周期波の影響による港内の荷役稼働率の低下や係留障害の発生が見られ、全国的に対策に苦慮している状況である。特に係留船舶の前後方向の動揺成分であるサージングの影響が顕著である。長周期波対策としては、次のような方法が挙げられている<sup>1)</sup>。

- ①波浪制御構造物による対策
- ②係留系による対策
- ③波浪予測による対策

高知港三里地区岸壁(-12m)は、太平洋に面して南防波堤と東第一防波堤で遮蔽されているものの、防波堤の延長整備が続いており、上記①の完成形における港内静穏度を満足しているわけではない(図-1)。その対策として、当該岸壁では上記②と③の方法を採用している。②の係留系による対策として、「長周期動揺低減システム」(以下、「本システム」という)を構築し、併せて③の長周期波予測を併用している。

本システムの基本原理は、係留系の固有周期を長周期波の卓越周期からずらして共振を抑制するための係留索を擁したウィンチを装備して活用するものである。

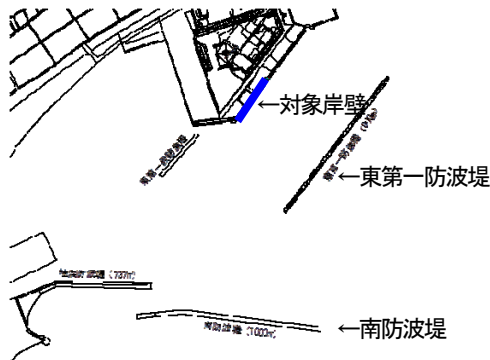


図-1 高知港三里地区 位置図

本報告では、平成26~27年度にかけて現地岸壁に係留荷役中の実船に対して行った実証試験の結果から、石炭船に関する実証試験結果を紹介し、システムの効果について報告する。

## 2. 長周期動揺低減システムの概要

本システムの基本的な仕組みは、係留系の固有周期と来襲する長周期波の卓越周期をずらすことにある。係留系のサージングの固有周期  $T_S$  は(1)式で算出する<sup>1)</sup>。

$$T_S = 2\pi\sqrt{M_V/K} \quad (1)$$

ここに、

$M_V$ : サージング方向の仮想質量 (近似的に  $M_V = 1.05 \sim 1.15M$  とすることができる, ここに  $M$ : 船舶の質量 (=排水トン数))

$K$ : サージング方向の剛性ばね定数

係留系の固有周期を変えるには、係留系のばね定数  $K$  または船舶の仮想質量  $M_V$  を変化させればよい。同一の船舶に対しては、 $M_V$  は任意に変化させることが出来ないため、係留系のばね定数  $K$  を変化させる仕組みが必要である。係留系のばね定数は、岸壁上に常設したウィンチにばね定数の大きなテロンダイニーマ索 (以下、陸上索という) を装備することによって変化させることができる。その方法として以下の2つがある。

- ①陸上ウィンチの陸上索と船上ウィンチの本船索を連結して両方のウィンチを操作し、構成比率を変えることで任意のばね定数に調整する方式<ウィンチ方式>
- ②陸上ウィンチの陸上索を繰り出して船上ビット(係船柱)に固定し、増し取りすることで係留系全体のばね定数を大きくする方式<ビット方式>

本システムと同様のシステムの実施例としては、平成19～21年度にかけて石巻港雲雀野地区において実証試験されたものが挙げられる。このときの実証試験では、ウィンチ方式も行われたが、最適構成比率を計算した際の波高と構成比設定後の波高が必ずしも同じではないことが課題とされた<sup>2)</sup>。そこで、本システムではビット方式を採用<sup>3)</sup>して実証試験することとなった。図-2に実証試験時の本システムおよび計測器の配置を示す。



写真-1 長周期動揺低減システム

### 3. 実証試験における効果・検証

#### 3.1 実証試験方法

主な試験対象船は、24,000～28,000DWT級の石炭船で、代表的な26,000DWT級で全長157m、船幅27m、型深13.5m喫水7.2m(半載、船尾)である。標準的な荷役工程は、入港後に係留作業と荷役準備を行い、丸5日間の荷役作業を終え出港する。高知港では、岸壁(-12m)で本船に横付けしたバージ船(5,000t積)に積み替え、浦戸湾奥にあるセメント工場に運搬・揚陸するサイクルを昼夜連続で4サイクル行う。対象岸壁は、水深-12m、延長280m、係船曲柱(1,000kN)11基と防舷材(SV型)21基、それと本システムの陸上ウィンチ設備(写真-1)が船首・船尾に各2系統が設置されている(写真-2)。



写真-2 係留船舶への使用状況(船尾)

試験のサイクルとして、本システムの効果を検証する目的から、本船索のみの通常係留と本システムの陸上索を増し取りしたビット方式係留を、図-3に示すように、2時間単位で交互に実施・計測し比較することとした。

