

港湾空港技術研究所 資料

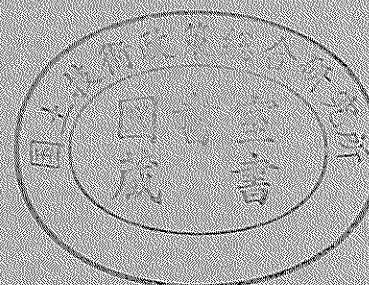
TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1056 September 2003

係留索による長周期動揺低減システムの開発
— 模型実験および試設計 —

米 山 治 男
佐 藤 平 和
白 石 悟

独立行政法人 港湾空港技術研究所
Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan



目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 研究の内容	4
3. システム設計	5
3.1 係留船舶の長周期動揺の低減方法	5
3.2 長周期動揺低減システム の概念	6
3.3 水理模型実験のための長周期動揺低減システムのシステム設計	7
4. 実験模型製作	10
4.1 模型製作の内容	10
4.2 係留索の選定	11
4.3 係留索の検定	11
4.4 係留系設置架台およびウインチ模型	13
5. 水理模型実験	13
5.1 実験概要	13
5.2 実験模型の配置	13
5.3 実験ケースおよび計測データ	14
5.4 実験状況	15
5.5 実験結果および考察	15
6. 実機試設計	21
6.1 実機試設計の内容	21
6.2 実機システムの概略設計	21
6.3 実機システムの試設計	25
6.4 実機システムの設置費	28
7. まとめ	29
8. あとがき	29
謝辞	29
参考文献	29

**Development of a Reduction System Using Mooring Ropes
for Low-Frequency Ship Motions
- Model Experiments and Trial Designs -**

Haruo YONEYAMA*
Hirakazu SATOH**
Satoru SHIRAISHI***

Synopsis

It is widely said that the decrease in cargo handling efficiency due to long period waves is mainly caused by low-frequency ship motions in the longitudinal direction of a moored ship. It is generally considered that the low-frequency ship motions are generated by the resonance phenomenon of the mooring system and the low-frequency fluctuation of water level inside a harbor. The mooring system consists of the moored ship and mooring ropes.

In this study, the authors developed a reduction system of low-frequency ship motions by using mooring ropes. This system is capable of effectively reducing the low-frequency motions of the moored ship. The authors also proposed the system as one construction method for countermeasures against long period waves. The reduction system of low-frequency ship motions can reduce the surge motions of the moored ship by preventing the resonance with the long period waves. This is implemented by forcibly changing the natural period of the mooring system with the mooring winches automatically controlled by a personal computer. In this study, the authors verified the effectiveness of the reduction system of low-frequency ship motions by the fundamental model experiments, and carried out the trial designs of an actual system in consideration for on-site applications.

Key Words: long period waves, moored ship, low-frequency motion, mooring system, motion reduction, wharf operation efficiency

* Head of Offshore Structures Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

** Kanto Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport

Former Member of Offshore Structures Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

*** Coastal Development Institute of Technology

Former Head of Offshore Structures Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5060 Fax : +81-46-844-0255 e-mail:yoneyama@pari.go.jp

係留索による長周期動揺低減システムの開発

－模型実験および試設計－

米山 治男*
佐藤 平和**
白石 悟***

要 旨

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。

本研究では、このような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し、長周期波対策工法の一つの方法として提案する。係留船舶の長周期動揺低減システムは、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。本研究では、係留船舶の長周期動揺低減システムの有効性を基礎的な水理模型実験により検証するとともに、本システムを現場に適用するための実機システムの試設計について検討している。

キーワード：長周期波，係留船舶，長周期動揺，係留システム，動揺低減，荷役稼働率

* 地盤・構造部海洋構造研究室長

** 国土交通省関東地方整備局（前 地盤・構造部海洋構造研究室）

*** 財団法人沿岸開発技術研究センター（前 地盤・構造部海洋構造研究室長）

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5060 Fax：046-844-0255 e-mail:yoneyama@pari.go.jp

1. まえがき

我が国のコンテナ船、フェリー等のターミナルは従来、内湾の静穏な港湾に立地していたが、船舶の大型化あるいは輸送時間の短縮等の要請から、外洋に面した港湾に立地することも必要となってきた。ところが、このような外洋性の港湾では、波浪の中でも特に長周期波の影響による係留船舶の長周期動揺が顕著となる場合があり、荷役の中止・中断あるいは係留索の破断といった荷役障害が発生することがしばしば指摘されている。特に、うねりや長周期波の波浪が進入しやすい形状の外洋性港湾で、コンテナバースやフェリーターミナルのような荷役時の動揺量の制限値が厳しい船舶を係留するバースにおいて、係留船舶の荷役障害の事例が数多く報告されている（例えば、平石ら，1997）。荷役障害が頻繁に発生するバースを有する港湾では、バースの荷役稼働率が低下することにより港湾物流が停滞し、港湾の価値自体も低下することになるため早急な対策が必要である。図-1は、このような外洋性港湾のターミナル整備における荷役稼働率の問題の概要を示したものである。

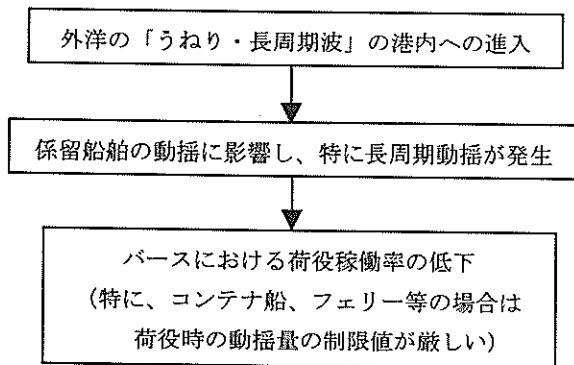


図-1 外洋性港湾における荷役稼働率の問題

長周期波の影響によるコンテナ船あるいはフェリー等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されている。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（平石ら，1997；Shiraishi，1998）。1) は、

防波堤を延伸することによりバース前面の波高を低減させる方法であるが、防波堤建造費が高く、十分な効果が得られるまでに長期間を要することが欠点である。また、2) は、緩傾斜護岸を設けるなどして港湾形状を変更し、多重反射によるバース前面の波高増幅を低減させる方法であるが、1)と同様に建設費が高いことや対象バース以外の他のバースにおいて波高が増幅する可能性があることが問題である。一方、4) は、1)～3)のようなハード的な対策ではなく、長周期波の発生を予測して荷役可否の判定をあらかじめ行うことにより、荷役障害が発生する可能性がある場合には船舶の着積を行わないというソフト的な対策であり、直接的に荷役稼働率の向上を達成する方法ではない。これらの対策に対し、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、1)および2)と比較して安価にかつ短期間で効果が得られるという長所がある。

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。係留船舶の長周期動揺低減システムは、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。具体的には、ナイロン索およびワイヤ索の2種類の係留索を接続した合成係留索を船舶の係留に使用し、ナイロン索とワイヤ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により、係留系のばね定数すなわち固有周期を長周期波周期から外れるように変化させ、長周期動揺の低減を実現する。係留船舶の長周期動揺低減システムは全く新しい発想に基づくシステムであるため、本研究では、水理模型実験により係留船舶の長周期動揺の低減効果について検討するとともに、現場に適用する場合の実機システムの試設計を行っている。

2. 研究の内容

本研究における検討項目および研究の流れは、図-2に示すとおりである。図中の（ ）内は、本資料で対応する章を表している。

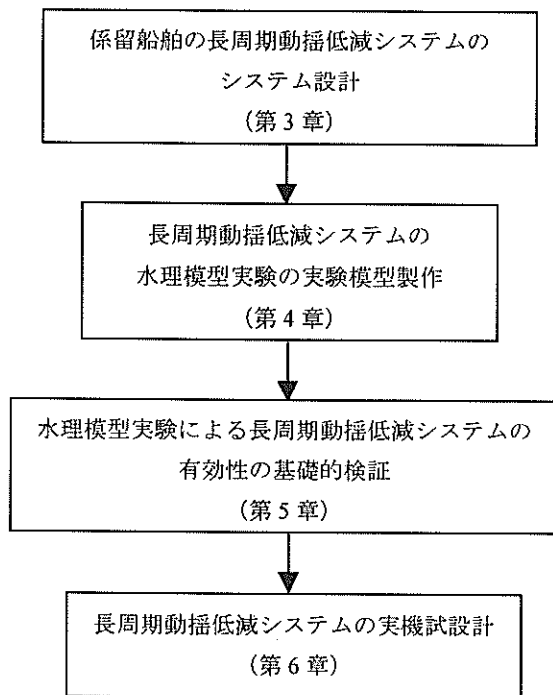


図-2 研究項目および研究の流れ

本研究では、まず、係留船舶の長周期動揺低減システムの基本的概念として、コンピュータで係留系の固有周期を自動調整することにより、長周期波の卓越周期と船舶の係留系の固有周期の一致による係留船舶の長周期動揺を低減させる方法を考案した。次に、実際の現場で用いる長周期動揺低減システムの機能を部分的にモデル化して、水理模型実験に対応したシステムの設計を行った。続いて、長周期動揺低減システムの水理模型実験用のシステム設計を基にして、実験用模型を製作した。そして、長周期動揺低減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、本システムによる係留船舶の長周期動揺低減効果を確認した。また、長周期動揺低減システムの実用化に資することを目的として、実機システムの試設計を実施した。

3. システム設計

3.1 係留船舶の長周期動揺の低減方法

係留船舶の動揺を低減させるためには、長周期波による波浪外力を小さくする方法、係留船舶の動揺に対する減衰力を増加させる方法、船舶と係留索で構成される係留系の固有周期を長周期波の卓越周期からずらす方法、係留索のばね定数を増加させて静的変位を低減させる方法等があると考えられる。この中で、波浪外力を小さくする方法は、防波堤の延伸や港内における緩傾斜護岸の

設置等による方法であるが、建設に要する費用や時間がかかるという問題がある。また、係留船舶の動揺に対する減衰力を増加させる方法として、船舶本体に何らかの減衰機構を付加することが考えられるが、外洋を航行する船舶の減衰抵抗は小さい方がよいことから、船舶の運航上、現実的ではない。そこで、係留索にダッシュポットのような減衰機構を付加する方法が提案されている(久保, 1985)が、実機設備が大規模なものになるために実用には至っていない。

一方、係留系の固有周期を長周期波の卓越周期からずらす方法では、係留系の固有周期が船舶の重量と係留索のばね定数の関係から決まることから、これらのどちらかを変更すればよい。しかしながら、船舶の重量を変えることは実際には困難であるため、係留索のばね定数を増加させる方策が一般的に採られる。したがって、この方法は、係留索のばね定数を増加させて静的変位を低減させる方法と同じ方法ということになる。係留索のばね定数を増加させるには、ワイヤ索等の硬い係留索を使用する方法があるが、このような硬い係留索では伸び量が小さいため、係留船舶の動揺が小さい場合でも係留索の切断の可能性がある。また、係留系の固有周期を長周期波の卓越周期からずらすという観点から見ると、港内波浪のスペクトル特性に注意することが必要である。すなわち、波浪スペクトルの特定の周波数帯にエネルギーの高い領域があれば、その領域を避けることで係留船舶の動揺低減を図ることが可能である。ところが、このような周波数帯が明確に判別できない場合は、係留系の固有周期を長周期波の卓越周期からずらすことから得られる動揺低減効果はあまり期待できない。さらに、係留系の固有周期が短くなりすぎると、うねりや風波の短周期側の波浪の卓越周期と係留系の固有周期が一致する場合もある。したがって、係留索のばね定数を増加させる方法を用いるときには、港内波浪のスペクトル特性や係留索の張力等を十分考慮して、適切な係留系の固有周期が実現できるように係留索の設定を行う必要がある。この方法については、石炭運搬船を係留する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(白石ら, 1995)。

以上のことから考えると、係留索のばね定数を増加させ、係留系の固有周期を長周期波の卓越周期からずらす方法は、適用上、いくつかの注意すべき点があるものの、十分に実用的な方法であると言える。本研究では、この係留系の固有周期の変更による方法を発展させ、より積極的、能動的かつ効率的に係留船舶の長周期動揺を低減させる長周期動揺低減システムを構築する。

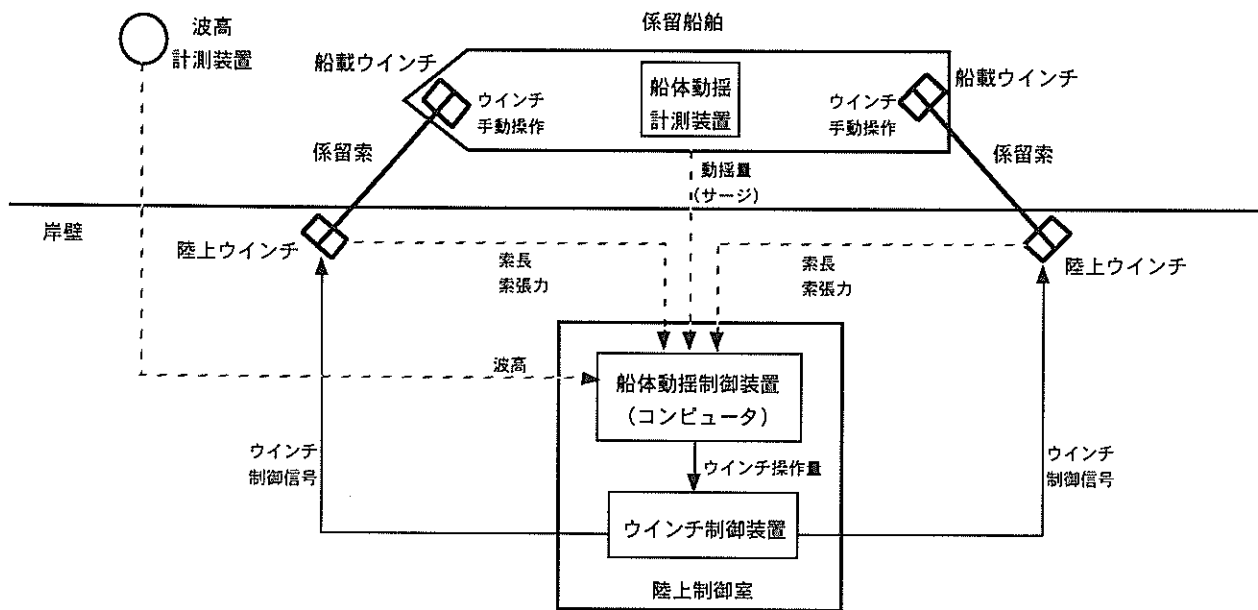


図-3 係留船舶の長周期動揺低減システム概念図

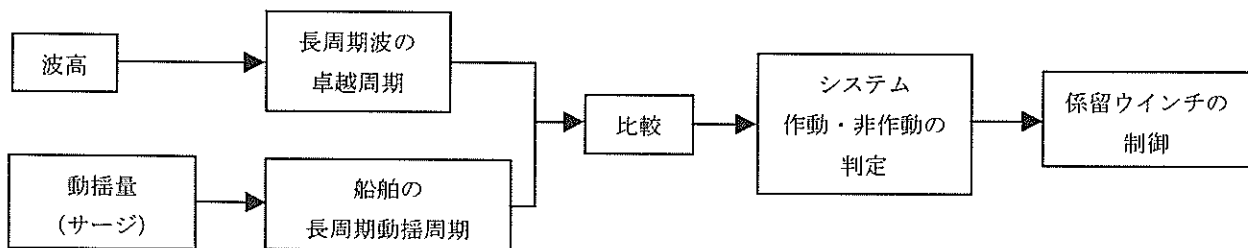


図-4 係留ウインチ制御のブロック図

3.2 長周期動揺低減システム概念

係留船舶の長周期動揺低減システムは、船舶と係留索から構成される係留系の固有周期を係留ウインチにより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、係留船舶の動揺低減を図るシステムである。図-3に係留船舶の長周期動揺低減システム概念図を示す。また、図-4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、係留索(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留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。このように係留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増え、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。

