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

VERIFICATION OF A REDUCTION SYSTEM FOR LOW-FREQUENCY SHIP MOTIONS BY HYDRAULIC MODEL EXPERIMENTS

米山治男¹・白石悟²・佐藤平和³

Haruo YONEYAMA, Satoru SHIRAISHI and Hirakazu SATOH

¹正会員 工修 独立行政法人港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工博 財団法人沿岸開発技術研究センター (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

³非会員 工修 国土交通省関東地方整備局 (〒231-8436 神奈川県横浜市中区北仲通5-57)

The authors developed a reduction system for low-frequency ship motions that can effectively reduce low-frequency motions of moored ships, and they also proposed the system as one method for countermeasures against long-period waves. The reduction system for low-frequency ship motions can reduce the surge motions of moored ships by preventing resonance with long-period waves, and computer-controlled hybrid mooring winches make it possible to forcibly change the natural period of mooring system consisting of a ship and mooring ropes. In this study, the authors verified effectivity of the reduction system for low-frequency ship motions by the fundamental hydraulic model experiments.

Key Words : Long-period waves, moored ship, low-frequency motions, mooring system, motion reduction, cargo handling efficiency

1. まえがき

長周期波の影響による係留船舶の荷役効率の低下は、主として係留船舶の前後方向の動揺成分であるサージが長周期的に増大することが原因であると言われている。この係留船舶のサージの長周期動揺は、港内の長周期の水位変動と船舶と係留索から構成される係留系の共振現象によって主に生じていると考えられる。現在、係留船舶の長周期動揺を低減させ、バースの荷役稼働率を向上させるための対策工法として、1) 防波堤による長周期波の進入の抑止、2) 港内における多重反射による波高増幅の防止、3) 係留系の固有周期の変更、4) 長周期波予測による荷役可否の判定、等の方法が提案されている^{1)・2)}。これらの対策工法の中で、3) は、船舶の係留方法や係留索および防舷材の材質を変更することにより、係留系の固有周期を変動させ長周期波との共振を避ける方法であり、ハード的な対策ではあるが、比較的安価にかつ短期間で効果が得られるという長所を有している。

そこで、本研究では、3) の対策工法を発展させた、係留船舶の長周期動揺を効果的に低減する長周期動揺低減システムを開発することとした。本シス

テムは、コンピュータによって自動制御された係留ウインチによって、船舶と係留索から構成される係留系の固有周期を強制的に変化させることにより長周期波との共振を避け、係留船舶のサージの動揺低減を行うものである。係留船舶の長周期動揺低減システムは新しい発想に基づくシステムであるため、本研究では、システムの有効性を基礎的な水理模型実験により検証し、係留船舶の長周期動揺の低減効果について検討した。

2. システム設計

(1) 係留船舶の長周期動揺低減システムの概念

図-1に係留船舶の長周期動揺低減システムの概念図を示す。また、図-2に係留ウインチ制御のブロック図を示す。係留ウインチは、船載ウインチと陸上ウインチの2種類があり、船載ウインチは船舶に通常搭載されているもので、陸上ウインチはバース岸壁上に新規に設置される。係留ウインチのうち、陸上ウインチはコンピュータによって自動制御され、船載ウインチは手動操作される。コンピュータによる自動制御では、船上に設置された船体動揺計測装

図-1 係留船舶の長周期動揺低減システムの概念図

図-2 係留ウインチ制御のブロック図

置で計測される船舶の動揺量（サージ）データと波高計測装置から取得される波高データを比較して、長周期動揺低減システムの作動・非作動を判定する。このとき、係留船舶の長周期動揺が発生することが予想される場合あるいは実際に発生している場合には、長周期動揺低減システムが作動し、コンピュータにより陸上ウインチが、また手動操作により船載ウインチが制御される。コンピュータには、このような動揺量データと波高データから係留船舶の長周期動揺の発生の有無を判断し、係留ウインチの制御を実行するプログラムが搭載されている。

