

# 港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN.

No. 730      June. 1992

対称係留系における船舶の動揺と  
船舶係留誘導装置に作用する接岸力

上    田            茂  
白    石            悟  
板    生            考    司

運輸省港湾技術研究所



# 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	4
2. 模型実験の概要 .....	4
2.1 実験施設および模型装置 .....	4
2.2 接岸実験の方法と実験ケース .....	8
2.3 動揺実験の方法と実験ケース .....	9
3. 船舶係留誘導装置に作用する接岸力の実験結果 .....	10
3.1 静水中の接岸力 .....	10
3.2 波浪中の接岸力 .....	13
4. 対称係留系における動揺実験 .....	22
4.1 自由振動実験 .....	22
4.2 壁面両側非透過係船岸の場合の動揺実験結果 .....	22
4.3 壁面片側透過片側非透過および 壁面両側透過係船岸の場合の動揺実験結果 .....	26
5. 動揺シュミレーション .....	29
5.1 検討の手順および計算ケース .....	29
5.2 計算値と実験値との比較 .....	31
5.3 対称係留系と非対称係留系との比較 .....	35
5.4 防衝工の個数が動揺量に及ぼす影響 .....	39
6. 結 論 .....	41
7. あとがき .....	41
参 考 文 献 .....	42
記 号 一 覧 表 .....	42

# 対称係留系における船舶の動揺と 船舶係留誘導装置に作用する接岸力

上田 茂\*  
白石 悟\*\*  
板生考司\*\*\*

## 要 旨

本研究では、港湾における船舶の係留および荷役の稼働率を向上させる目的で、対称係留系および船舶係留誘導装置を提案し、計算および実験を行ってその有効性を検討した。対称係留系および船舶係留誘導装置は、全天候バース、スーパーライナー用バース、離島等の外洋性港湾などにおいての活用が期待される。

本論文では、船舶が係留誘導装置に前進速度をもって接舷し接触しつつバースに誘導するときの接岸力を静水中および波浪中において実験し、現行の計算法による接岸力と比較検討した結果を示す。また、対称係留システムにおける係留船舶の動揺を計算および実験を行って求め、在来の係留方法ならびに係船岸の様式による動揺の差異を比較検討した。

本論文における主要な結論は以下のとおりである。

接岸実験については以下のことが言える。

- 1) 船舶係留誘導装置に作用する接岸力は、前進速度をもつ接岸の場合も前進速度をもたない接岸の場合も計算値と実験値がほぼ一致しており、接岸力は係船岸の法線に直角方向の速度成分  $V$  を接岸速度とし、これをもって技術基準の方法に従って計算してよいと言える。
- 2) 波浪中の接岸力は長周期波中または波高が大きいために静水中の接岸力を上回った。これは船舶の動揺に起因すると考えられる。

動揺実験および数値シミュレーションについては以下のことが言える。

- 3) 対称係留系と非対称係留系について動揺シミュレーション計算を行った結果を比較すると、対称係留系においては防舷材と係留系はね定数の相違によるサブハーモニックモーションが抑制されるため、サージ、スウェイ、ロール、ヨウについて、非対称係留系より係留船舶の動揺が小さい。ただし、ヒープ、ピッチについては、差異がない。
- 4) 対称係留系において、係船岸の構造を、壁面両側非透過、壁面片側透過・片側非透過、壁面両側透過として、それらについて動揺実験を行って係留船舶の動揺量を比較してみると、スウェイ、ロール、ヨウについては両側非透過が、また、サージ、ヒープ、ピッチについては両側透過の動揺量が他の形式のものよりも小さい。両側非透過の場合には、係船岸で反射した波が係船岸の奥へ進入してくるためにサージなどの動揺量が大きくなっている。
- 5) 対称係留系について、防舷材の配置を調べるために防衝工の個数等を変えて波向 $30^\circ$ および波向 $60^\circ$ について計算を行った結果、波向 $60^\circ$ の場合のヨウが防舷材の個数が多い場合に大きくなった。これは防舷材を多数配置した場合には、係船岸の両端附近に設置された防舷材の反力による回転モーメントが大きくなるためである。
- 6) 係留船舶の動揺シミュレーション結果は実験結果とよく一致した。

キーワード：船舶係留誘導装置、対称係留系、接岸力、動揺シミュレーション、係留施設、防舷材

\* 構造部 海洋構造研究室長

\*\* 構造部 主任研究官（浮体構造担当）

\*\*\* 構造部 海洋構造研究室

## 1. まえがき

本研究では、港湾における船舶の係留および荷役の稼働率を向上させる目的で、対称係留系および船舶係留誘導装置を提案し、計算および実験を行ってその有効性を検討した。対称係留系および船舶係留誘導装置は、全天候バース、スーパーライナー用バース、離島等の外洋性港湾などにおいての活用が期待される。