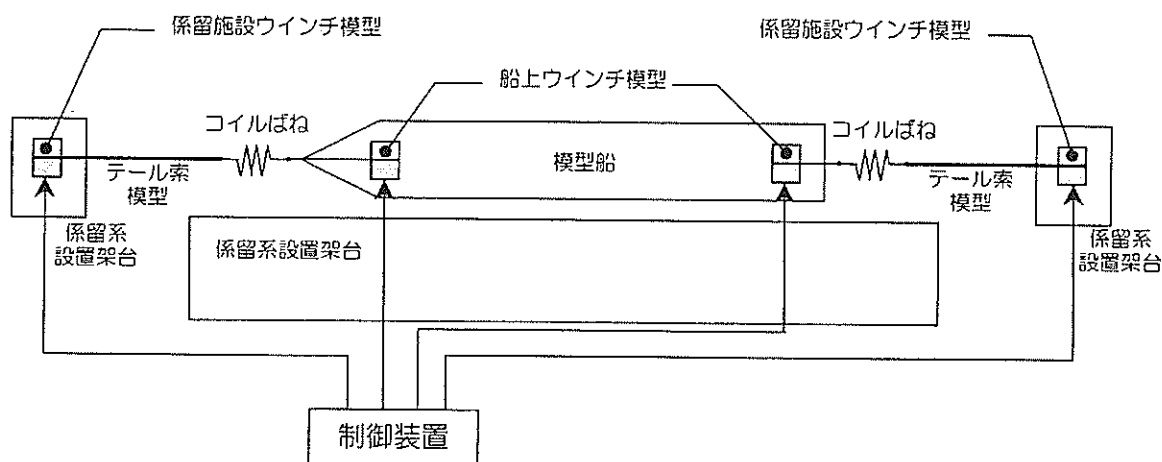


図-5 水理模型実験における長周期動揺低減システムの概念図

3.3 水理模型実験のための長周期動揺低減システムのシステム設計

(1) 概要

係留船舶の長周期動揺低減システムの有効性については、水理模型実験により検証した。水理模型実験では、実際の現場で用いる長周期動揺低減システムの機能を完全にモデル化することが困難であったため、本研究では、水理模型実験に対応した長周期動揺低減システムのシステム設計を行った。したがって、長周期動揺低減システムを現場に適用するための実機システムの試設計は、このシステム設計とは別に実施している。

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手動制御とした。図-5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、係留索模型およびウインチ制御装置から構成される。ウインチ模型およびウインチ制御装置は既存のもの（米山ら、1996、1999）を用い、また、ナイロン索、コイルばねおよびワイヤ索から構成される係留索模型は既製品を用いている。したがって、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。このばね定数調整機構は、コイルばねを介してナイロン索とワイヤ索を直列に繋ぎ合わせ、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とワイヤ索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適切に調整するものである。

(2) 実験模型

実験模型のスケールは1/50とし、模型船、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、ウインチ制御装置および係留系設置架台から構成される。実験模型の配置図を図-6に示す。また、表-1に実験条件および模型特性を示す。

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。この制御時の係留系の固有周期50sは、風波やうねりの卓越周期である5～15sよりも大きいため、これらの波浪成分の卓越周期と制御時の係留系の固有周期が一致することはない。

また、係留系のばね定数は次式で計算した。

$$K = M(1+m) \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 K ：ばね定数（kN/m）、 T ：係留系の固有周期（s）、 $M (=W/g)$ ：船舶の質量（ $\text{kN}\cdot\text{s}^2/\text{m}$ ）、 W ：船舶の重量（kN）、 g ：重力加速度（ m/s^2 ）、 m ：付加質量係数、である。サージの付加質量係数は、一般的に0.1～0.2であるが、ここでは $m=0.1$ とした。

また、係留索の最大張力は初期張力と変動張力の和として計算されると仮定し、係留索の変動張力は次式で計算することとした。

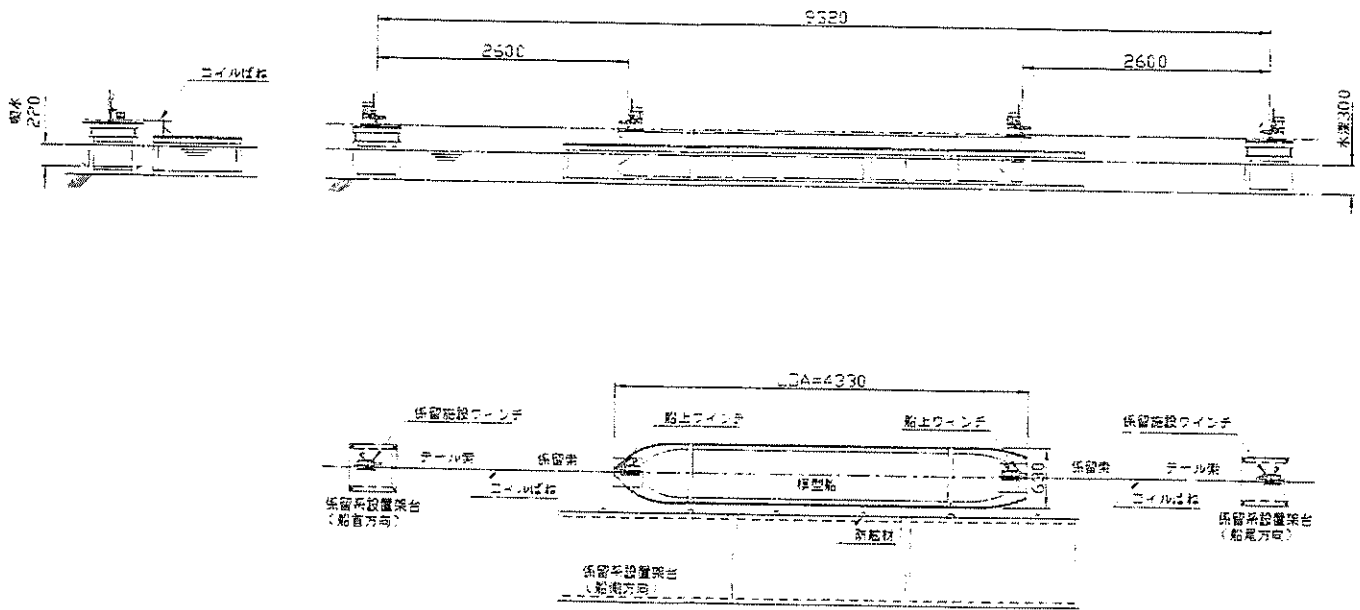


図-6 実験模型の配置図

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 ()内は, 50,000DWT コンテナ船の諸元	全長 (m)	216.5 (280.0)	4.33
	垂線間長 (m)	193.5 (264.0)	3.87
	船幅 (m)	31.5 (37.1)	0.63
	喫水 (m)	11.0 (8.29*)	0.22
	排水量 (t)	48,000 (48,801)	0.384
係留系の固有周期 (s)	非制御時	150	21.2
	制御時	50	7.1
係留系のばね定数 K	非制御時	92.61 kN/m	37.04 N/m
	制御時	833.20 kN/m	333.28 N/m
係留索	初期張力	147 kN	1.18 N
	破断張力	1,960 kN	15.68 N
	最大張力	611 kN	4.88 N

* バラスト状態の値

$$T_{\max} = T_0 + T_f \quad (2)$$

$$T_f = \frac{K x_{\max}}{2} \quad (3)$$

ここで, T_{\max} : 係留索の最大張力 (kN), T_0 : 係留索の初期張力 (kN), T_f : 係留索の変動張力 (kN), K : 係留系のばね定数 (非制御時) (kN/m), x_{\max} : サージの最大振幅 (m), である. なお, サージの最大振幅 x_{\max} は, 実機において10m (模型換算値: 0.2m) と仮定した.

(3) 模型船

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ている. 本研究では, コンテナ船ではない1/50縮尺の既存模型船を用いるものとしたが, 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た.

(4) 係留系設置架台

船首方向と船尾方向の係留施設ウインチ模型を搭載する架台2台と, 船側方向の係留用架台1式を用いるものとし, 架台による波の変形が極力抑えられるフレーム構造として設計した.

表-2 ウインチ模型およびウインチ制御装置の仕様

ウインチ模型の仕様		ウインチ制御装置の仕様	
最大巻取り速度	±2.5cm/s	制御方式	回転速度制御 (DCサーボ回路)
最大巻取り力	9.8N	速度指令方法	CPU/手動 (スイッチ切り替え)
最大巻取り量	約 2.0m	指令入力電圧	±5.0V
巻取り量検出器	10 回転型ポテンシオメータ	速度設定方法	ポテンシオメータ+マルチダイヤル
張力検出器	精密ヒーム型ロードセル (定格: 98.0N)	巻取り速度精度	±1.0mm/s 以下

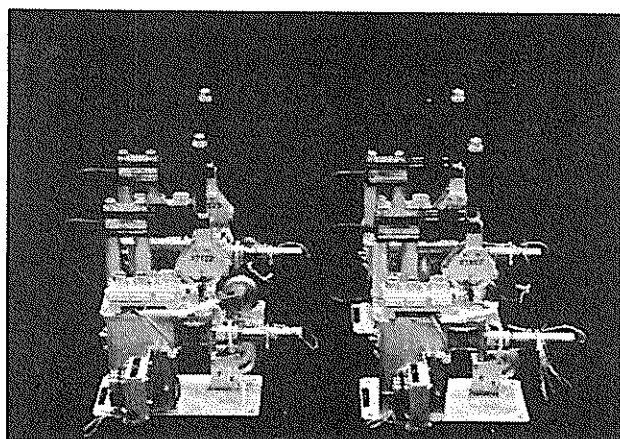


図-7 ウインチ模型

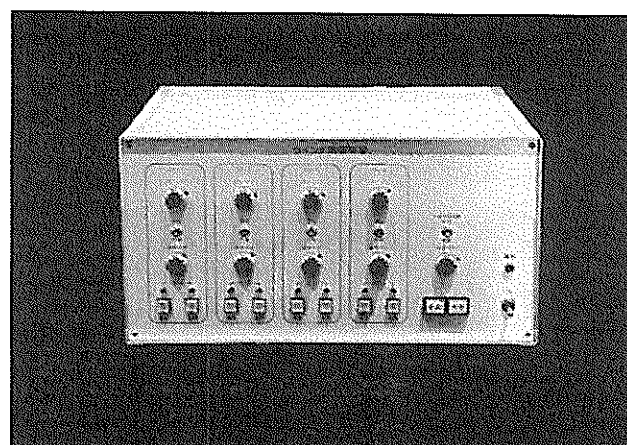


図-8 ウインチ制御装置

(5) ウインチ模型およびウインチ制御装置

ナイロン索の巻上げ・繰出しを行うために模型船上に設置する船上ウインチ模型2台と、ワイヤ索の巻上げ・繰出しを行うために船首方向と船尾方向の係留系設置架台上に設置する係留施設ウインチ模型2台を使用する。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た既存品を改良して用いた。また、船上ウインチ模型2台と係留施設ウインチ模型2台を同時に制御するために、コンピュータによる自動制御および手動制御の切替えスイッチを備えたウインチ制御装置を使用する。ウインチ制御装置も既存品を活用する。既存ウインチ模型および既存ウインチ制御装置の仕様を表-2に示す。また、ウインチ模型およびウインチ制御装置の写真を図-7および図-8に示す。

(6) ばね定数調整機構

係留系の係留索模型は、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。ばね定数調整機構では、ウインチ制御装置により駆動させたウインチ模型により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でばね定数を調整することとした。図-9にばね定数調整機構の概念図を示す。

模型実験における係留系のばね定数は次式で求められる。

$$K = \frac{2k_1k_2k_3}{k_1k_2 + k_2k_3 + k_3k_1} \quad (4)$$

ここで、 k_1 : コイルばねのばね定数 (kN/m), k_2 ($= E_2A_2/L_2$) : ナイロン索の伸びばね定数 (kN/m), E_2 : ナイロン索の縦弾性係数 (kN/m²), A_2 : ナイロン索の断面積 (m²), L_2 : ナイロン索の長さ (m), k_3 ($= E_3A_3/L_3$) : ワイヤ索の伸びばね定数 (kN/m), E_3 : ワイヤ索の縦弾性係数 (kN/m²), A_3 : ワイヤ索の断面積 (m²), L_3 : ワイヤ索の長さ (m), である。

式(1)で計算される係留系のばね定数と式(4)で計算されるばね定数が非制御時および制御時において一致するように、ナイロン索、コイルばねおよびワイヤ索の選定を行う必要がある。

以上の考え方で設定した水理模型実験における係留系のばね定数調整機構の特性例を図-10に示す。ここでは、ナイロン索の変位復元力特性を線形と仮定して計算を行っているが、実験の実施時には、ナイロン索の張力-歪み特性の検定を事前に行い、その結果を考慮する必要がある。