長周期動揺低減システムでは、船舶を係留する際には、係船索（合成繊維索）とテール索（ワイヤ索）を接続して係留すると考えており、これら2種類の係留索から構成される合成係留索の係船索とテール索の長さの構成比率を係留ウインチによって自動調整することで制御を実行する。このように係船索とテール索の長さの構成比率を変更すると、柔らかい係留系から硬い係留系へと係留系のばね定数が変化し、係留系の固有周期が長周期波周期から外れて係留船舶の長周期動揺が低減することになる。

なお、石炭運搬船の専用バースにおいて、陸側に設置された係留ウインチから硬い係留索を提供して動揺抑制を実現した事例がある³⁾。ただし、この事例ではコンピュータによる係留ウインチの自動制御機能を導入していないため、波浪場の変動に対応して効率的に長周期動揺を低減できない欠点がある。

図-3 水理模型実験におけるシステムの概念図

図-4 ばね定数調整機構の概念図

(2) 水理模型実験のためのシステム設計

水理模型実験では、長周期動揺低減システムの基本的な機能の検証を目的として、単純化した船舶の係留状況に対して行い、コンピュータによる係留ウインチの自動制御は行わず、ウインチ制御装置を用いた遠隔手動制御とした。図-3に水理模型実験における長周期動揺低減システムの概念図を示す。水理模型実験では、長周期動揺低減システムは、ウインチ模型（船上ウインチ2台および係留施設ウインチ2台）、係留索模型およびウインチ制御装置から構成される。係留索模型は、ナイロン索、コイルばねおよびワイヤ索を直列に並べて接続したものである。また、ウインチ模型は、索変位検出用ポテンシオメータおよび索張力検出用ロードセルを備えている。

システム設計では、係留系のばね定数を調整する機構（ばね定数調整機構）について中心的に検討した。図-4にばね定数調整機構の概念図を示す。ばね定数調整機構では、ウインチ制御装置を用いてウインチ模型を駆動させて係留索模型を構成するナイロン索の巻上げとワイヤ索の繰出しを行い、それらの長さの構成比率を変化させることにより、係留系のばね定数を調整する。なお、係留索は、繰返し引張荷重が作用することにより剛性が硬くなり、その張力-歪み特性が初期の特性と大きく異なることが指摘されている^{2), 4)}。水理模型実験で使用するナイロン索についてはこの硬化の影響が大きいいため、十分注意して実験を実施することとした。

表-1に実験条件および模型特性を示す。長周期動揺低減システムの対象船舶は、50,000DWT級コンテナ船を想定し、実験模型のスケールは1/50とした。

表-1 実験条件および模型特性

項 目	実 機	模型換算値
スケール	1/50	
水 深 (m)	15	0.3
対象船	全長 (m)	216.5 (280.0)
	垂線間長 (m)	193.5 (264.0)
	船幅 (m)	31.5 (37.1)
	喫水 (m)	11.0 (8.29*)
	排水量 (t)	48,000 (48,801)
係留系の固有周期 (s)	非制御時	150
	制御時	50
係留系のばね定数	非制御時	92.61 kN/m
	制御時	833.20 kN/m
係留索	初期張力	147 kN
	破断張力	1,960 kN
	最大張力	611 kN

(注) ( ) 内は、50,000DWTコンテナ船の諸元を示す。

* は、バラスト状態の値を示す。

本研究では、コンテナ船ではない既存模型船を用いたが、係留系の固有周期が最も影響する排水量を考慮して喫水を設定している。係留船舶のサージの固有周期は、一般的に、3,000～10,000DWTでは約60～80s、30,000～50,000DWTでは約2～3min、また100,000DWTでは3～5min程度である。ここでは、50,000DWT級のコンテナ船を想定しているため、初期の係留船舶のサージの固有周期を150s (2.5min) と設定した。長周期動揺低減システムでは、この非制御時の係留系の固有周期が50sまで小さくなるように制御するものとした。