港湾の施設の技術上の基準・同解説には、泊地は停泊または係留の用に供され、利用状況に応じ、利用時または異常気象に対する避難時において十分静穏であり、係留岸前面のものにあつては、年間を通じ95～97.5%以上の停泊または係留日数を可能とする静穏度を確保することが原則であるとされており、対象船舶の船種、船型、荷役方法によっても異なるが、荷役限界波高は、小型船においては0.3 m、中・大型船においては0.5 m、超大型船においては0.7～1.5 m程度とされている<sup>1)</sup>。静穏度を確保するために、防波堤および消波工の配置および設計が適切になされているが、これに加えて係留施設の改善を行い、稼働率を一層向上させることが望まれる。たとえば、全天候バースでは、防風設備および締切堤によってバース外の強風および波浪の影響を抑え、荷役の稼働率を向上させるものである。また、開発中のスーパーライナーは高速で航行するものであるため、係留施設においても迅速な離着桟および高効率の荷役が要請される。一方、離島等の外洋性港湾では、防波堤等の整備が十分でなく、現実には荷役限界波高を満たす静穏度が得られていないことが多い。

通常の係留系、すなわち、係留岸の防衛工と船舶の係留索による係留系（これを非対称係留系とする）における問題点は、防舷材と係留索のばね定数の差異が大きいため、これが原因となって係留船舶がサブハーモニックモーションを起こすことである。そこで、これを抑制するために船舶の両舷側に防衛工および係留索を配置して、船舶の前後または左右の係留系の変位復元力特性を同一にする対称係留系を考えた。さらに、対称係留系においては両側に配置する係留施設の消波効果も期待できるので、船舶の動揺の抑制に効果があると考えられる。これらの点を、模型実験および数値シミュレーションを行なって明らかにする。

船舶係留誘導装置に類似なものとして、久保他<sup>2)</sup>は荒天時に漁船が避難して漁港に入港する際に、風の作用によって漁船が漂流するのを防止するための入港援助施設を提案し、漁船の衝突力を実験的に調べ、防衛工の構造を検討している。

船舶係留誘導装置の検討に当たっては、船舶が船舶係留誘導装置に接触するときの接岸力を明らかにしなければならない。船舶が船舶係留誘導装置に沿って入港する際には、防衛工に圧縮とせん断を与えながら入港する。しかしながら、防衛工には比較的せん断に弱いものが多く、これが防衛工の破損の原因となっている。前進速度および船舶の動揺のサージおよびヒープによって係留誘導装置に作用するせん断力は防衛工および船舶係留誘導装置の設計上不利であるため、これを避けねばならない。その対策として、船舶係留誘導装置の模型の前面にベアリングを取り付け、前進速度およびサージ、ヒープによる前後および上下のせん断力を軽減し、係留岸の法線に直角方向の接岸力のみを防衛工に伝えるようにした。

## 2. 模型実験の概要

### 2.1 実験施設および模型装置

#### (1) 模型船舶および実験水槽

図-1は、模型船舶の平面図および側面図を示したものである。表-1は、模型船舶および実船の諸元を示したものである。模型船舶は全長146.5 cm、型幅20.2 cm、型深さ14.0 cm、喫水12.3 cmで、バッテリーおよびモーターを搭載しており、リモコンによってスクリューの回転数および舵角を操作し前後左右に航行させることができる。

模型船舶を用い、港湾技術研究所の平面水槽（25 m × 10 m × 1 m）において接岸実験および動揺実験を行った。図-2は、波向が0°の場合の動揺実験における造波機および模型の配置を示したものである。波向が30°の場合には模型を造波機に対して30°の角度になるように設置した。

2台の造波機によって造波するが、造波機の背後には消波碎石を、それ以外の平面水槽内の周りには消波工を配置し水槽側面からの反射波を抑えた。係留施設模型を水槽の波下側の壁面から模型中心までの距離が6 mとなる位置に設置した。

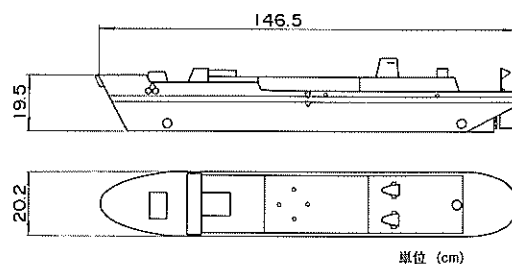


図-1 模型船舶の平面図および側面図

表-1 模型船舶および実船の諸元

諸元	模型船	実船
全長	146.5 cm	102.6 m
垂線間長	135.0 cm	101.3 m
型深さ	14.0 cm	10.5 m
型幅	20.2 cm	15.2 m
喫水	12.3 cm	9.2 m
重心位置 (船首から)	70.0 cm	52.5 m
重量	26.3 kgf	11000.0 tf

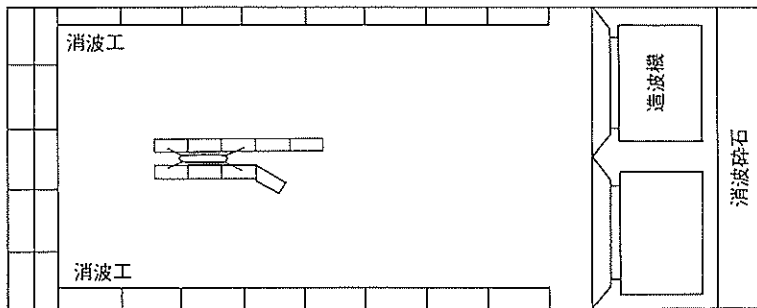


図-2 平面水槽内の造波機および模型の配置  
(動揺実験 波向 0°)