(7) 計測機器

水理模型実験では、以下の計測機器によりデータを計測することとした。

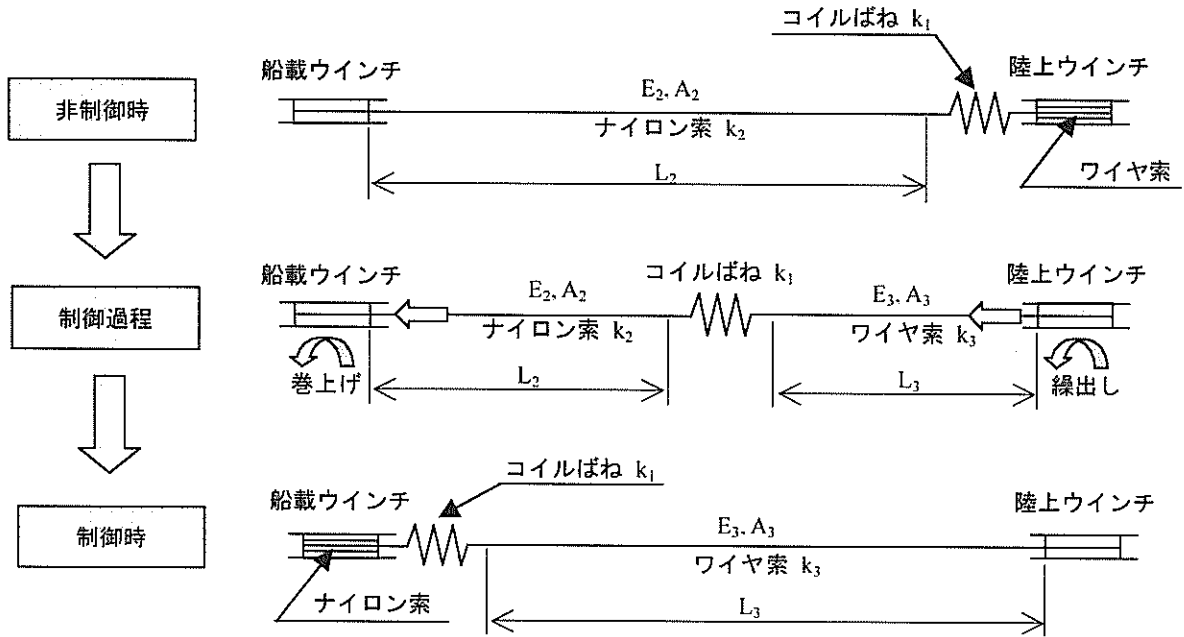


図-9 ばね定数調整機構の概念図

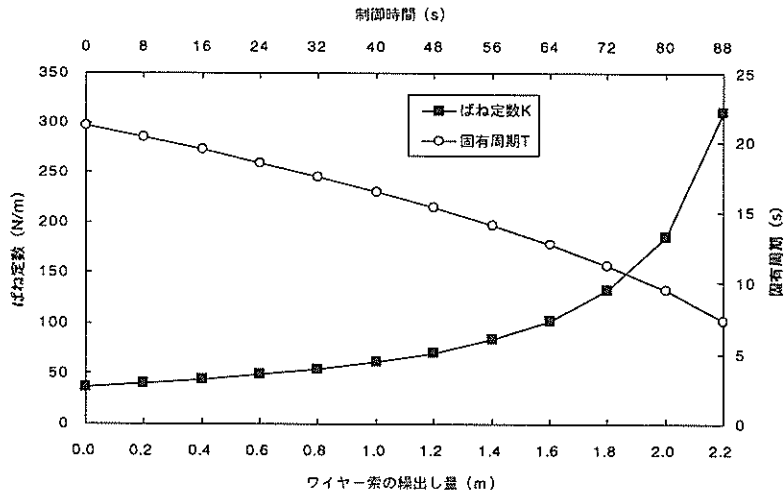


図-10 ばね定数調整機構の特性例

- ・容量式波高計 入射波の波高
- ・係留船舶の動揺量 3次元動揺計測システム
- ・係留索張力 ロードセル (ウインチ模型)
- ・係留索変位 ポテンショメータ (ウインチ模型)

3次元動揺計測システムとは、浮体上のマーカー (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。

4. 実験模型製作

4.1 模型製作の内容

実験模型の製作は、水理模型実験のための長周期動揺低減システムのシステム設計に基づいて、以下に示す内容について実施した。

①係留索の選定

ばね定数調整機構で用いる係留索 (ナイロン索, コイルばね, ワイヤ索) を選定する。

②係留索の検定

表-3 コイルばねの仕様

引張コイルバネ：3種類

No.	自由長 (cm)	外径 (cm)	バネ定数 (N/m)	許容荷重 (N)	最大長 (cm)	初張力 (N)	伸び代 (cm)
1	12.1	2.2	156.8	42.14	33.8	6.27	21.7
2	14.2	2.2	127.4	42.14	41.6	6.27	27.4
3	13.9	2.0	147.0	37.24	34.0	7.15	20.1

表-4 ワイヤ索の仕様

SUSワイヤ：1種類

構成	7本線6より
直径	0.63mm

表-5 ナイロン索の仕様

ナイロンハリス：4種類

No.	号数	標準直径(mm)
1	0.8	0.148
2	1	0.165
3	1.2	0.185
4	1.5	0.205

長周期動揺低減システムのばね定数調整機構として用いるための係留索の検定を行う。ナイロン索、コイルばねの荷重と伸びの関係を検定して張力-歪み特性を求め、その結果を取りまとめる。

③係留系設置架台の製作

係留系設置架台を以下に示す2種類について計5台製作する。

- ・係留施設ウインチ模型用 2台
- ・係船岸壁 3台

④模型船、ウインチ模型およびウインチ制御装置の改良

模型船は、既存模型船のブリッジ等の上部構造を取り払い、ウインチ模型が設置できるように水平な甲板に改造する。ウインチ模型は、係留索の巻取りおよび計測が3mの長さまで行えるように、ウインチドラムおよびポテンショメータを改良する。また、ウインチ制御装置は、同時に4台のウインチ模型を手動制御できるように改良する。

4.2 係留索の選定

表-3～表-5に選定したコイルばね、ワイヤ索およびナイロン索の仕様をそれぞれ示す。長周期動揺低減システムのシステム設計で設定した実験条件および模型特性を満足する最適な組み合わせは、ナイロン索No.2、コイルばねNo.1、ワイヤ索の構成である。しかしながら、模型実験において係留船舶の長周期動揺が再現できない場合や係留索の破断が発生しやすい場合等の不慮の事故を想

定して、その他のナイロン索およびコイルばねも選定した。

4.3 係留索の検定

(1) 検定結果および考察

表-5に示した自然長1.5mのナイロン索の荷重と伸びの関係を検定した。なお、ナイロン索0.6号についても参考のために検定を行った。検定結果を図-11に示す。図は荷重75gをかけた時の長さからの伸びを示している。ばね定数は、ナイロン索の自然長に反比例する。そこで、図-12は、水理模型実験で使用する自然長2.2mに換算した場合のばね定数を図-11から求めたものである。ばね定数には変動が見られるが、平均的には荷重の増加とともにばね定数が大きくなっていることがわかる。変動の影響を除くために、図-11の曲線を平滑化して再度ばね定数を求めた。平滑化した荷重と伸びの関係を図-13に、これから求めた自然長2.2mに換算した場合のばね定数を図-14に示す。荷重が小さい場合には、ナイロン索が太くなるほどばね定数も大きくなるが、荷重が増加すると太さとばね定数の関係は顕著でなくなることがわかる。以上のように、ナイロン索の変位復元力特性は非線形な特性を示しているが、荷重の変動が小さい範囲内ではその変位復元力特性を線形と仮定してもよいと考えられる。

また、荷重を取り去った後に残るナイロン索の伸びを計測した。最初にナイロン索に荷重をかけ、そのままの状態ですばらく放置した後に荷重を取り去ってナイロン索の長さを計測し、自然長からの伸びを求めた。荷重はナイロン索0.6号の場合には540g、その他の場合には1,005gとした。計測結果を表-6に示す。この計測結果から、実験に用いるナイロン索1号の場合には、荷重1,005gに対して3%程度の伸びが生じることがわかる。ここで示したナイロン索の伸びは、静的荷重に対するナイロン索の硬化を表している。

コイルばねについては、検査成績書を基にばね定数を計算し、表-3に示したばね定数の仕様値と一致していることを確認した。

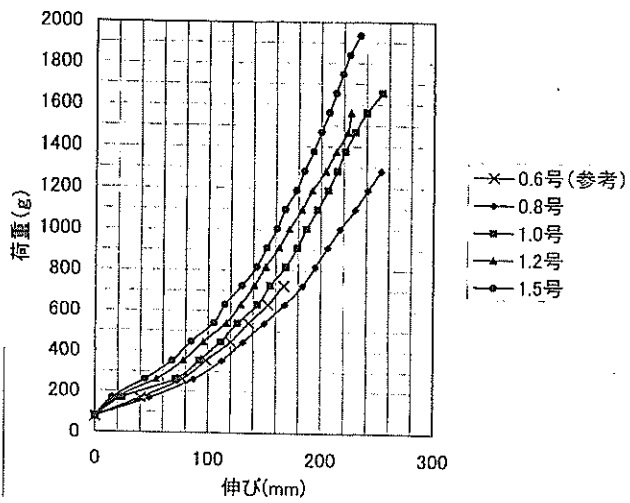


図-11 ナイロン索の伸びと荷重の関係

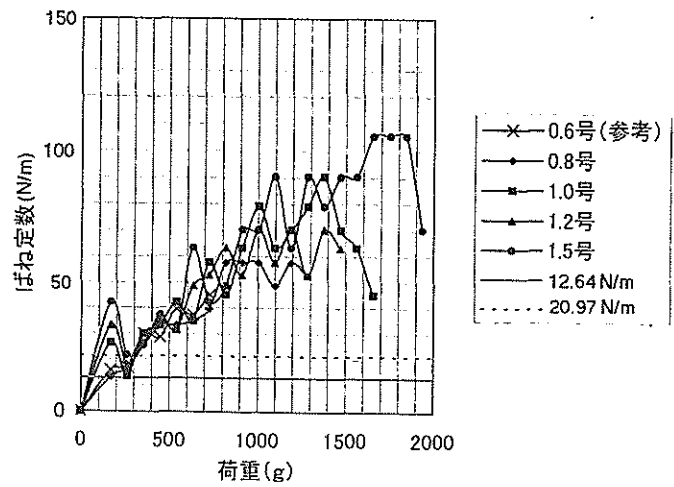


図-12 ナイロン索のばね定数(自然長2.2m換算)

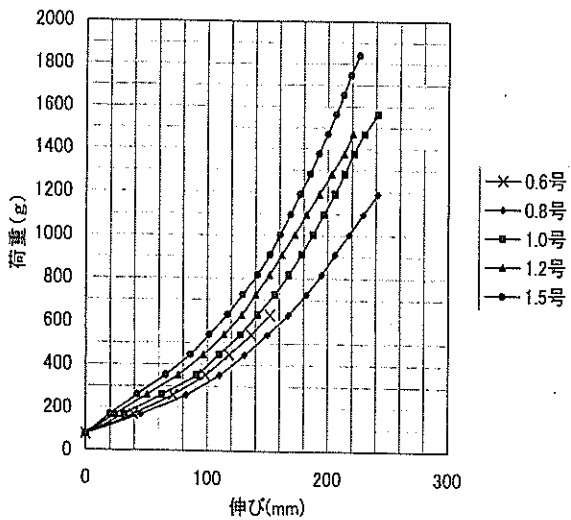


図-13 ナイロン索の伸びと荷重の関係(平滑化)

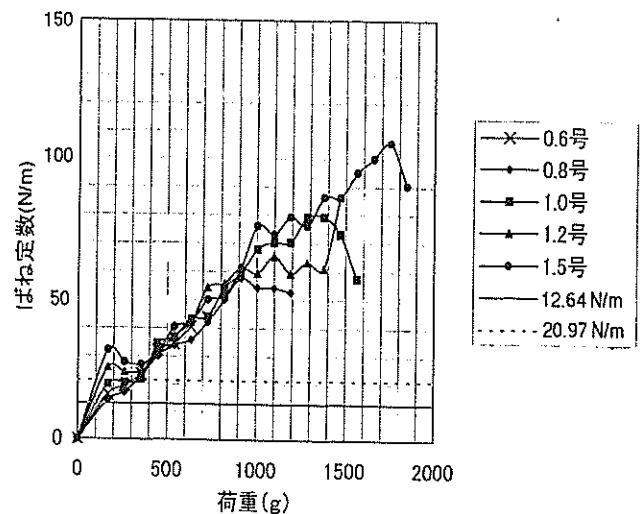


図-14 ナイロン索のばね定数(自然長2.2m換算)(平滑化)

表-6 ナイロン索の荷重除去後の伸び

ナイロン索	伸び (mm)	(伸び/自然長)×100 (%)
0.6号	46	3.0
0.8号	69	4.6
1号	48	3.2
1.2号	39	2.6
1.5号	30	2.0

(2) 係留索の硬化の影響

係留索の変位復元力特性は、繰り返し使用した状態で硬化することにより特性が変化する。Wilson (1973) は、係留索を繰り返し引っ張ると、その変位復元力特性が大きく異なることを示している。また、Shiraishi (1998) は実験室の中で実施した係留索の繰り返し引張試験の結果を示している。この試験結果によると、繰り返し引張

試験を行うことで係留索の剛性は硬くなり、引張強度は最大で約1/2程度まで低下している。また、実際に供用されている係留索はフェアリーダー等による摩擦により、さらに強度が低下していることもあると考えられる(鶴田ら, 1986)。

一方、笹ら(1999)は、外洋に面した港湾で船舶の動揺を観測した事例について係留船舶の動揺シミュレーションによりその動揺特性の再現を試みている。この検討では、係留索の初期の特性を用いて計算した結果と係留索の特性硬化を考慮した特性で計算した結果とを比較すると、後者の方が観測値に近いことが示されている。すなわち、係留索の繰り返し使用による硬化の影響を考慮した方が、動揺シミュレーションにおけるサージの動揺の再現性を向上できる可能性があると言える。

以上のように係留索の変位復元力特性の硬化の影響について研究されてきているが、実際に使用状況にある係留索の特性についてはあまり調査されていないのが現状である。本研究では、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と、十分注意して実験を実施することとした。