3. 水理模型実験

(1) 実験概要

サーペント型造波機を有する平面水槽において、長周期波成分を含む波を係留船舶に作用させて長周期動揺を発生させ、長周期動揺低減システムによる動揺低減効果を実験的に検証した。図-5は、平面水槽内の実験模型の設置位置を示す。当該平面水槽では長周期波を直接発生させることができないため、2成分波による拘束長周期波を発生させ、さらに造波機設置位置の反対側に反射板を設置して重複波とすることにより、係留船舶の長周期動揺を増幅させた。2成分波は、表-1に示した非制御時の係留系の固有周期 (21.2s) に一致するような拘束長周期波が発生するように、成分波周期を1.414sおよび1.515sと設定した。係留船舶の動揺を増幅させるためには、長周期重複波の節の部分に模型船の中心が位置する必要がある⁵⁾ことから、反射板から1/4波長離れた地点に模型船の中心が位置するように実験模型を配置した。また、係船岸壁からの反射波を抑制するために、フレーム構造の透過式岸壁を用いた。なお、2成分波は船首方向からの入射とし、反射板からの

図-5 水槽内の実験模型の設置位置

表-2 実験ケース

ケース名	入射波振幅	制御量	リピート回数	備考
case1	0.50cm	非制御	4回	通常制御
case2		半制御		
case3		全制御		
case4	1.00cm	非制御		
case5		半制御		
case6		全制御		
case7	0.75cm	非制御	6回	張力増加制御
case8		半制御		
case9		全制御		
case10	0.75cm	非制御		
case11		半制御		
case12		全制御		

反射波を造波板で吸収する吸収制御造波を行った。

波高を測定するための容量式波高計は、反射板前面から5台ほぼ等間隔に設置した。また、係船岸壁を挟んで模型船と反対側に計測台を設置し、係留船舶の動揺量を測定するための3次元動揺計測システムや波高、係留索張力、係留索変位を計測するためのコンピュータ、またウインチ制御装置等の各装置を配備した。3次元動揺計測システムとは、浮体上のターゲットを2台のCCDカメラで追跡した画像をビデオ録画して画像解析することにより、3次元的な浮体の運動を計測する非接触型のシステムである。

(2) 実験ケースおよび実験状況

表-2は、水理模型実験で行った実験ケースを示す。実験ケースは、入射波振幅3種類 (0.50cm, 0.75cm, 1.00cm)、ウインチ制御量3種類 (非制御, 半制御, 全制御)、リピート回数4回の組み合わせとした。入射波振幅0.75cmは、長周期波に対する荷役限界波高約10～15cm⁶⁾を目標に拘束長周期波を発生できるように設定している。ウインチ制御量のうち、半制御とは係留索模型のナイロン索とワイヤ索の長さが同程度になるまでウインチを制御するケースを、全制御とは係留索長のほぼ全部がワイヤ索となるまでウインチを制御するケースを意味する。長周期動揺低減システムでは、基本的にはナイロン索とワイ

図-6 水理模型実験の状況

図-7 実験データの計測時間

ヤ索の長さの構成比率を変化させることにより係留船舶の長周期動揺を低減させるが、係留索にかかる張力を高くすればさらに動揺量が低減するものと考えられる。そこで、入射波振幅が0.75cmのケースについては、ウインチ制御量3種類に対してそれぞれ係留索にかかる張力を高くした場合も行った。ただし、これらのケースではリピート回数を6回とした。

図-6は、水理模型実験の状況を示したものである。模型船上には豆電球が3個置かれており、これらは3次元動揺計測システムの2台のCCDカメラによる動揺計測のためのターゲットである。これら3個の計測点のビデオ画像記録をコンピュータで画像解析して3次元的に処理することにより、係留船舶の動揺6成分の動揺量を時系列的に得ることができる。