模型船舶は、10,000 DWT 程度の旅客船の1/75のものである。この縮尺は、平面水槽の大きさ、造波性能および6自由度計の測定範囲などを勘案して設定した。

図-3は接岸実験における計測装置の配置を示したものである。図中の数字は、使用したデジタルデータレコーダー (DR-2000B) のチャンネル番号である。1~4 chは防舷材の反力を測定するロードセル用、また、5~6 chは容量式波高計用のチャンネルである。その他にVHSビデオカメラによって接岸時の撮影をし、船舶の位置および接岸速度を測定した。

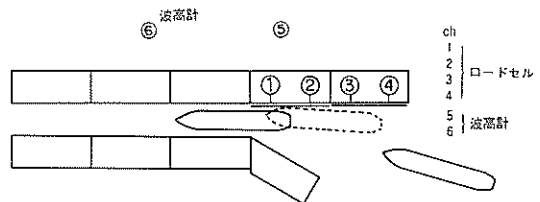


図-3 接岸実験における計測装置の配置

図-4 は動揺実験における計測装置の配置を示したものである。動揺実験においては防舷材の反力、波高、船舶の動揺量、係留索の張力を測定した。1～4 ch は防舷材反力、5～6 ch は波高、7～12 ch はサージ、スウェイ、ヒープ、ロール、ピッチ、ヨウ、13～16 ch は係留索張力の測定用のチャンネルである。

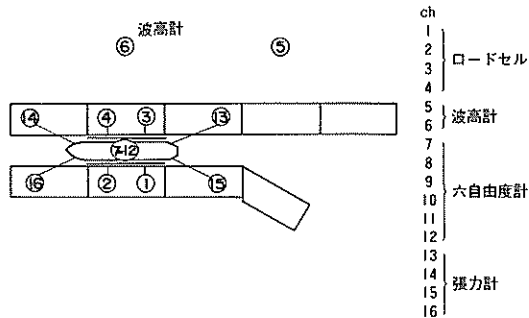


図-4 動揺実験における計測装置の配置

図-5 は、アクリル製の係留施設模型で9ユニットで構成される。ユニット1～4および7、8には、防舷材模型が2個づつ取り付けられている。ユニット9は、船舶が入港しやすいように30°の角度に配置されている。

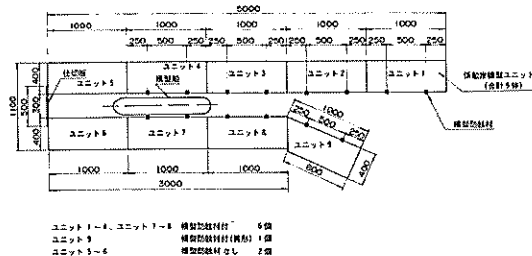


図-5 係留施設模型

係留施設模型1ユニットは、1.0m×0.4m×0.31mである。図-6はその構造図である。图中的前面取付板は、取りはずしが可能である。前面取付板を取付けた時にはケーン係船岸の様な非透過性の係留施設に相当し、前面取付板を取りはずした時には棧橋の様な透過性の係留施設に相当する。透過性および非透過性の係留施設とは別に、ユニット6～9の前面取付板を取りはずし、この面が透過性で、ユニット1～5の面が非透過性の係留施設を考えた。以上の3種類の係船岸をそれぞれ、壁面両側非透過（以下、両側非透過）、壁面両側透過（以下、両側透過）、壁面片側透過・片側非透過（以下、片側透

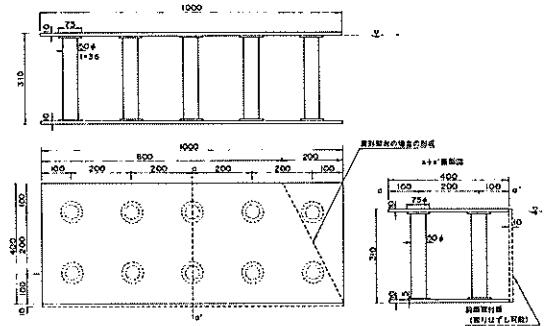


図-6 係留施設模型1ユニットの構造図

過)とする。以上3種類の係留施設について係留実験を行った。

(2) 防衝工

図-7 は、1～4および7～8のユニットに設置された模型防衝工の概要を示したものである。図-8は、模型防衝工の詳細図である。また、図-9は、模型防舷材の構造図である。模型防衝工の反力を測定するために2個の模型防舷材が取り付けられている。模型防衝工の前面受圧板には、15個のボールベアリングが取り付けられており、船舶の接岸時および航走時の係船岸法線平行方向の接岸力を軽減する。前面受圧板は吊り装置によって吊られていて、自重が模型防舷材に作用しないようにしている。

防衝工模型の前面受圧板に作用した接岸力は、模型防舷材の荷重伝達棒およびコイルスプリングを経てロードセルに伝達される。実際の係船岸において、たとえば、V型1000L（長さ1000mm）またはCELL型630H（高さ630mm）の防舷材が、ここで用いた係留施設模型1ユニット当たり15個取り付けられているものとする。