4.4 係留系設置架台およびウインチ模型

製作した係留系設置架台を図-15および図-16に示す。また、改良したウインチ模型を図-17に示す。

5. 水理模型実験

5.1 実験概要

港湾空港技術研究所所有の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。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。このようにすることで、長周期波を発生させることができない平面水槽でも、長周期動揺低減システムの有効性を評価することが可能となった。

5.2 実験模型の配置

図-18は平面水槽内の実験模型の設置位置を示す。また、図-19は実験模型の配置の詳細な諸元を示す。

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。このとき発生する長周期波の波長は、実験水深が0.3mで浅いことから長波として計算でき、約36.4mとなる。平面水槽内には反射板により重複波が生成されるので、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(関本ら, 1999)。この節の位置は反射板から1/4波長離れた地点であるから、反射板から $36.4\text{m}/4=9.1\text{m}$ の位置に模型船の中心がくるように実験模型を配置した。なお、2成分波は船首方向からの入射とし、反射板からの反射波を造波板で吸収する吸収制御造波を行っている。

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台ほど等間隔に設置した。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

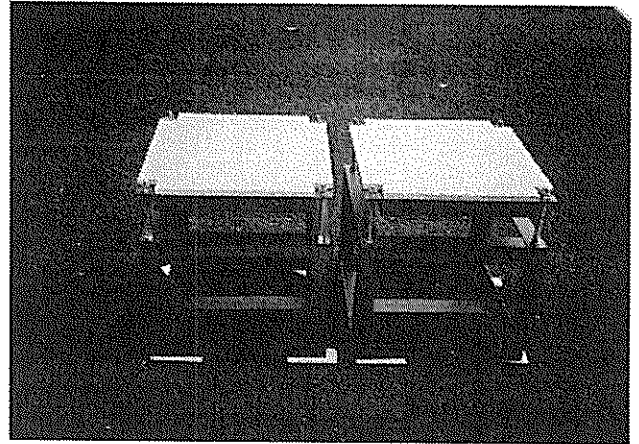


図-15 係留系設置架台 (係留施設ウインチ模型用)

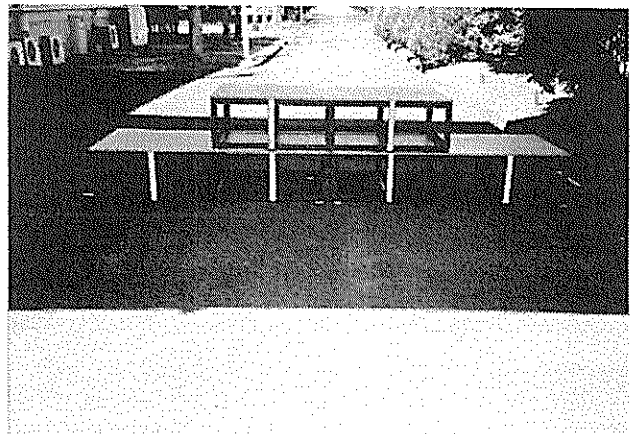


図-16 係留系設置架台 (係船岸壁)

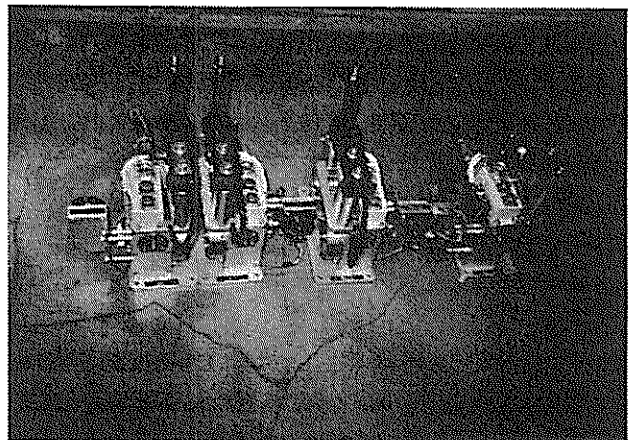


図-17 ウインチ模型

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パーソナルコンピュータ、またウインチ制御装置等の各装置を配備した。

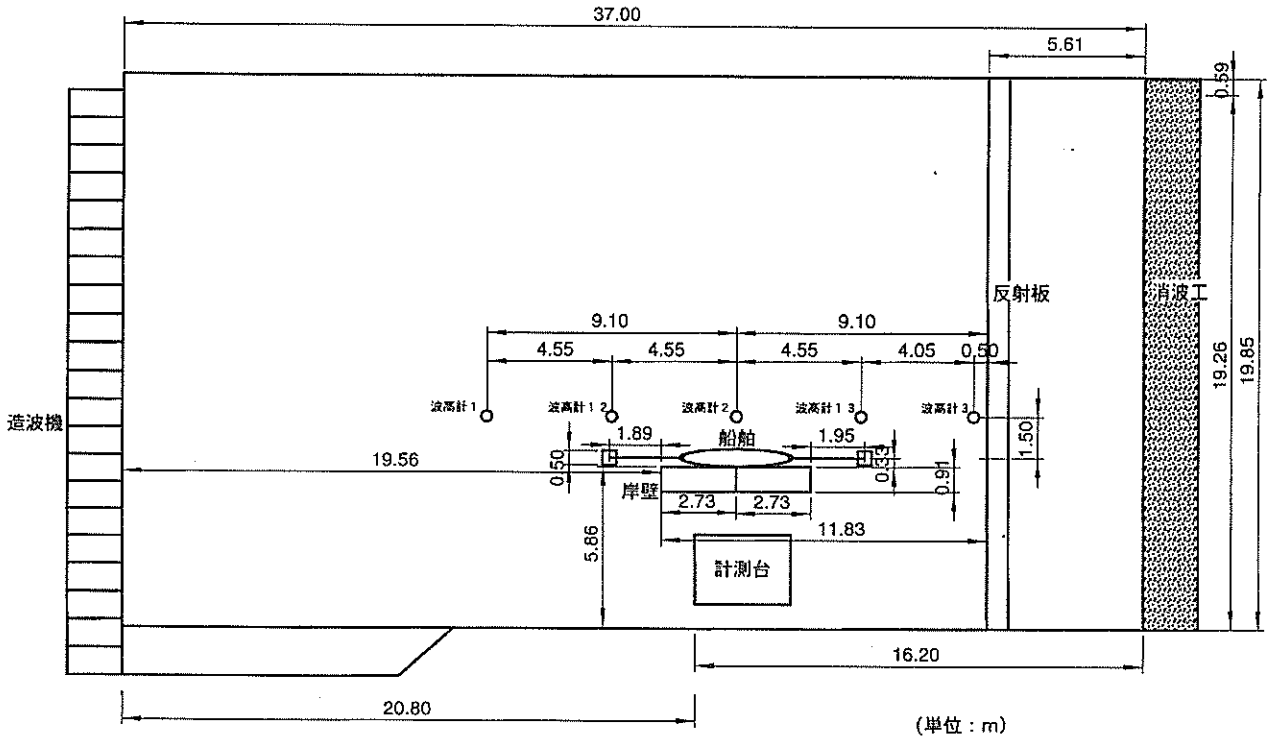


図-18 水槽内の実験模型の設置位置

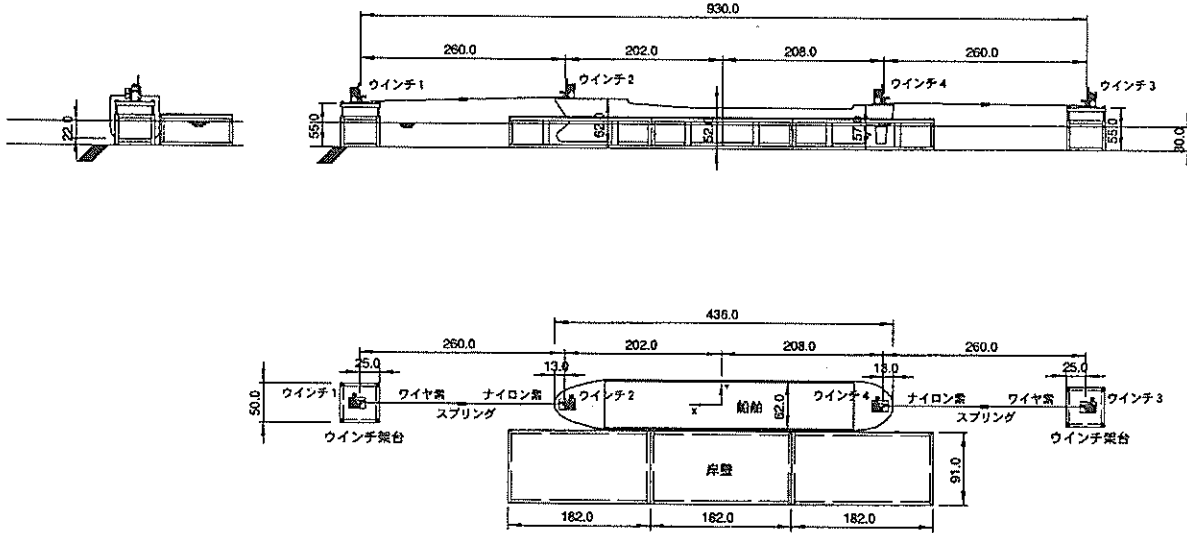


図-19 実験模型の配置の諸元

5.3 実験ケースおよび計測データ

表-7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 (0.5cm, 0.75cm, 1.0cm), ウインチ制御量3種類 (制御せず, 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10~15cm (日本港

湾協会, 1999) 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

表-7 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	0.5cm	制御せず	4回	通常制御
case2		半制御		
case3		全制御		
case4	1.0cm	制御せず		
case5		半制御		
case6		全制御		
case7	0.75cm	制御せず		
case8		半制御		
case9		全制御		
case10	0.75cm	制御せず	6回	張力増加制御
case11		半制御		
case12		全制御		

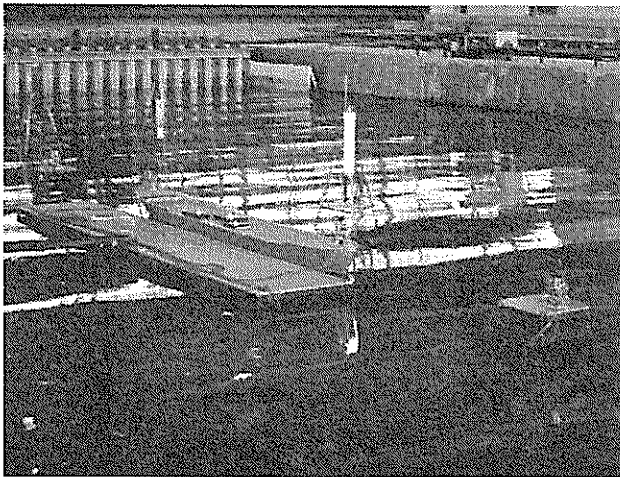


図-20 水理模型実験の状況（その1）



図-21 水理模型実験の状況（その2）

的にはナイロン索とワイ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。したがって、実験ケースの総数は $3 \times 3 \times 4 + 1 \times 3 \times 6 = 54$ ケースとなる。

また、水理模型実験では、1ケースにつき以下のチャンネル数のデータを計測した。

- ・波高データ 5
- ・係留船舶の動揺量（サージ）データ 3
- ・係留索張力データ 4
- ・係留索変位データ 4

5.4 実験状況

図-20および図-21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。ただし、本研究では、動揺6成分のうち、サージについてのみ動揺量の解析を行っている。

5.5 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-22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。長周期波の波周期は21.2sであるか

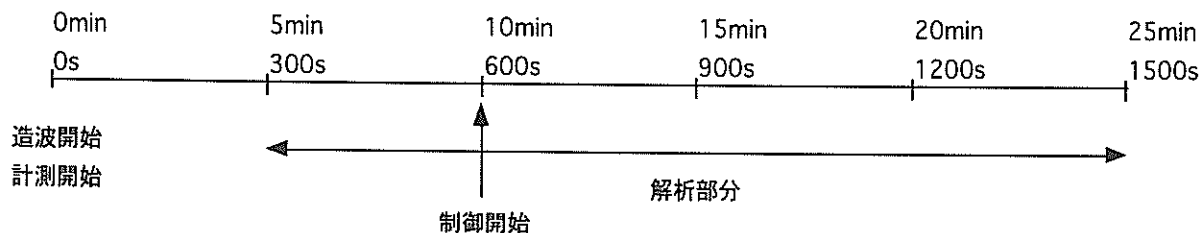


図-22 実験データの計測時間

ら、20分間のデータ時系列の中に長周期動揺の波が約56波分含まれることになる。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。実際には、係留船舶が長周期動揺を起していることから、制御開始時点における船舶の位置によってウインチ制御時間には多少の変動があった。なお、データ計測におけるサンプリング時間は、波高、係留索張力および変位のデータについては0.05s間隔、サージの動揺量データについては1/30s (=画像の1フレーム) 間隔であるが、サージの動揺量データはデータ解析を1.0s間隔で行っている。また、波高、係留索張力および変位の計測データに関しては、計測機器の問題により多少のノイズが入っているケースがあったため、ウェーブレット変換によるノイズ処理を全てのケースについて実行した。ウェーブレット変換とは、時間と周波数の両面から時系列データを解析する時間周波数解析を行うための一手法である(榊原, 1995)。この時間周波数解析では、データの時間依存情報を維持しながら周波数解析を行うことから、時系列データの中で局所的に周期的なデータ特性を時間の推移の中で把握することが可能になる。ウェーブレット変換を用いると、時系列データの周波数分解、ノイズ処理、ピークの検出等の広い範囲のデータ解析を行うことができる。

(2) 考察の方針

表-7に示した実験ケースの中で、ケース7、ケース9、ケース10およびケース12のレポート回数3回目のケースの実験結果を中心に考察する。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ウインチ制御を実行した場合としない場合、係留索にかかる張力を高くした場合としない場合について相互比較することができる。係留索模型のうちナイロン索は、荷重の繰り返し回数によって張力-歪み特性が異なってくることから、各ケースのレポート回数1回目の時点でナイロン索を新しいものに取り替えている。実験結果によると、