4. 実験結果および考察

(1) 実験データの計測方法

水理模型実験におけるデータの計測時間について図-7に示す。造波機の作動開始と同時に実験データの計測を開始し、その後25分間連続して計測を行った。造波開始初期は水槽内の波浪場が過渡状態であるとして、全体計測時間の最初の5分間のデータを破棄し、その後の20分間をデータ解析に使用した。長周期動揺低減システムによりウインチ制御を実行するケースでは、造波開始から10分後に制御を開始した。ウインチ制御にかかる時間は、ウインチの巻取り・繰出し速度が $\pm 2.5\text{cm/s}$ であるため、計算上は、半制御のケースで約42s、全制御のケースで約84sとなる。

図-8 長周期波の波高（ケース7）

(2) 考察の方針

表-2に示した実験ケースの中で、まず、ケース7、ケース9、ケース10およびケース12の実験結果について考察する。これらのケースの実験結果を考察すれば、長周期動揺低減システムによる制御の影響および係留索の張力の影響について相互比較することができる。また、係留系の制御量の影響を評価するためにケース7、ケース8およびケース9の実験結果について、波高の影響を評価するためにケース3、ケース9およびケース6の実験結果について考察する。

係留索模型のうちナイロン索は、荷重の繰返し回数によって張力-歪み特性が異なってくるため、各ケースのリピート回数1回目の時点でナイロン索を新品に取り替えている。そこで、ここではリピート回数3回目のケースの実験結果を取り上げる。また、サージの動揺量データは、船上の3個の計測点での計測結果が全く同じであったことから、中央の計測点における結果を示す。実験結果は、図-7に示した解析部分のうち、ウインチ制御部分を含む最初から700s分を掲載する。

(3) 長周期波の波高

図-8は、ケース7について、ウェーブレット変換を用いて入射2成分波から計算して求めた拘束長周期波を示す。上から順に波高計1（造波機側）、波高計2（船舶中心位置）、波高計3（反射板側）の長周期波高を示すが、係留船舶の中心位置に近い波高計2の位置が重複波の節になっている。長周期波高は、現地換算で約11～12cmとなる。

(4) 制御量および係留索の張力の影響

（ケース7、ケース9、ケース10、ケース12）

図-9は、ケース7、ケース9、ケース10およびケース12のリピート回数3回目のサージの動揺量の時系列を示す。この図から、長周期動揺低減システムにより係留船舶の長周期動揺が効果的に低減しており、ウインチ制御を行わない場合でも係留索の張力を高くすることによって長周期動揺を低減可能であることがわかる。

図-9 サージの動揺量の時系列
(ケース7, ケース9, ケース10, ケース12)

図-10 サージの動揺量の統計値

図-11 サージの動揺周期の統計値

図-10および図-11は、それぞれサージの動揺量および動揺周期について、制御前と制御後の統計値の比を示したものである。ウインチ制御を行わないケース7の場合でもサージの動揺量が低減しているが、これは、ウインチ模型が完全に絶縁されておらず、微弱電流の影響により非常に低速でドラムが回転していたことが原因である。長周期動揺低減システムを用いると、約55～65%まで動揺量を低減させることができ、さらに係留索の張力を高くすれば、約5～10%まで動揺量を低減させることができる。

図-12 係留索の張力の時系列
(ケース7, ケース9, ケース10, ケース12)

また、係留索の張力を高くするだけでも動揺量を約35～40%まで低減可能である。一方、サージの動揺周期は制御前と比べて制御後はあまり減少しない。この理由として、長周期動揺低減システムにより係留系の固有周期が変化しても、規則波の場合と同じように拘束長周期波の周期で係留船舶が動揺するため、動揺周期が変わらないものと考えられる。このようにサージの動揺周期は変わらないが、係留系の固有周期と拘束長周期波の周期との比が変化したため、サージの動揺量が小さくなっている。