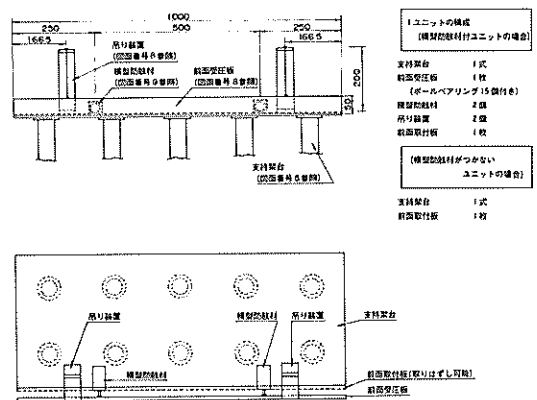


図-7 防衝工模型の取付位置

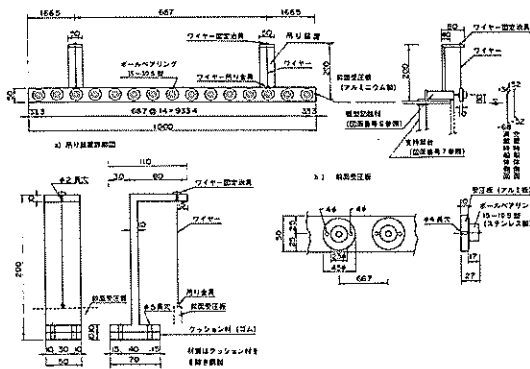


図-8 防衝工模型の詳細図

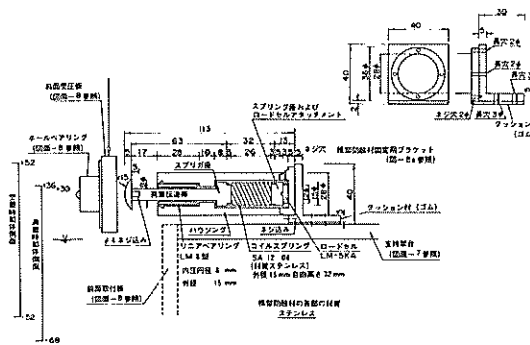


図-9 防舷材模型の構造図

これらの防舷材1個のばね定数はおよそ240 tf/mであって、これを模型換算すると0.42 kgf/cmとなり極めて軟らかいので模型製作が困難であった。そこで、係留施設模型1ユニットに15個の防舷材が取り付けられているとして、合計のばね定数を2個の模型防舷材で代表させて上記の模型防舷材を製作し実験を行った。模型防舷材のコイルスプリングのばね定数は3.16 kgf/cm(実機換算では1,778 tf/m)である。図-10はコイルスプリング1本の変位復元力特性を示したものである。ここでは1例を示したが他の模型防舷材のばね定数もほぼ同じである。なお、実際の係留船の防舷材の個数および変位復元力特性が係留船舶の動揺に及ぼす影響については数値シミュレーションを行って検討した。

(3) 係留索

図-11は模型係留索の特性を示したものである。模型係留索はワイヤにコイルスプリングを取り付けたもので先端の張力計で張力を測定する。ワイヤはコイルスプリングに較べて充分に硬く伸び率が小さいので、係留索の伸びはコイルスプリングの伸びと同一とみなせる。コイルスプリングは実際の係留索の特性と相似な特性を持

防舷材模型の特性 (コイルスプリング1本)

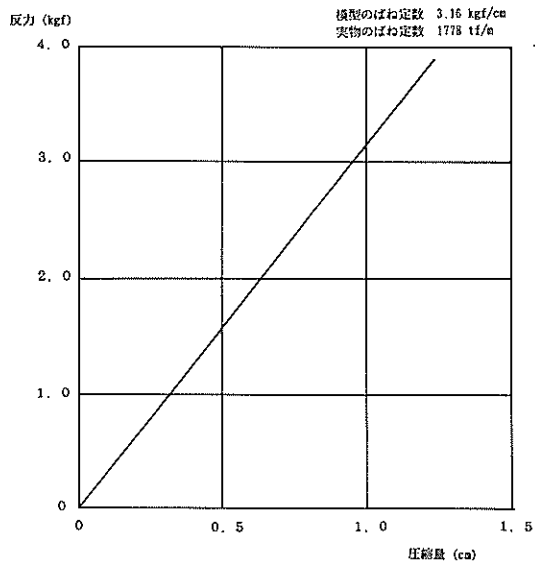


図-10 防衝工模型のコイルスプリングの変位復元力特性

係留索模型の特性 (コイルスプリング1本)

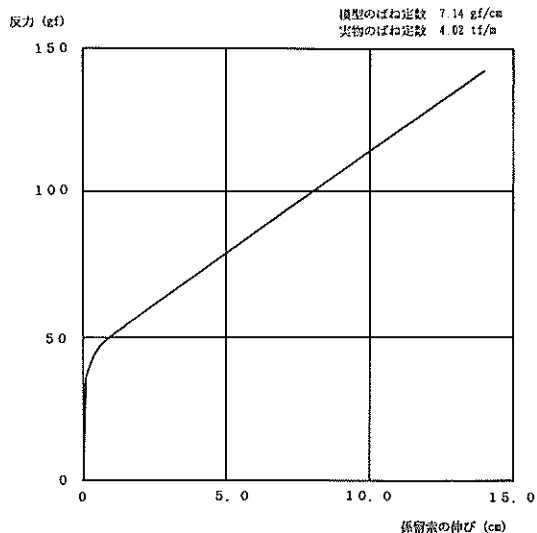


図-11 係留索模型のコイルスプリングの変位復元力特性

つものを以下のようにして選定した。実機ではφ50 mm、長さ40 mのナイロンロープを使用するものとする、新しいロープの変位復元力特性の原点と切断荷重の1/3.8に対する点とを結んだ平均ばね定数は4.02 tf/mである。模型縮尺が1/75であるので、所要の模型