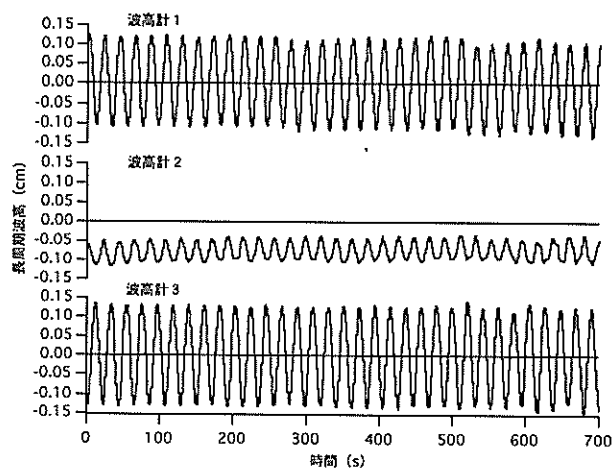


図-23 長周期波の波高 (ケース7)

各ケースのレポート回数2回目と比較して1回目ではサージの動揺量が若干大きくなる傾向にあり、レポート回数2回目以降は動揺量にあまり差異がないことがわかった。これは、先に示したように、初期のナイロン索は柔らかいが、係留船舶の長周期動揺による荷重が加わることでよりナイロン索が硬化することが原因と考えられる。したがって、ここではレポート回数3回目の実験結果を中心に考察することとする。なお、実験結果は、図-22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-23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、波高計2、波高計3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) 動揺量の時系列

図-24はケース7、ケース9、ケース10およびケース12のレポート回数3回目のサージの動揺量の時系列を示す。また、サージの動揺量データについては、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、ここでは中央の計測点における結果を示している。

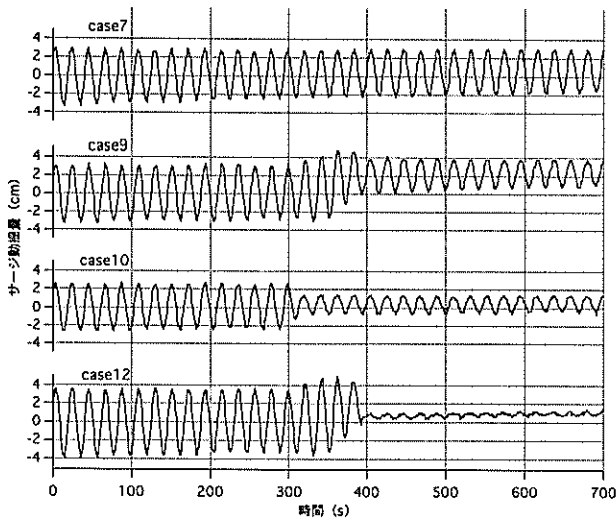


図-24 サージの動揺量の時系列
(ケース7, ケース9, ケース10, ケース12)

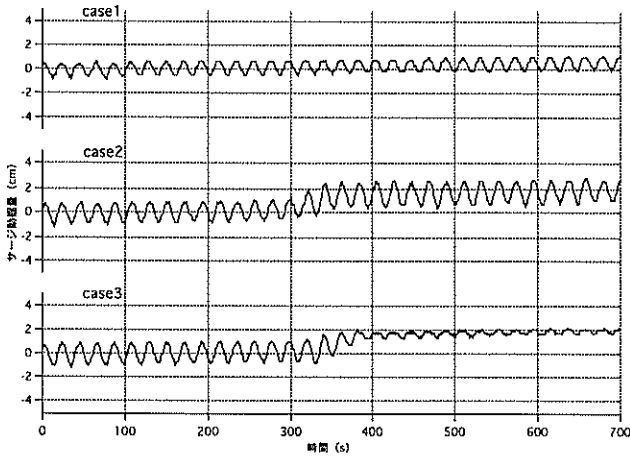


図-25(1) サージの動揺量の時系列
(ケース1, ケース2, ケース3)

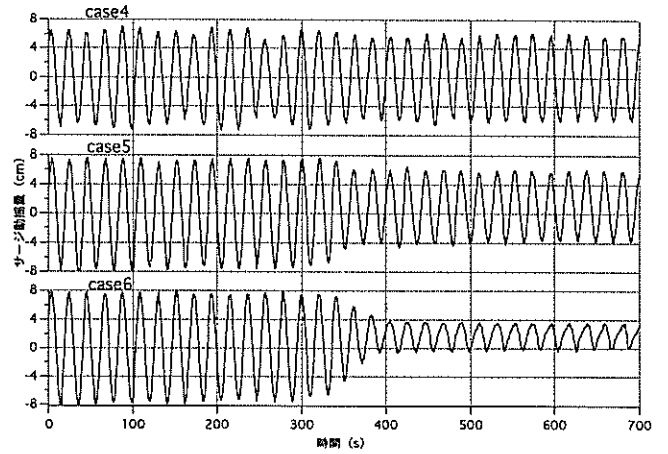


図-25(2) サージの動揺量の時系列
(ケース4, ケース5, ケース6)

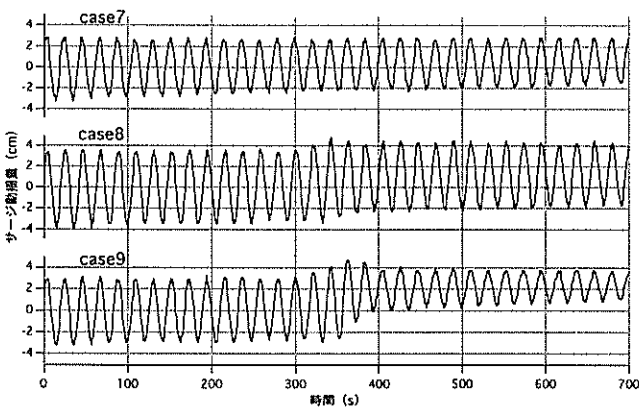


図-25(3) サージの動揺量の時系列
(ケース7, ケース8, ケース9)

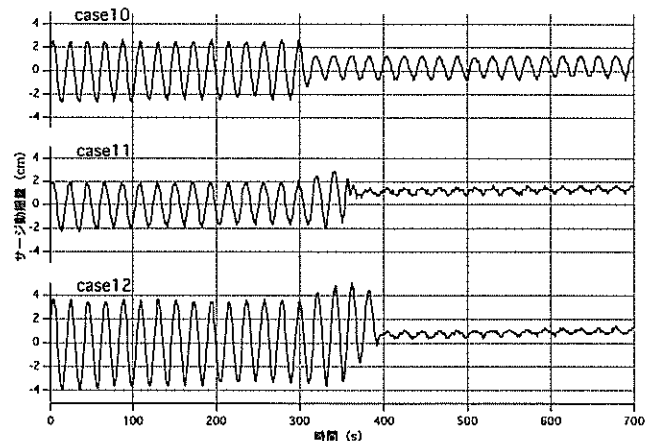


図-25(4) サージの動揺量の時系列
(ケース10, ケース11, ケース12)

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させることが可能である。また、図-25(1)~(4)は、全てのケースについて、リピート回数3回目のサージの動揺量の時系列を示したものである。これらの図から、本研究の波浪条件の範囲内では、半制御による長周期動揺の低減効果はあまり期待できず、波浪条件によっては長周期動揺が大きくなる場合もあることがわかる。また、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明らかである。

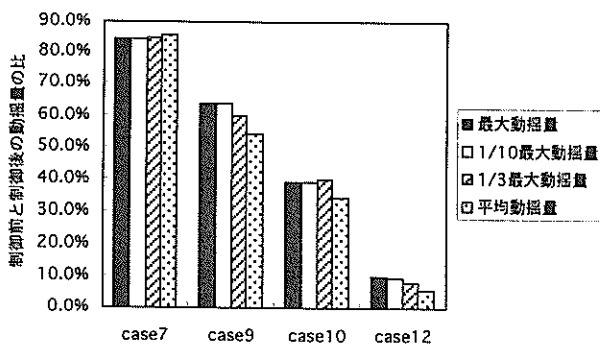


図-26 サージの動揺量の統計値

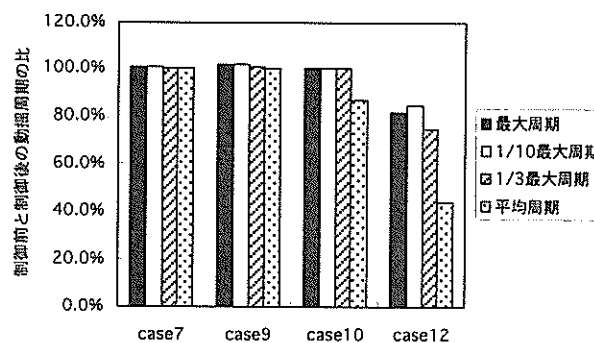


図-27 サージの動揺周期の統計値

(5) 動揺量および動揺周期の統計値

図-26および図-27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、その値は他のケースに比べて小さい。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ゆっくりとドラムが回転していたことが原因と考えられる。長周期動揺低減システムを用いることによって、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。また、係留索の張力を高くするだけでも動揺量を約35~40%まで低減させることが可能である。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。これは、模型実験において拘束長周期波を用いていることが、その理由であると考えられる。すなわち、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のである。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。

(6) 荷役許容動揺量との比較

係留船舶の荷役の可否を評価する際には、船舶の荷役がどの程度の動揺量まで許容できるかの指標値が用いられる。これは、係留船舶の荷役許容動揺量と呼ばれており、一般貨物船、石油タンカー等の船種ごとに動揺6成分について提案されている (Uedaら, 1988)。一方、外洋性港湾におけるコンテナバースやフェリーターミナルの計画では、長周期波による係留船舶の長周期動揺の影響を考慮して荷役稼働率の評価を行うことが重要である。そこで、我が国の外洋性港湾のコンテナ船およびフェリーのターミナルにおける荷役状況を調査し、これらの船

種に対する合理的な荷役許容動揺量を新たに提案した (佐藤ら, 2003)。ここで、コンテナ船の荷役許容動揺量と長周期動揺低減システムによる低減動揺量を比較してみる。実験結果によると、長周期動揺低減システムを用いた場合のサージの動揺量は、先に示したように約55~65%まで低減される。制御前のサージの動揺量の片振幅の平均値は、現地換算で約1.5mであり、制御後は約60%まで低減されるとすると約0.9mと計算される。コンテナ船の荷役許容動揺量 (荷役効率50%) は、片振幅で1.0mであるから、長周期動揺低減システムを用いると、コンテナ船の荷役許容動揺量以下に長周期動揺を低減できることになる。一方、コンテナ船の荷役許容動揺量 (荷役効率100%) は、片振幅で0.5mであるから、長周期動揺低減システムを用いても、コンテナ船の荷役許容動揺量以下に長周期動揺を低減できないことになる。この場合は、係留索の張力を高くすることで約5~10%まで動揺量を低減できることを考慮すると、制御前のサージの動揺量の片振幅約1.5mは制御後には約0.15mとなり、コンテナ船の荷役許容動揺量以下にサージの動揺量を制御できる。したがって、コンテナ船の荷役許容動揺量 (荷役効率100%) を満足するように係留船舶のサージの動揺量を制御するためには、長周期動揺低減システムを用いる場合に係留索の張力も制御する必要がある。

(7) リピート回数の影響

図-28(1)~(4)は、各ケースのサージの動揺量について、制御前と制御後の1/3最大動揺量の比をリピート回数ごとに示したものである。また、図-29(1)~(4)は、各ケースのサージの動揺周期について、図-28(1)~(4)と同様に示したものである。これらの図から、動揺量および動揺周期ともにリピート回数の影響はほとんど見られないことがわかる。すなわち、制御前と制御後の統計量の比で見ると、ナイロン索の特性硬化の影響によるサージの動揺特性の変化はそれほど大きくないと言える。

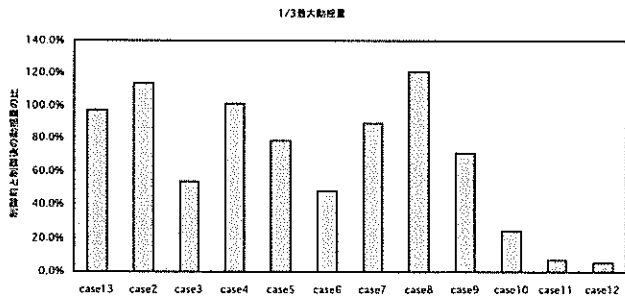


図-28(1) サージの動揺量 (リピート回数1)

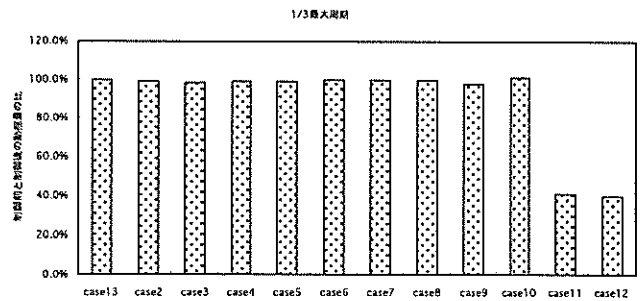


図-29(1) サージの動揺周期 (リピート回数1)

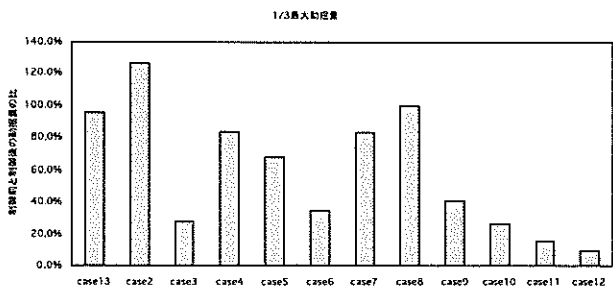


図-28(2) サージの動揺量 (リピート回数2)

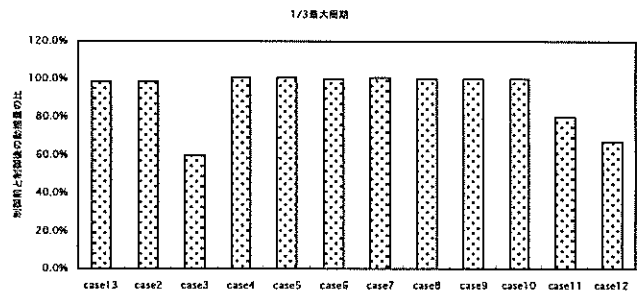


図-29(2) サージの動揺周期 (リピート回数2)