時刻	00	02	04	06	08	10	12	14	16	18	20	22
係留方式				朝まで ビット方式を継続	変更作業 ビット方式を継続	通常方式(2時間)	変更作業 ビット方式(2時間)	変更作業 ビット方式(2時間)	通常方式(2時間)	変更作業 ビット方式を継続	夜間は ビット方式を継続	

図-3 実証試験の標準工程

試験時の計測機器は、岸壁前面に設置した超音波式波高計、風向風速計、陸上ウィンチに装備された陸上索張力計、繰り出し長計測、本船索に取り付けた歪計、及び船体動揺量(サージング、スウェイング、ヒービング、ヨーイング、ローリング、ピッチング)を計測する本船に取り付けたGPS計測機である。

表-1 実証試験回数

回数	船舶	試験開始～試験終了
平成26年度1回目	石炭船	H27. 1.31～2.3
平成26年度2回目	石炭船	H27. 2.8～2.13
平成27年度1回目	石炭船	H27.10.30～11.3
平成27年度2回目	ヤシガラ運搬船	H27.12.25～12.26
平成27年度3回目	石炭船	H28. 2.8～2.12

実証試験は、表-1に示す回数を実施した。

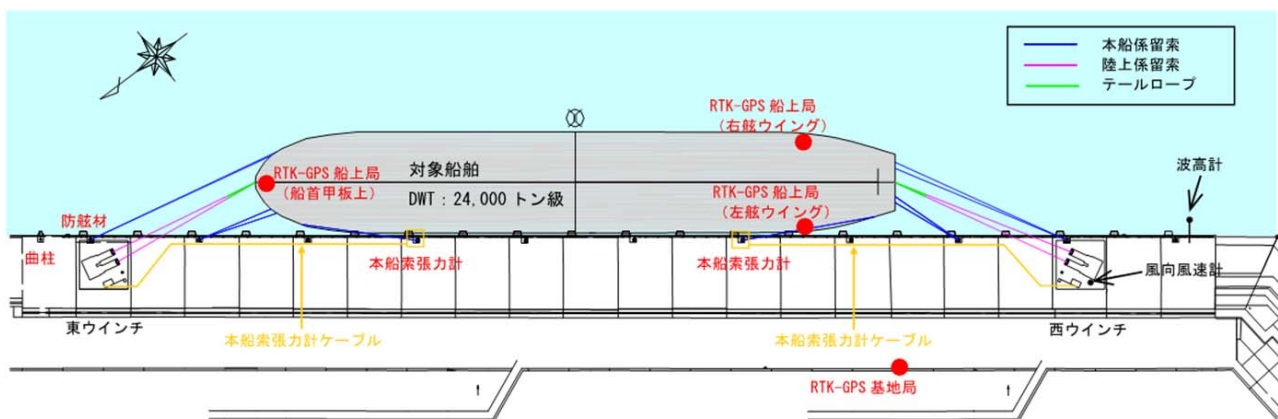


図-2 実証試験時の長周期動揺低減システムおよび計測器配置図

### 3.2 実証試験結果

#### (1) 計測結果およびデータ処理

図-4 に平成 27 年度第 3 回目の試験における、石炭船の着岸 08:00 から 20:00 までの計測結果を示す。図-4 には船首側の東ウィンチの陸上索張力、本船索の張力、サージ動揺量の時刻歴を示している。計測は、船舶の着岸後に計測器を設置した直後から、船舶の離岸直前まで連続して行っている。計測したデータは、同一係留方式である 2 時間連続データのほぼ中央の 1 時間を一区間として抽出し、更に 20 分毎に分割して統計量（波高、風速・風向、動揺量）を算出した。船舶動揺量は、港内波浪に依存すると考えられることから、有義波高を求めると同様の処理を行って 20 分間の代表値とした。その他の計測量の代表値は 20 分間の平均値である。

#### (2) サージ動揺量の低減効果

図-5 に、平成 27 年度第 3 回試験の区間毎の計測結果からサージ動揺量、有義波高（周期 1~30 秒）、長周期波高（周期 30~300 秒）を時刻順に並べたもの示す。これを見ると、有義波高および長周期波高が大きくなるとサージ動揺量が大きくなる傾向があることがわかる。有義波高の影響は長周期波高ほど大きくないようである。また、全体的にビット方式の方がサージ動揺量の有義値が小さく、本システムの効果が現れているものと思われる。