係留索のばね定数は 7.14 gf/cm となる。ここに示したものは4本の係留索のうちの本1本の特性であるが、他の3本の模型係留索の特性は7.15, 7.14, 7.12 gf/cm ではほぼ同一である。

(4) 動揺測定

動揺6成分は6自由度計によって測定した。動揺6成分の正負は図-12に示すとおりである。すなわち各動揺成分の正方向は次のとおりである。

- サージ 船首方向への動揺
- スウェイ 左方向への動揺
- ヒープ 上方向への動揺
- ロール 右舷側に傾斜する動揺
- ピッチ 船首側に傾斜する動揺
- ヨウ 船首が左舷側に揺れる動揺

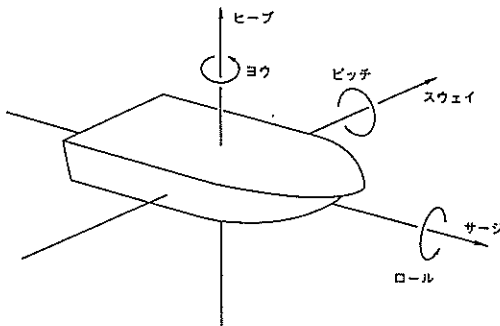


図-12 動揺6成分の正負

(5) データの計測および解析

図-13はデータ計測および解析のブロックチャートである。張力計、荷重計、波高計および6自由度計により測定されたデータは、それぞれのアンプを通してデジタルデータレコーダによって磁気テープに記録される。データレコーダによって記録されたデータは、大型電子計算機を用いて統計処理を行った。統計処理においては張力計および荷重計によって測定された係留索張力および防舷材反力については最大値を、波高計および6自由度計によって測定された波高および動揺6成分については有義値を計算した。

2.2 接岸実験の方法と実験ケース

(1) 接岸実験の方法

接岸実験は静水中と波浪中において、前進速度をもつ場合と前進速度をもたない場合のそれぞれについて行った。

接岸速度とは、船舶が接岸する時の速度  $V$  を係船岸法線方向の成分  $V_x$  とそれに直交する成分  $V_y$  に分けた時の  $V_y$  をいう。船舶の接岸速度  $V$  は船舶の接岸直前の速度  $V$  と係船岸法線に対する角度  $\theta$  を測定して、式

係留索の張力

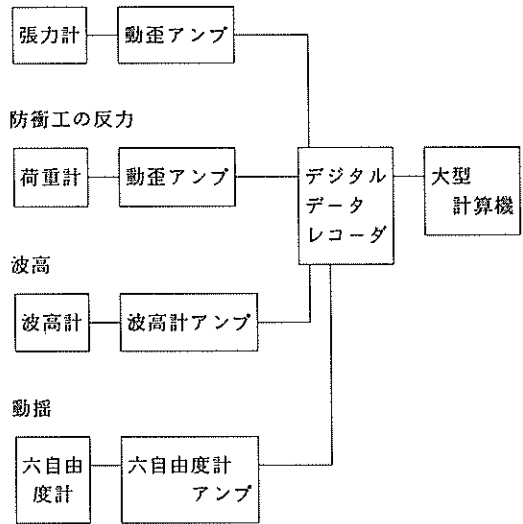


図-13 データ計測および解析のブロックチャート

(1)で求めた。

$$V_y = V \times \sin \theta \quad (1)$$

ここに、

$V$  : 船舶の速度ビデオカメラによって撮影し、コマ送りをして模型船舶のマーク点を読み取り、解析した速度。(cm/s)

$\theta$  : 船舶の接岸接岸方向の係船岸法線に対する角度 (deg)

である。

通常船舶は波高50~70 cm において0.3 m/s 程度以下の速度で接岸する。この接岸速度を模型に換算すると3.46 cm/s である。船舶係留誘導装置に作用する接岸力の模型実験では、港口部の波浪条件を2~3 m と想定しているので操船に困難さが伴うものと予想し、接岸速度が3.46 cm/s を超えることがあるものと考えた。そこで、接岸直前の船舶の速度を3.46 cm/s をやや上回る速度を目標にして実験を行った。また、接岸角度を変えて実験を行った。

(2) 測定項目

接岸実験においては模型防舷材の荷重計によって防舷工の反力を測定した。また、容量式波高計より波高および周期を測定した。

ビデオカメラを使用し、図-14に示すように模型船舶が前面受圧板と接触した時の項目について測定した。

$V_y$  : 接岸速度 (cm/s)