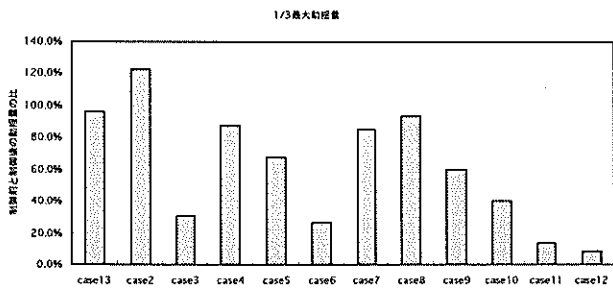


図-28(3) サージの動揺量 (リピート回数3)

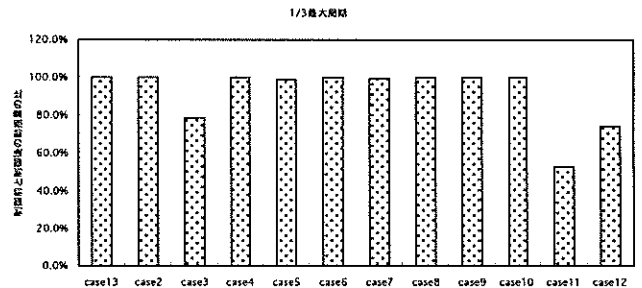


図-29(3) サージの動揺周期 (リピート回数3)

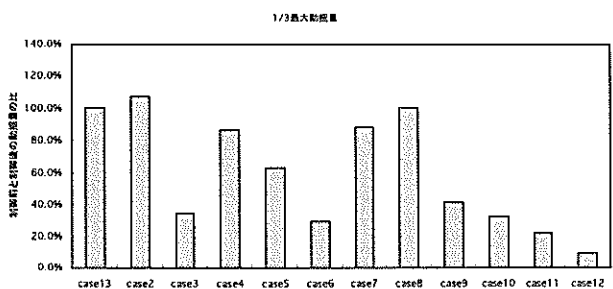


図-28(4) サージの動揺量 (リピート回数4)

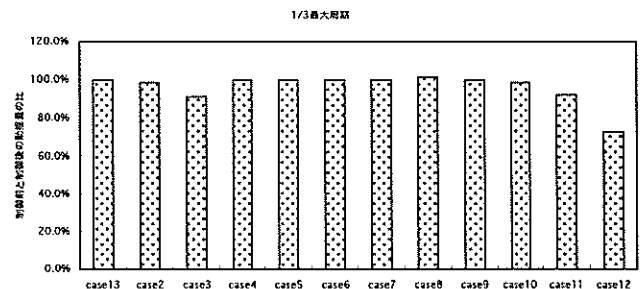


図-29(4) サージの動揺周期 (リピート回数4)

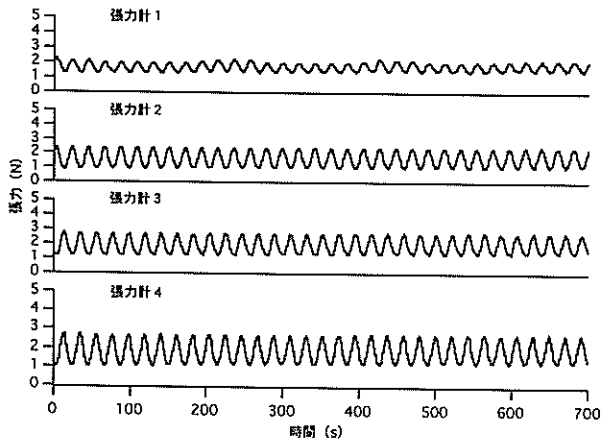


図-30(1) 係留索の張力の時系列 (ケース7)

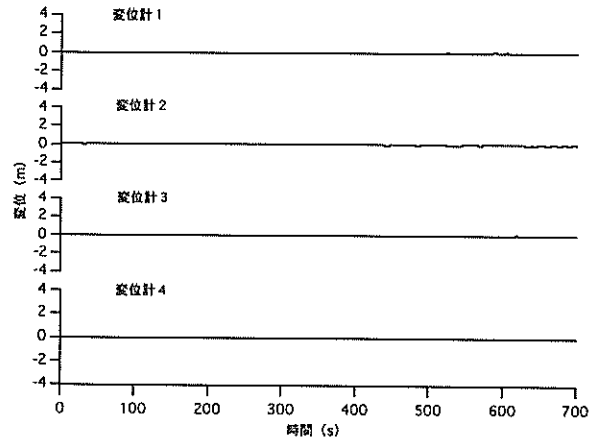


図-31(1) 係留索の変位の時系列 (ケース7)

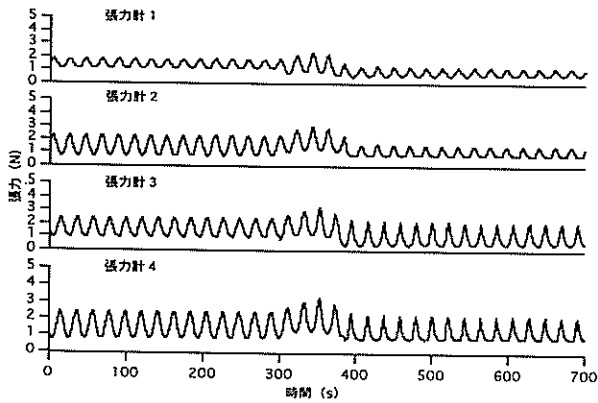


図-30(2) 係留索の張力の時系列 (ケース9)

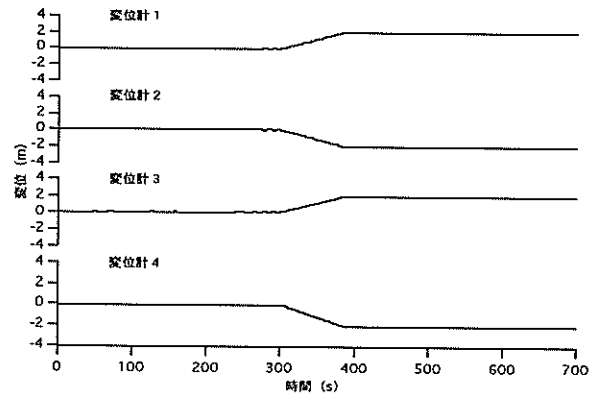


図-31(2) 係留索の変位の時系列 (ケース9)

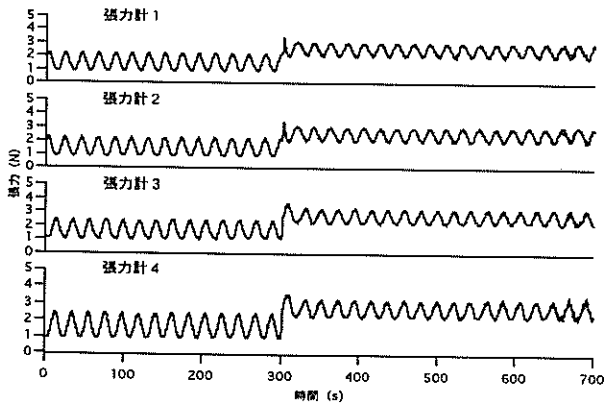


図-30(3) 係留索の張力の時系列 (ケース10)

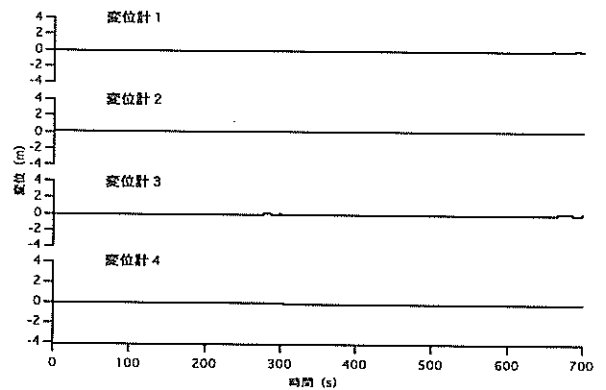


図-31(3) 係留索の変位の時系列 (ケース10)

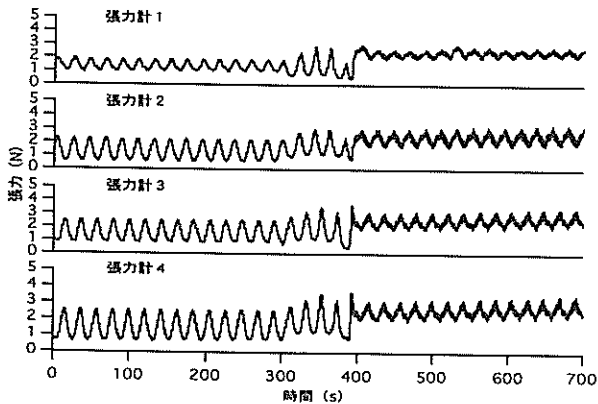


図-30(4) 係留索の張力の時系列 (ケース12)

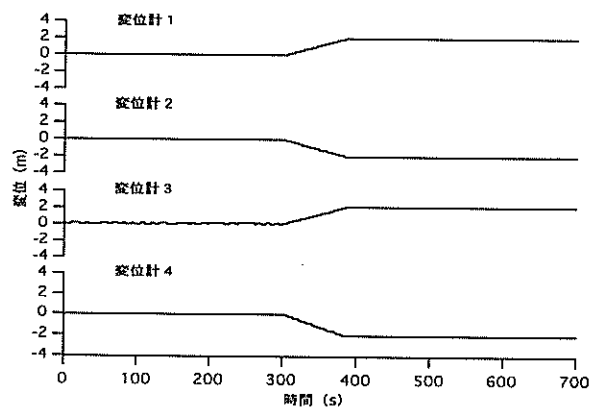


図-31(4) 係留索の変位の時系列 (ケース12)

(8) 係留索の張力および変位の時系列

図-30(1)～(4)は、ケース7、ケース9、ケース10およびケース12の係留索の張力の時系列を示す。また、図-31(1)～(4)は、図-30(1)～(4)に対応した各ケースの係留索の変位の時系列を示す。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制御後には逆に張力が減少するという結果になり、係留索の安全性に関しての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り、場合によっては係留索の許容荷重を越える場合もあると予想される。しかしながら、水理模型実験における係留索の許容荷重は4.88Nであり、ここで示したケースでは、係留索の張力は許容荷重内に収まっている。先に示したように、係留索の張力を高くすればより係留船舶の長周期動揺が低減できるが、手動操作でウインチを操作する場合は、係留索の許容荷重を越えないように慎重に張力を加える必要があり、現実的にはかなりの困難を伴うと推察される。しかしながら、コンピュータによる係留ウインチの自動制御を導入すれば、長周期動揺低減システムを用いて係留索の張力も適切に制御することが可能になると考えられる。

6. 実機試設計

6.1 実機試設計の内容

長周期動揺低減システムの実機試設計では、システムの概略設計を行うとともに、実機に適用する際の装置の試設計を行った。システムの概略設計では、50,000DWT級コンテナ船を想定して、実機装置において必要となるウインチの規模、性能等について検討した。そして、シ

ステムの概略設計に基づいて実機システムの試設計を実施した。

6.2 実機システムの概略設計

(1) 係留船舶の諸元および係留索の特性

動揺制御システムの適用対象とする50,000DWT級コンテナ船の諸元とその係留特性を表-8に示す。

(2) 船載係留装置の標準仕様

50,000DWT級コンテナ船について、係留装置として船に装備している係留ウインチの標準的な配置例を図-32に示す。長周期動揺低減システムは船上係留装置のナイロン索を引き込むことでサージ方向の復元力を調整し係留索の固有周期を変化させる。しかしながら、ワイヤ索とナイロン索の連結には一般的にマンダラシヤックルを用いるため、舷側のローラーフェアリーダーまでがナイロン索を引き込む限界となる。各係留装置から舷側のローラーフェアリーダーまでの距離を表-9に示す。

係留ウインチの巻上げおよびブレーキ荷重の仕様はドラムの第一層における荷重であり、実際には200mの巻き取り容量があるため、実効荷重は低下する。実効荷重はロープの巻き数によるが、概ね70%程度に低下すると考えられる。巻き取り荷重およびブレーキ荷重の実効荷重はそれぞれ137kNおよび412kNである。また、ブレーキとクラッチの制御は、ウインチのハンドルとレバーを手動で操作して行う。ドラムの回転方向と速度の調整は、ウインチの手動ハンドル操作と舷側のリモートコントロールスタンドで操作可能である。

表-8 コンテナ船の諸元および係留特性

対象船 50,000 トン級 コンテナ船	全長 (L)	266.0 m
	船幅 (B)	32.3 m
	喫水 (d)	13.0 m
	載貨重量 (DWT)	50,000 t
	満載排水量 (DT)	68,000 t
	軽貨排水量 (DT)	33,000 t
サージ係留系の 固有周期 T	満載時	132 s
	軽貨時	92 s
係留索張力 (1本当たり)	初期張力	40 kN
	破断張力	608 kN

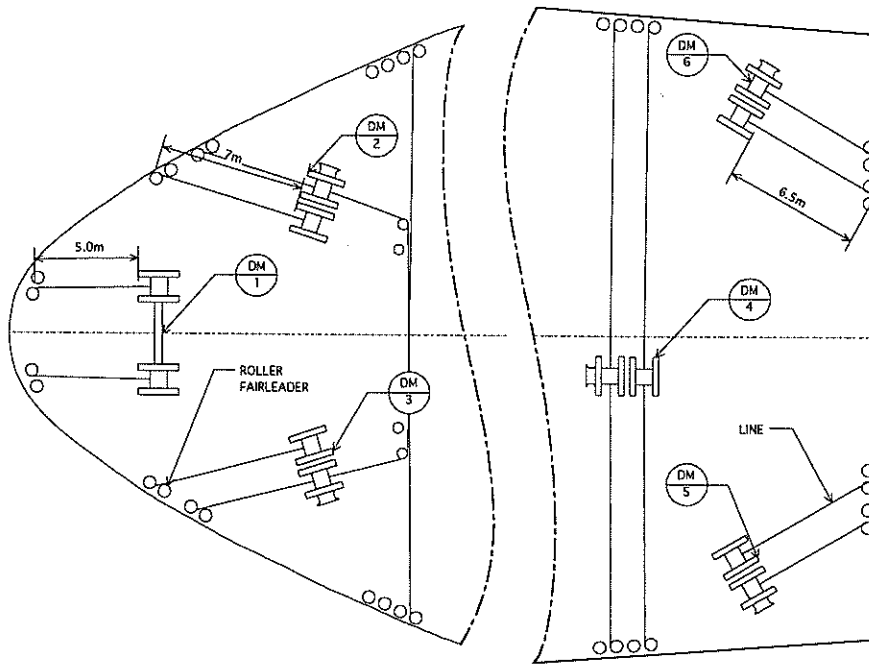


図-32 係留ウインチの標準的な配置例

表-9 係留装置からローラーフェアリーダーまでの距離

係留装置	係留索の種類	フェアリーダーまでの距離
DM1	ヘッドライン	5.0 m
DM2,3	ヘッドライン	7.0 m
	スプリングライン	22.0 m
DM4	スプリングライン	12.0 m
DM5,6	ヘッドライン	6.5 m