図-6 に長周期（周期 30~300 秒）波高とサージ動揺

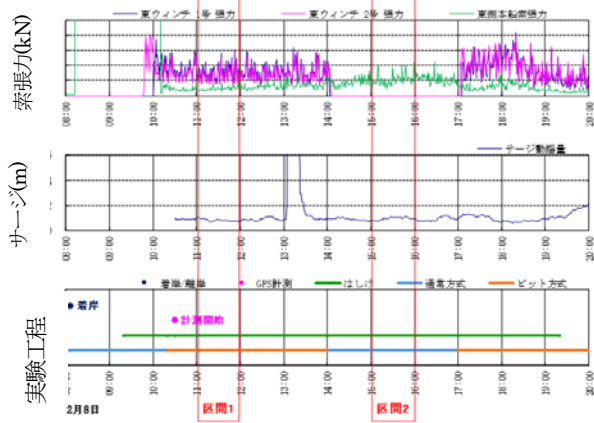


図-4 平成 27 年度第 3 回試験の計測結果の一例

量の関係を示す。図-6 を見ると、区間によってばらつきはあるものの、通常方式に比べビット方式の動揺量は 70%程度に低減していることがわかる。また、周期 1~30 秒の有義波高においてもビット方式の動揺量が低減していることを確認している。

図-7 には、本システムの作用の度合いを見るため、陸上索張力とサージ動揺量の関係を示した。陸上索張力が小さくなるとサージ動揺量が大きくなる傾向にあり、陸上索張力が本システムの作用状況の指標となることがわかる。ただし、平成 27 年度第 1 回試験は索張力が 20kN 以下で動揺量が大きくなるケースが多く、これは陸上索の弛みをウィンチで締め直す作業を行っていなかったために、陸上索が効いていなかったことが原因であると考えられた。実証試験では以降に締め直しを行うようにしたが、これらのことから、本システムの運用に際しては、張力管理が重要であることがわかる。

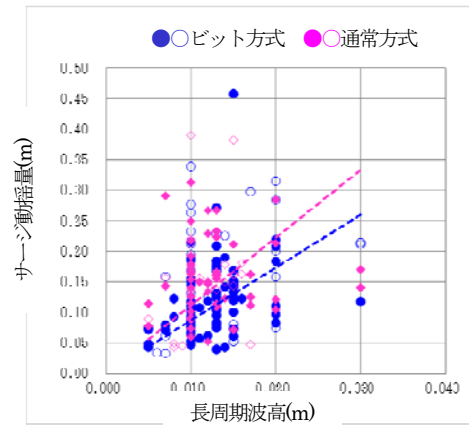


図-6 長周期波高とサージ動揺量の関係

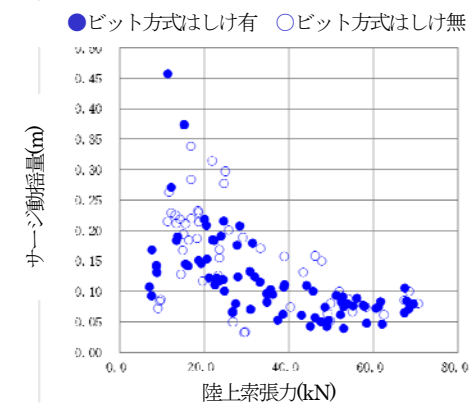


図-7 陸上索張力とサージ動揺量の関係

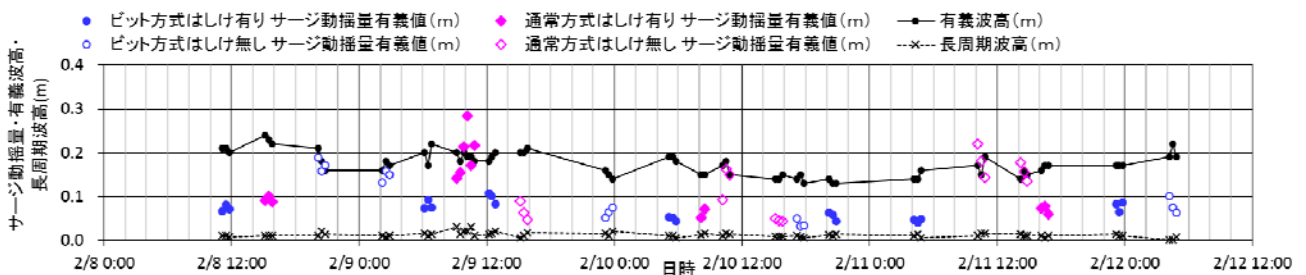


図-5 サージ動揺量・有義波高・長周期波高（平成 27 年度第 3 回）

(3) 係留系の固有周期の短周期化

次に、係留系の固有周期と波の卓越周期との関係に着目し、どの周期帯で係留系のサージ動揺が励起されているかを調べた。スペクトル解析を行い、サージ動揺エネルギーと波エネルギーの比を算出し、(図-8に示すように)最もエネルギー増幅率が大きい周期をピーク増幅周期として拾い出したものを図-9に示す。ピーク増幅周期は、通常方式では固有周期である60~100秒に多く、ビット方式では固有周期である30~50秒に多い。増幅率もビット方式の方が小さくなっている。また、ピーク増幅周期と増幅率の関係から、通常方式に比べビット方式はピーク増幅周期が短い周期帯に移行し、増幅率も小さくなっていることがわかる。