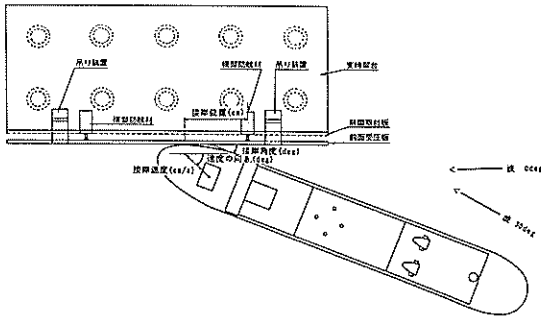


図-14 静水中および波浪中の接岸実験

- $\theta_v$ : 接岸速度の方向と係船岸法線とのなす角 (°)
- $\theta_s$ : 船体と係船岸法線とのなす角 (°)
- $L$ : 船体が前面受圧板と接した位置と防衝工までの距離 (cm)

(3) 実験ケース

接岸実験は静水中と波浪中において行った。表-2は波浪中接岸実験の波浪条件を示したものであるが、不規則波で、それぞれ波向2種類、波高5種類、周期5種類について行った。波向は0°および30°とした。また、波高は1~2.67 cmとした。これを実際の波高にすると75~200 cmである。周期については、0.577~1.732 sとした。これを実際の周期に換算すると5~15 sである。

接岸実験は、静水中において50回、波浪中においては各波浪条件毎に10回行った。

2.3 動揺実験の方法と実験ケース

(1) 動揺実験の方法

図-15-(1)は対称係留系の係留施設配置、また図-15-(2)は非対称係留系の係留施設配置である。後述する計算結果からみて、非対称係留系に比べ対称係留系が有利であるので、動揺実験は図-15-(1)に示す対称係留系についてのみ行った。対称係留系においては両側の係船岸にばね定数が左右対称になるように模型係留索によって模型船舶を係留する。

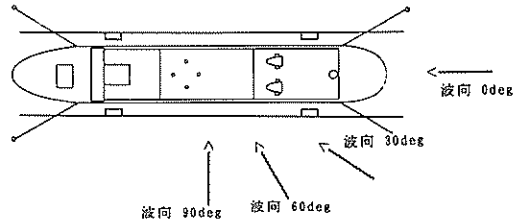


図-15-(1) 対称係留系の係留施設配置

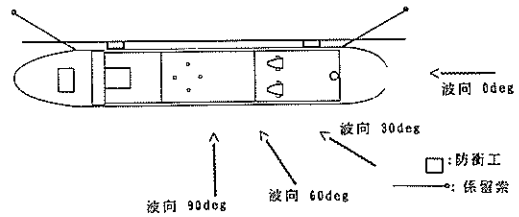


図-15-(2) 非対称係留系の係留施設配置

表-2 実験ケース 接岸実験

NO.	係留配置図	波浪条件		
		波向 (deg)	周期 (s)	波高 (cm)
ES01		IREG 0	5 ~15 (0.58~1.73)	75 ~200 (1.00~2.67)
ES32		IREG 30	5 ~15 (0.58~1.73)	75 ~200 (1.00~2.67)

備考  
 周期 (s)  
 5, 7, 10, 12, 15  
 (0.58, 0.81, 1.16, 0.37, 1.73)  
 波高 (cm)  
 75, 100, 125, 150, 200  
 (1.00, 1.33, 1.67, 2.00, 2.67)

表-3 動揺実験の実験ケース

対称係留						
HARD FENDER						
NO.	係留配置図	防舷材 係留索 数	波浪条件 波向 (deg)	周期 (s)	波高 (cm)	壁面
E000		4 4	IREG 0	5 ~15 (0.58~1.73)	75 ~200 (1.00~2.67)	両側非透過
E30A		4 4	IREG 30	5 ~15 (0.58~1.73)	75 ~200 (1.00~2.67)	両側非透過
E30B		4 4	IREG 30	5 ~15 (0.58~1.73)	75 ~200 (1.00~2.67)	片側透過 片側非透過
E30C		4 4	IREG 30	5 ~15 (0.58~1.73)	75 ~200 (1.00~2.67)	両側透過

備考  
 周期 (s)  
 5, 7, 10, 12, 15  
 (0.58, 0.81, 1.18, 0.37, 1.73)  
 波高 (cm)  
 75, 100, 125, 150, 200  
 (1.00, 1.33, 1.67, 2.00, 2.67)

(2) 測定項目

動揺実験においては防舷工の反力、係留索の張力、波高、周期および船舶の動揺6成分を測定する。

(3) 実験ケース

表-3に動揺実験の実験ケースを示す。波浪条件は不規則波についてそれぞれ波向2種類、波高5種類、周期5種類である。表-3のケースNo.は頭文字のEが実験であることを意味し、続00および30が波向を表す。また、波向30°においては係船岸の透過性を変えているので末尾の文字Aが両側非透過、Bが片側透過、Cが両側透過を意味する。

図-16に波向30°の場合の模型係留施設配置を示す。また0°については先に示す図-2のとおりである。

3. 船舶係留誘導装置に作用する接岸力の実験結果

3.1 静水中の接岸力

(1) 実験結果の整理の方法

模型船舶を用いて静水中において接岸実験を行った。接岸直前の船舶の速度は3.16 cm/s以上を目標にした。実験結果を整理し、接岸速度と防舷工模型の反力との関係を取りまとめた。防舷工模型の反力は模型防舷工に取り