(3) 係留方法の選定

50,000DWT級コンテナ船について、一般的な係留方法と実機装置の概略設計を行うために考慮した係留モデルを図-33および図-34に示す。

(4) ばね定数調整機構

実機システムにおける係留索のばね定数を調整する機構は、船に備え付けの係留索（ナイロン索）と岸壁側に設置するウインチとともに配置するワイヤ索とを直列に繋ぎ合わせ、必要に応じて船上ウインチと陸上ウインチを駆動して、ナイロン索とワイヤ索の構成比率を変化させるものである。図-35はばね定数調整機構の概念図を示す。

係留索1本当たりのばね定数 K は次式で表される。

$$K = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} \quad (5)$$

ここで、 $k_1 (= E_1 A_1 / L_1)$: ナイロン索のばね定数

(kN/m)、 E_1 : ナイロン索の縦弾性係数 (kN/m^2)、 A_1 : ナイロン索の断面積 (m^2)、 L_1 : ナイロン索の長さ (m)、 $k_2 (= E_2 A_2 / L_2)$: ワイヤ索のばね定数 (kN/m)、 E_2 : ワイヤ索の縦弾性係数 (kN/m^2)、 A_2 : ワイヤ索の断面積 (m^2)、 L_2 : ワイヤ索の長さ (m)、である。

また、係留モデルのサージの復元力 K_{surge} (kN/m) は、次式で表せる。

$$K_{surge} = \sum_{i=1}^n (\cos^2 \theta_i K_i) \quad (6)$$

ここで、 n : 係留索の本数、 K_i : 各係留索のばね定数 (kN/m)、 θ_i : 係留索と係船岸壁のなす角度、である。

(5) 係留索のばね定数

船に備え付けの係留索（ナイロン索）と岸壁側に設置するウインチとともに配置するワイヤ索の特性と、それぞれを直列に繋ぎ合わせてナイロン索とワイヤ索の構成比率を変化させた場合の特性を以下に示す。

係留索の種類	ロープの種類	本数	索長	索と係留岸の角度
ヘッドライン	φ70ナイロン索	4本	個々	個々
スターンライン		4本		
フォアスプリング		2本		
アフトスプリング		2本		

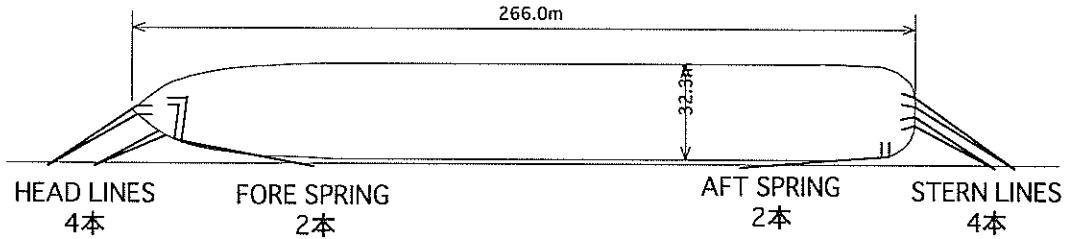


図-33 実際の係留方法

係留索の種類	ロープの種類	本数	索長	索と係留岸の角度
ヘッドライン	φ70ナイロン索	6本	44 m	30 deg
スターンライン		6本		

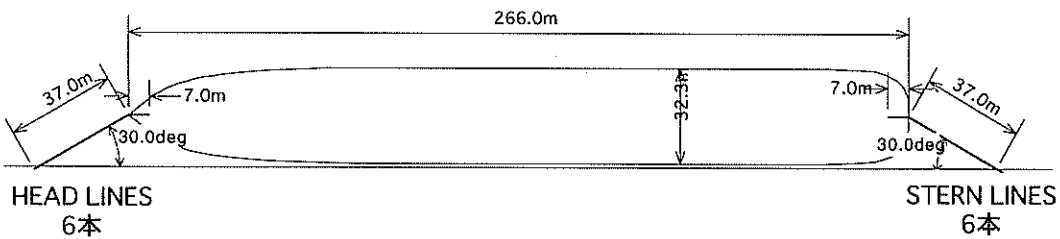


図-34 概略設計における係留モデル

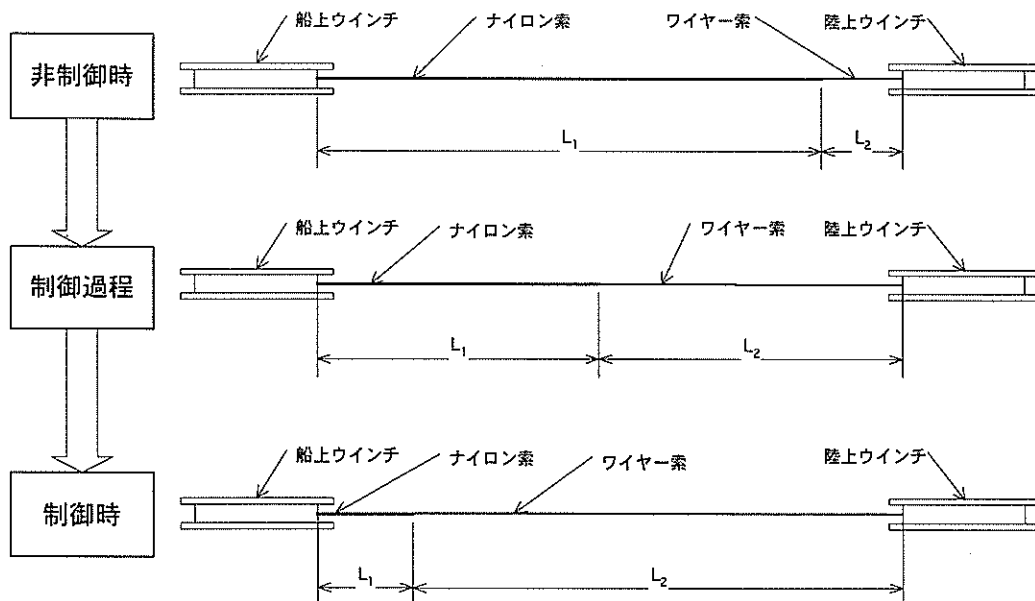


図-35 ばね定数調整機構の概念図

表-10 ナイロン索の諸元

直径	70 mm
切断荷重	608 kN

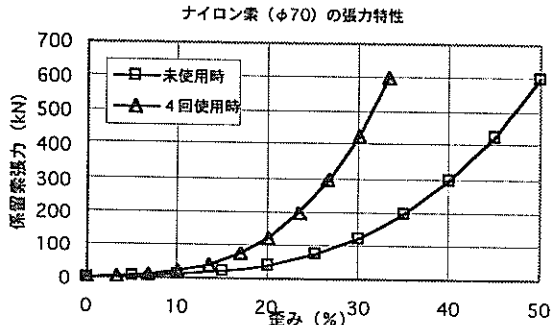


図-36 ナイロン索の張力特性

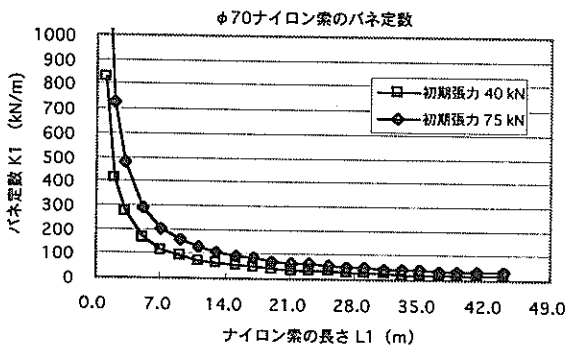


図-37 ナイロン索のばね定数の変化

表-11 ワイヤ索の諸元

直径	36 mm
断面積	$4.61 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
切断荷重	589 kN
縦弾性係数	$7.35 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$

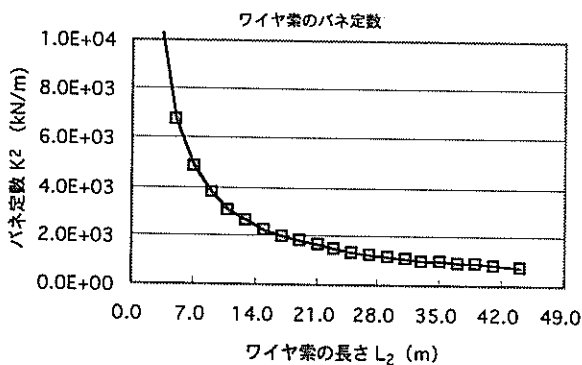


図-38 ワイヤ索のばね定数の変化

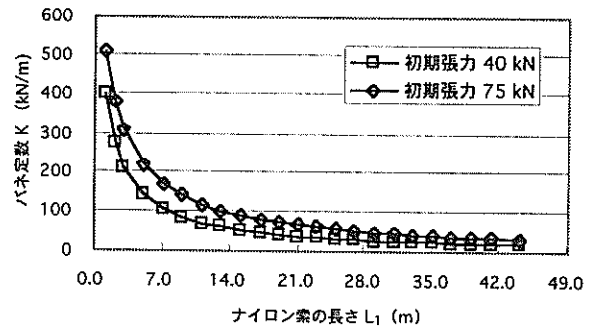


図-39 全体係留索のばね定数

表-10はナイロン索の諸元を示したものである。また、ナイロン索の張力特性は、図-36のようになる。ナイロン索の特性は、使用した回数により変化するため、4回使用した索は未使用索に比べ弾性係数が大きくなる。ここでは、実際に使用している索の特性に近いと考えられる4回使用した索の特性を用いた。図-37は、ナイロン索のばね定数の索の長さに対する変化を示したものである。一方、表-11はワイヤ索の諸元を示したものである。また、ワイヤ索のばね定数の索の長さに対する変化は図-38となる。

以上に示したナイロン索およびワイヤ索のばね定数から、ナイロン索およびワイヤ索の長さの構成比率を変化させた場合の全体の係留索のばね定数は、図-39のようになる。

(6) 係留系の特性

図-34に示した係留モデルに長周期動揺低減システムを適用する場合の係留系の構成および制御を行った場合の係留系の特性について検討を行った。

係留系の構成はヘッドライン6本およびスターンライン6本のうち、各4本制御する場合と各2本制御する場合について実施した。制御対象の索の構成比は、標準的な船上係留装置の配置からナイロン索の引き込み長さに制限を設け、下限を7mとした。また、係留系の固有周期には排水量も影響するため、満載状態および軽貨状態について検討を行った。ここでは、ヘッドライン2本、スターンライン2本を制御する場合の検討結果について説明する。

ヘッドライン2本、スターンライン2本を制御する場合の係留系の構成を表-12に示す。非制御状態では、索は全てナイロン索で構成されるものとし、制御時にはナイロン索とワイヤ索との構成比率を変化させる。また、制御する係留索の初期張力を変化させることで係留索のばね定数を調整することも可能である。

表-12 係留系の構成

係留索種別	索の構成			長さ	係留岸との角度
	材質	構成比	本数		
ヘッドライン	ナイロン索	不変	4本	44 m	30 deg
	ナイロン索+ワイヤ索	可変	2本		
スターンライン	ナイロン索	不変	4本		
	ナイロン索+ワイヤ索	可変	2本		

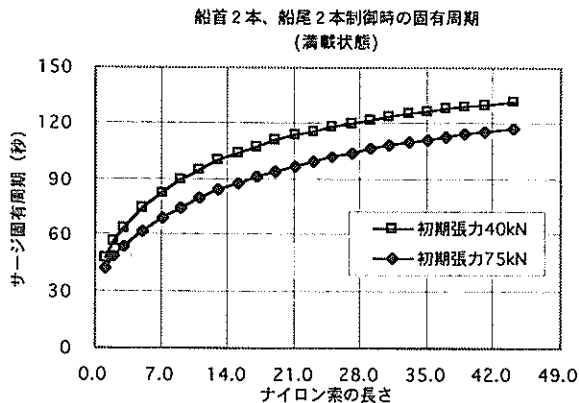


図-40 係留系の固有周期 (満載状態)

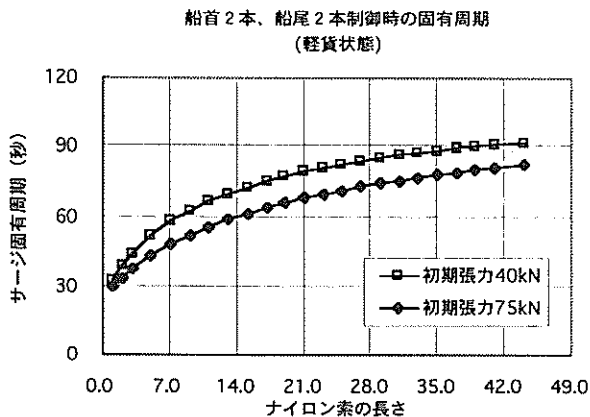


図-41 係留系の固有周期 (軽貨状態)

また、係留系の固有周期について、満載状態の場合を図-40に軽貨状態の場合を図-41に示す。

(7) 陸上係船設備の要件

長周期動揺低減システムでは、係留索の伸び剛性を調整するために、船に備え付けの係留ウインチと係留索に併せ、係船岸壁にワイヤ索とともにウインチを設置する必要がある。係留系の構成および特性、対象船の係留装置の性能などから、陸上係船設備の要件を検討した。ここでは、設置費や保守費等のコストパフォーマンスの観点から、より実用であると考えられるヘッドライン2本、スターンライン2本を制御する場合について検討した結

果を示す。

・ドラム : 4機

・巻き取り容量: $\phi 36\text{mm} \times 100\text{m}$ 程度

・制御方式: トルク (張力) 制御

油圧方式のウインチでは、張力を高精度に制御することは一般的に難しいため、インバータ方式の電動ウインチとする。

・巻き取り荷重およびブレーキ荷重:

陸上のウインチは、連動させる船上ウインチの巻き取り荷重と同等の能力が必要である。

巻き取り荷重 196kN ドラム上1層目

巻き取り速度 15m/min ドラム上1層目

ドラム数 2

ブレーキ保持荷重 588kN ドラム上1層目

・センサ:

陸上ウインチには、索巻き取り・繰出し長さ検出装置、索張力検出装置等の付属装置が必要となる。

・操作系統:

陸上のウインチは、索長信号や索張力信号を基に索巻き取り・繰出し長さを制御するため、遠隔操作が必要となる。

6.3 実機システムの試設計

(1) システムの全体構成

長周期動揺低減システムを構成する装置および設備の主な機能を以下に示す。長周期動揺低減システムの実機システムは、船体動揺制御装置、船体動揺計測装置、波高計測装置、船載係船設備、陸上係船設備およびウインチ制御装置から構成される。図-42はシステムの全体構成図を示したものである。

(2) 船体動揺制御装置

サージ方向の船体動揺量および波高等の入力により、非制御状態と制御状態の切り替えを決定し、ウインチ制御装置に対してウインチ操作指令を出力する装置であり、高性能コンピュータを用いる。

(3) 船体動揺計測装置

サージ方向の船体動揺を計測し、船体動揺制御装置に出力する装置である。本装置は、対象船に特別な艀装を

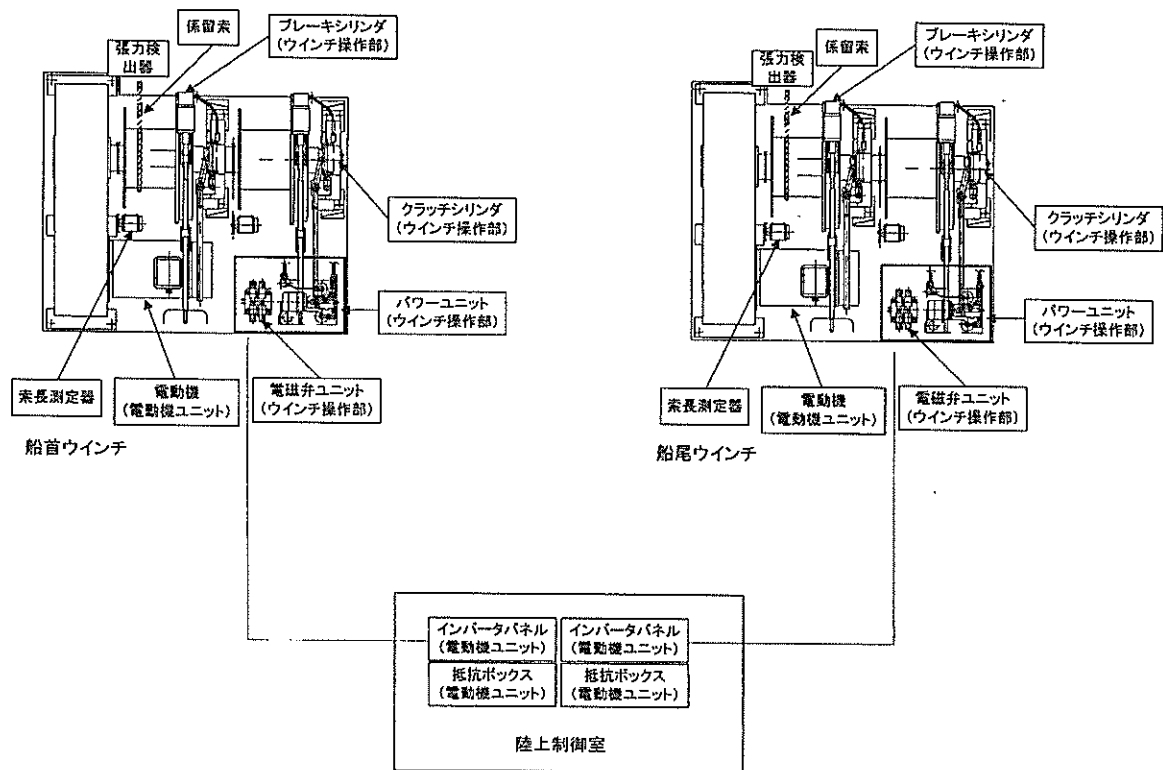


図-43 陸上係船設備の装置配置図

(6) 陸上係船設備

長周期動揺低減システムの概略設計に基づいて陸上係船設備の試設計を行った。概略設計では、船首船尾それぞれ2本の係留索を制御する場合と船首船尾それぞれ4本の係留索を制御する場合について検討を行っている。

船首船尾 4 本を制御する場合は、より係留系の固有周期を短くすることが可能であるが、陸上係船設備の費用は、船首船尾 2 本の場合と比較すると、おおよそ 2 倍程度になると考えられる。そこで、船首、船尾それぞれ 2 本の係留索を制御対象として陸上係船設備の設計を行った。また、陸上係船設備の機能としてトルク（張力）制御が必要である。油圧方式のウインチでは、張力を高精度に制御することは一般的に難しいため、インバータ方式の電動ウインチとした。

陸上係船設備は、ウインチ、電動機ユニット、係留索、ウインチ制御部、索長検出器、張力検出器、各2式から構成され、ウインチ制御装置による自動運転、制御室からの遠隔手動操作、ウインチ側での手動操作の3種類のウインチ運転モードによって、船首2本、船尾2本のワイヤ索の巻き取り、繰出しを行う。係留ウインチ1台に対してドラムが2個付いており、クラッチにより制御する係留索の切り替えを行う。すなわち、本システムでは、基本的に船首、船尾の係留索をそれぞれ1本ずつ操作す

る。

図-43に陸上係船設備の装置配置図を示す。

a)ウインチ

ウインチは電動駆動方式で、動力は密閉オイルバス式減速装置（3段）を介してワイヤドラムに伝達される。ウインチにはクラッチ装置およびブレーキ装置が装備されており、これらの装置はウインチ側での手動操作の他に遠隔操作が可能である。ウインチの制御は、ウインチ回転方向、回転速度およびトルク指令信号に基づき、電動機に与える電圧と周波数を変化させ、電動機を可変制御する。なお、電動機の制御はゼロ回転数でのトルク制御（オートテンション）を行うため、速度センサ付きベクトル制御とした。また、ワイヤ索の繰出し時に一定の張力（バックテンション）を作用させるため、回生制動を行う。なお、回生制動とは回転方向と逆方向のトルクを発生するものである。

ウインチの仕様を以下に示す。

- ・巻き込み荷重 196kN ドラム上1層目
- ・巻き込み速度 15m/min ドラム上1層目
- ・スラックローブ速度 30m/min ドラム上1層目
- ・巻き取り索容量 $\phi 36 \times 100\text{m}$ 4層巻き取り
- ・ドラム数 2
- ・ドラム寸法 $\phi 580 \times 500\text{L}$

- ・ブレーキ保持荷重 590kN ドラム上1層目
- ・制御方式 速度センサ付きベクトル制御

b)電動機ユニット

ウインチの回転速度無段階制御、トルク制御を行うための装置である。インバータパネル、抵抗ボックスおよびブレーキ付き誘導電動機によって構成される。インバータパネルでは、ウインチ制御装置からの指令信号により電動機に与える電圧と周波数を変化させ、電動機を可変制御する。制御方式は、速度センサ付きベクトル制御である。ウインチ駆動用電動機はウインチに組み込まれる。

c)係留索

係留索は、船載係船設備であるナイロン索とワイヤ索、マンダルフエアリードシャックルにより構成される。以下にワイヤ索およびマンダルフエアリードシャックルの仕様を示す。

○ワイヤ索

- ・種類 G種6×24
- ・公称径 36mm
- ・断面積 450mm²
- ・破断荷重 593kN
- ・単位重量 4.30kg/m

○マンダルフエアリードシャックル

- ・破断荷重 883kN
- ・重量 7.8kg

d)ウインチ制御部

ウインチ操作卓からの信号に基づき、ウインチのブレーキおよびクラッチを操作する。ウインチ側および遠隔操作によるブレーキおよびクラッチの操作が可能である。ウインチ制御部は、ブレーキシリンダ、クラッチシリンダ、パワーユニット（シリンダ用ポンプユニット）、電磁弁ユニットから構成され、これらの機器はウインチに組み込まれる。

e)索長検出器

係留索の進入角度は、対象船舶の乾舷高さ、船長および潮位等によって変化するため、索長検出器はこれらの影響を受けない機構とした。索長の検出は、本検出器をウインチに組み込み、シーブを介してロータリーエンコーダの入力軸を回転させる方式とした。また、索長は、コンピュータ（船体動揺制御装置）においてドラム層の影響を考慮して計算される。

f)張力検出器

係留索の張力は船舶が係留されている間は常時計測する必要がある。そこで、ブレーキの作動・非作動時の静荷重・動荷重が計測可能であり、ドラム巻き取り量や係

留索の進入角度の影響を受けない3点シーブ方式の張力検出器とした。本検出器を係留索に取り付け、シーブに作用する荷重から張力を計測する。

(7)ウインチ制御装置

ウインチ制御演算装置、操作卓、ウインチ側のマスターコントローラから構成される。ウインチ制御演算装置による自動運転、操作卓による遠隔手動操作およびウインチ側での手動操作の各信号をウインチに指令出力する。ウインチ制御演算装置は高性能コンピュータであり、船体動揺制御装置からのウインチ操作指令を基に、回転方向、回転速度、トルク等の指令やブレーキおよびクラッチの作動・非作動の制御を行う。また、船体動揺制御装置、ウインチ等の状態監視・安全確認を行う。操作卓では、ウインチ運転モードの切り替え、自動運転時のウインチ制御指令の出力、遠隔手動操作時の操作入力、索張力と索長の表示を行う。先にも述べたように、船首、船尾のウインチはそれぞれ独立に制御可能となっている。マスターコントローラはウインチ側においてウインチの手動操作を行うための装置である。

6.4 実機システムの設置費

係留船舶の長周期動揺低減システムが実際に長周期波対策工法として採用されるためには、防波堤の整備のための建設費と比較して低コストである必要がある。そこで、本システムの設置費について検討している。

防波堤の建設費は、一般的に単位m当たり約1,000万円～3,000万円程度であると考えられる。また、長周期動揺低減システムの設置費は、システム整備のための初期投資額とシステムメンテナンスのための保守費から求めることができると仮定する。

長周期動揺低減システムの実機試設計の結果から、システムを構成する各装置の概算価格を算出して、システム全体の概算価格を推定すると、約7,500万円となった。この概算価格には、輸送費、現地設置工事費、調整・試運転作業費、一般管理費等は含まれていない。一方、保守費については、システムの耐用年数を30年程度とし、その期間に必要と見込まれる概算費用を算出した。その結果、30年間の保守費を計算すると約10,000万円となり、年平均保守費は約330万円となった。

以上のことから、長周期動揺低減システムの設置によって生じる費用は防波堤の建設によって生じる費用よりも非常に低コストであることがわかる。

7. まとめ

本研究の成果を以下の通り取りまとめる。

- (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水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) 係留船舶の長周期動揺低減システムを実用化する場合を考慮して、システムの実機試設計を実施した。

8. あとがき

本研究で提案している係留船舶の長周期動揺低減システムは、新規的かつ独創的なものであり、長周期波対策工法の一方法としての可能性を有している。ただし本研究では、水理模型実験において、コンピュータによる係留ウインチの自動制御ではなく手動制御に対して検証を実施しており、長周期動揺低減システムについての基礎的な検証にとどまっている。したがって、コンピュータによる係留ウインチの自動制御を導入した長周期動揺低減システムについて、水理模型実験により検証することが今後の重要な研究課題となる。また、長周期動揺低減システムを長周期波対策工法として実用化し、広く普及させるためには、実機システムの試作と実機レベルでの有効性の検証が必要であると考えている。

(2003年5月12日受付)

謝辞

本研究を進めるにあたり、当所海洋・水工部波浪研究室の平石哲也室長には、水理模型実験における長周期波の発生方法について有益な御助言をして頂いた。また、(株)三井造船昭島研究所の日根野元裕氏には、実験結果について考察する際に貴重な御意見を賜った。ここに記して、深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- 久保雅義 (1985) : ダッシュポット係留索の実船への適用可能性に関する基礎的研究, 日本航海学会論文集, 第73巻, pp.163-172.
- 榊原進 (1995) : ウェーブレットビギナーズガイド, 東京電機大学出版局, 225p.
- 笹健児・白石悟・榊原繁樹 (1999) : 係留船舶の長周期

動揺の各種数値計算法による再現性に関する比較検討, 港湾技研資料, No.931, 80p.

佐藤平和・白石悟・米山治男 (2003) : コンテナ船およびフェリーの荷役許容動揺量の検討, 港湾空港技術研究所資料, No.1055, 43p.

白石悟・久保雅義・上田茂・榊原繁樹 (1995) : 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.

関本恒浩・森屋陽一・中山晋一 (1999) : 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.

鶴田三郎・田中義久 (1986) : 合成繊維索の摩耗特性について, 日本航海学会論文集, 第75巻, pp.87-94.

日本港湾協会 (1999) : 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.

平石哲也・白石悟・永井紀彦・横田弘・松淵知・藤咲秀可・清水勝義 (1997) : 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.

米山治男・白石悟・名里健吾・高橋英俊 (1996) : 防波堤ケーソンの自動設置システムの開発 (第一報) - 引船方式の水理模型実験による検討 -, 港湾技術研究所報告, 第35巻第4号, pp.37-74.

米山治男・白石悟・名里健吾・高橋英俊 (1999) : 防波堤ケーソンの自動設置システムの開発 (第二報) - アンカーワイヤ方式の水理模型実験による検討 -, 港湾技術研究所報告, 第38巻第2号, pp.257-297.

Shiraishi, S. (1998) : 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.

Ueda, S. and Shiraishi, S. (1988) : The Allowable Ship Motions for Cargo Handling at Wharves, *Rept. Port and Harbour Res. Inst.*, Vol.27, No.4, pp.3-61.

Wilson, B.W. (1973) : Elastic Characteristics of Mooring Ropes, *NATO Advanced Study Institute on Analytical Treatment of Problems in the Berthing and Mooring of Ships*, pp.41-64.

港湾空港技術研究所資料 No.1056

2003.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 野崎印刷紙器株式会社

Copyright © (2003) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。