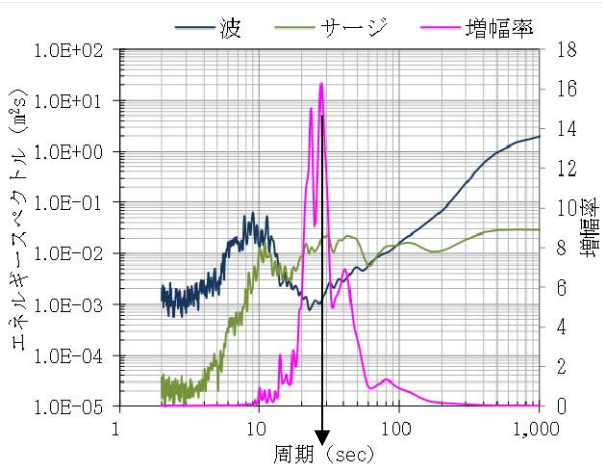


図-8 ピーク増幅周期

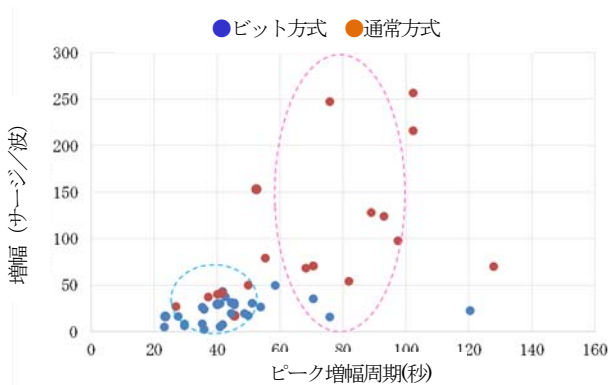


図-9 ピーク増幅周期とサージ動揺量

3.3 限界波高，稼働率の算定

本システム運用上で重要なことは、対象船舶がシステムを利用することによって、通常係留時よりも大きな波高まで荷役作業が可能なること(荷役限界波高)、安全性を確保するために大きな波高まで岸壁係留が可能なること(係留限界波高)である。今回の試験時における長周期波高は、概ね3cm以下であったが、船体動揺シミュレーションによって、より大きな波高に対する船体動揺特性や索張力を計算し、限界波高を求めることができる。

船体動揺シミュレーションの結果、対象船舶の岸壁(-12m)における限界波高は以下の通りであった(長周期波高10cm以上、荷役動揺許容値1.0m、係留索安全使用荷重による)。これを見ると、通常方式に比べ、本システムのビット方式による動揺低減効果が確認できた。

荷役限界波高：(通常方式) 9.0cm  
(ビット方式) 13.7cm

係留限界波高：(通常方式) 15.4cm  
(ビット方式) 19.8cm

また、荷役限界波高に基づく対象船舶の岸壁荷役稼働率は、平成23~27年の現地波高観測データを用いると、以下の通り向上させることができることがわかった。

岸壁荷役稼働率：(通常方式) 91.2%  
(ビット方式) 94.2%

なお、船体動揺シミュレーションでは、今回のような直立岸壁における入射角度を踏まえた反射波を考慮している。また、シミュレーションの精度を上げる目的で、実証試験の観測値の再現計算を行い、サージに関わる前後揺減衰係数の合わせ込みを行った。その結果、久保らの数値<sup>1)</sup>の5倍程度にすると観測値を再現できた。粘性係数は船型、係留条件、岸壁構造等によって変化するのであるが<sup>1)</sup>、高知港において検証された数値として、今後の研究の一助になるものと考えている。

4. 今後の課題

高知港三里地区における長周期動揺低減システムの効果の検証を行ったところ、対象船舶の26,000DWT級の石炭船で限界波高及び稼働率の向上が図れることがわかった。今後は、通常波浪も含めた岸壁の係船柱・防舷材等の付帯設備の増強や、本システムの運用方法の構築を整備する必要がある。

最後になりますが、本システムの構築・検討にあたって京都大学防災研究所・平石哲也教授、港湾空港技術研究所・米山治男リーダーのご指導を賜りました。また、実証試験の実施にあたっては、荷主・船社をはじめとする高知港の関係各位のご協力をいただきました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 財団法人 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，沿岸技術ライブラリーNo.21，2004.
- 2) 国土交通省 東北地方整備局 塩釜港湾・空港整備事務所：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，2009.
- 3) 国土交通省 四国地方整備局 高知港湾・空港整備事務所：高知港三里地区長周期動揺低減システム検討業務報告書，2010.