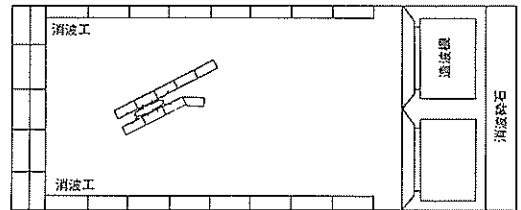


図-16 模型係留施設配置  
(動揺実験における波向30°の場合)

付けられた2個のロードセルに作用した荷重の和の最大値である。

接岸実験の解析方法は次のとおりである。港湾の施設の技術上の基準・同解説に基づいて、船舶の接岸エネルギーを式(2)によって計算する<sup>3), 4)</sup>。

$$E_r = \frac{W_s \cdot V_y^2}{2g} \times C_e \times C_m \times C_s \times C_e \quad (2)$$

ここに、

$E_r$ : 船舶の接岸エネルギー (tf・m)

$g$ : 重力加速度 (9.8 m/s<sup>2</sup>)

$W_s$ : 船舶の排水量 (tf)

$W_s = 0.0263 \text{ (tf)} = 26.3 \text{ (kgf)}$

模型船舶の重量を秤によって測定した

$V_r$ : 船舶の接岸速度 (m/s)

(法線に直交する方向成分)

$C_e$ : 偏心係数

$C_m$ : 仮想質量係数

$C_s$ : 柔軟性係数

$C_c$ : パースの形状係数

である。

また、偏心係数は式(3)で計算される。

$$C_e = \frac{1}{\{1 + (l/r)^2\}} \quad (3)$$

ここに、

$l$ : 係留施設に平行に測った接触点から船舶の重心までの距離 (cm)

模型船舶において実測した距離

$r$ : 環動半径、重心を通る鉛直軸まわりの回転半径 (cm)

( $r = 0.25 \times L_{PP}$  を使用した)

である。

さらに、仮想質量係数は式(4)で計算される。

$$C_m = 1 + \frac{\pi}{2 C_b} \cdot \frac{d}{B} \quad (4)$$

ここに、

$C_b$ : ブロック係数

$$C_b = \frac{W_s}{L_{PP} B d w_0}$$

$d$ : 喫水 (m)

$B$ : 船幅 (m)

$L_{PP}$ : 垂線間長 (m)

$w_0$ : 単位体積重量 (tf/m)

である。

仮想質量係数  $C_m$  は 1.8 として計算し、実験値と比較した。このほか柔軟性係数  $C_s$  およびパースの形状係数  $C_c$  は 1.0 とした<sup>(1), (2)</sup>。

模型防衝工に取り付けられた 2 つの模型防舷材の反力は以下のようにして求めた。2 つの模型防衝工の反力を  $P_1$  および  $P_2$ 、それらの変位を  $D_1$  および  $D_2$  とする。吸収エネルギーと接岸エネルギーとの関係は式(5)で表される。式(5)の左辺は吸収エネルギーを、右辺は接岸エネルギーを示す。ここでは 2 つの模型防舷材のばね定数は同一とし  $K$  とした。

$$\frac{1}{2K} (P_1^2 + P_2^2) = \frac{W}{2g} C_e C_m V_r^2 \quad (5)$$

図-17 は船舶が  $P_2$  の防舷材から  $L$  の位置に接岸した時の図である。2 つの防舷材間隔は 50 cm である。接岸力を  $P$  とするとここに、 $P_1$  と  $P_2$  の関係は式(6)で表される。

$$P_1 = \frac{50-L}{50} P, \quad P_2 = \frac{L}{50} P \quad (6)$$

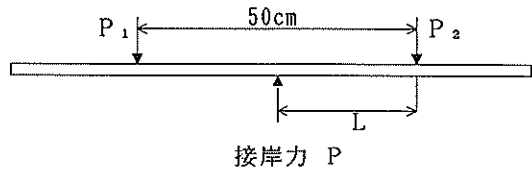


図-17 船舶接岸力と接岸力の模式図

式(5)の左辺に、式(6)を代入して式(7)を得る。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2K} (P_1^2 + P_2^2) \\ &= \frac{1}{2K} \left\{ \left( \frac{50-L}{50} P \right)^2 + \left( \frac{L}{50} P \right)^2 \right\} \\ &= \frac{P^2}{2K} \left( 1 - \frac{2}{50} L + \frac{2}{50^2} L^2 \right) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、

$$\left( 1 - \frac{2}{50} L + \frac{2}{50^2} L^2 \right) = \frac{1}{Z} \quad (8)$$

とすると、式(5)の右辺を  $E_f$  として、式(5)に式(7)および(8)を代入すると式(9)を得る。

$$\frac{P^2}{2K} \cdot \frac{1}{Z} = E_f \quad (9)$$

式(9)から接岸力  $P$  として、式(10)を得る。

$$P = \sqrt{2 K Z E_f} \quad (10)$$

## (2) 実験結果

図-18-(1)~(2) は静水中における接岸実験の結果を示したものである。図-18-(1) は前進速度をもつ接岸時の結果であり、図-18-(2) は前進速度をもたない接岸時の結果である。図の横軸は接岸速度  $V_r$ 、縦軸は接岸力  $P$  である。図-19-(1)~(2) は、式(10)で求めた接岸力の計算値を示したもので、図-19-(1) は前進速度を