図-12は、ケース7、ケース9、ケース10およびケース12のウインチ模型3（船尾側の係留施設ウインチ）で計測した係留索の張力の時系列を示す。ここで、係留索の初期張力は、表-1に示した初期張力1.18Nを目標に調整している。長周期動揺低減システムを用いた場合はサージの動揺量が低減するため、制御後には張力が減少するという結果になり、係留索の安全性に関する長周期動揺低減システムの有効性が確認された。これに対し、係留索の張力を高くすると当然のことながら制御後の係留索張力が高くなるが、水理模型実験では係留索の許容荷重4.88Nを超えないように手動操作で張力を加えているため、係留索の張力は許容荷重内に収まっている。

(5) 制御量の影響（ケース7、ケース8、ケース9）

図-13は、ケース7、ケース8およびケース9のリピート回数3回目のサージの動揺量の時系列を示す。この図から、この波浪条件の場合、全制御による長周期動揺の低減効果は高いが、半制御による長周期動揺の低減効果は期待できないことがわかる。

図-14は、サージの動揺量について、制御前と制御後の統計値の比を示す。全制御の場合は、約55～65%まで動揺量を低減させることができるが、半制御の場合は、90%程度までしか動揺量を低減できていない。すなわち、長周期動揺低減システムの半制御は、長周期動揺の低減に効果的ではないと言える。

図-13 サージの動揺量の時系列
(ケース7, ケース8, ケース9)

図-15 サージの動揺量の時系列
(ケース3, ケース9, ケース6)

図-14 サージの動揺量の統計値

図-16 サージの動揺量の統計値

(6) 波高の影響 (ケース3, ケース9, ケース6)

図-15は、ケース3, ケース9およびケース6のリピート回数3回目のサージの動揺量の時系列を示す。この図から、入射波振幅が小さい場合や大きい場合でも、長周期動揺低減システムを用いると、係留船舶の長周期動揺を低減可能であることがわかる。ただし、入射波振幅0.50cmの場合は、大振幅の長周期動揺が発生していないことに注意する必要がある。

図-16は、サージの動揺量について、制御前と制御後の統計値の比を示す。この図によると、入射波振幅0.75cmの場合は約55～65%までしか動揺量を低減できず、約25%まで動揺量を低減できている入射波振幅1.00cmの場合と比較して、長周期動揺が効果的に低減されていないように見える。しかしながら、図-15を見ると、両ケースとも制御後の動揺量の大きさは約4cmであり、制御前の長周期動揺量の大きさによらず同程度まで動揺量を低減できるものと考えられる。

5. まとめ

- 1) 長周期波による係留船舶の長周期動揺を効果的に低減させる長周期動揺低減システムを開発し、長周期波対策工法の一方法として提案した。
- 2) 長周期動揺低減システムの有効性を基礎的な物理模型実験により検証した結果、本システムを

用いることによって、係留船舶の長周期動揺を効果的に低減できることが確認できた。

- 3) 係留系の制御量、係留索の張力、波高のパラメータは、長周期動揺低減システムによる係留船舶の長周期動揺の低減効果に大きく影響を与えることがわかった。

参考文献

- 1) 平石哲也, 白石悟, 永井紀彦, 横田弘, 松渕知, 藤咲秀可, 清水勝義: 長周期波による港湾施設の被害特性とその対策工法に関する調査, 港湾技研資料, No.873, 39p., 1997.
- 2) Shiraishi, S.: Low-frequency ship motions due to long-period waves in harbors, and modifications to mooring systems that inhibit such motions, *Rept. Port and Harbour Res. Inst.*, Vol.37, No.4, pp.37-78, 1998.
- 3) 白石悟, 久保雅義, 上田茂, 榊原繁樹: 係留システムに着目した長周期波に対する船舶の動揺抑制対策, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.941-945, 1995.
- 4) Wilson, B.W.: Elastic characteristics of mooring ropes, *NATO Advanced Study Institute on Analytical Treatment of Problems in the Berthing and Mooring of Ships*, pp.41-64, 1973.
- 5) 関本恒浩, 森屋陽一, 中山晋一: 長周期波による港内係留船舶の動揺とその制御, 五洋建設技術年報, Vol.29, pp.77-86, 1999.
- 6) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 上巻, pp.129-131, 1999.