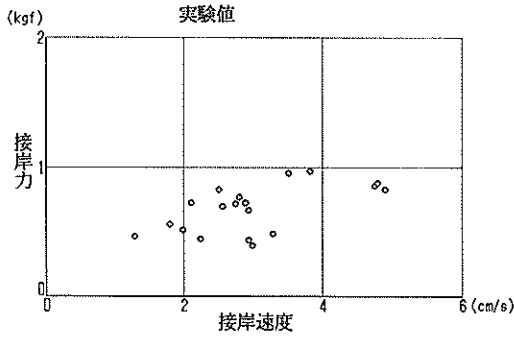


図-18-(1) 静水中接岸実験の接岸速度と接岸力との関係  
(前進速度をもつ接岸)

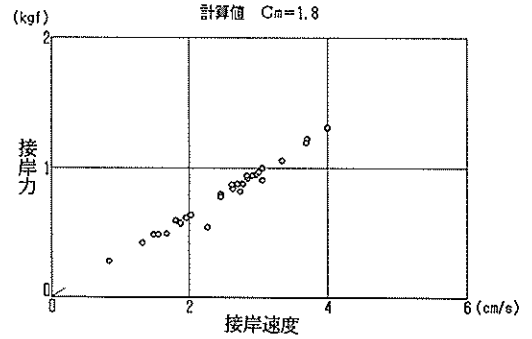


図-19-(2) 静水中接岸の接岸速度と接岸力との関係  
(前進速度をもたない接岸, 計算値  $C_m=1.8$ )

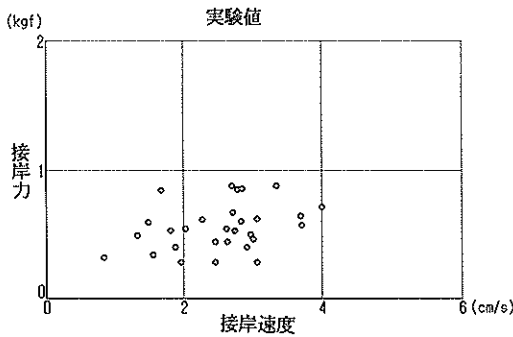


図-18-(2) 静水中接岸実験の接岸速度と接岸力との関係  
(前進速度をもたない接岸)

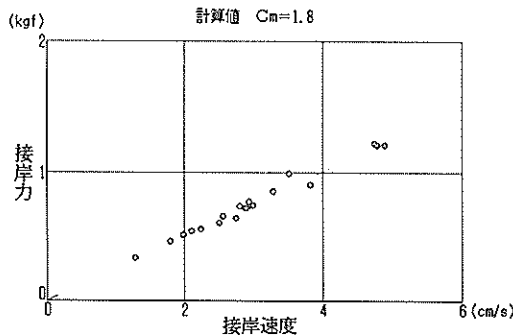


図-19-(1) 静水中接岸の接岸速度と接岸力との関係  
(前進速度をもつ接岸, 計算値  $C_m=1.8$ )

もつ場合、図-19-(2)は前進速度をもたない場合の計算結果である。船舶係留誘導装置に作用する接岸力は、前進速度をもつ接岸の場合も前進速度をもたない接岸の場合も計算値と実験値の上限がほぼ一致しており、接岸力は係船岸の法線に直角方向の速度成分  $V_r$  を接岸速度として、技術基準の方法に従って計算してよいと言える。ただし、接岸速度が  $4 \text{ cm/s}$  を超えるときには接岸力が接岸速度に比例せず、接岸力は  $1 \sim 1.2 \text{ kgf}$  とほぼ一定値になっている。この原因は明確ではないが荷重計の性能に起因することと考えられるので、この点に留意して実験値の解析を行うこととする。

前進速度をもつ接岸実験においては前進速度をもつために船舶は防衝工に接しながら前進する。図-20-(1)~(3)はこの接岸位置の変化が接岸力に及ぼす影響を調べるために、防衝工に接岸した位置を  $5 \text{ cm}$ 、 $10 \text{ cm}$ 、 $15 \text{ cm}$  と変えて計算した結果を示したものである。接岸点の相違による接岸力の差異は小さい。

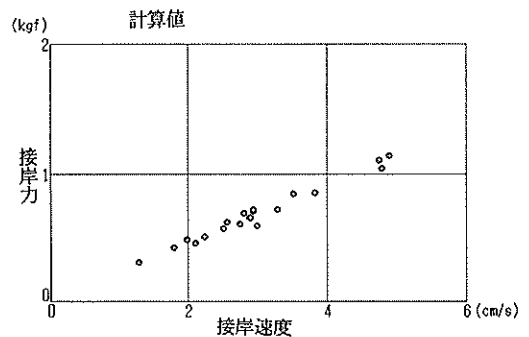


図-20-(1) 接岸速度と接岸力との関係  
(接岸位置を  $5 \text{ cm}$  変化させた場合)

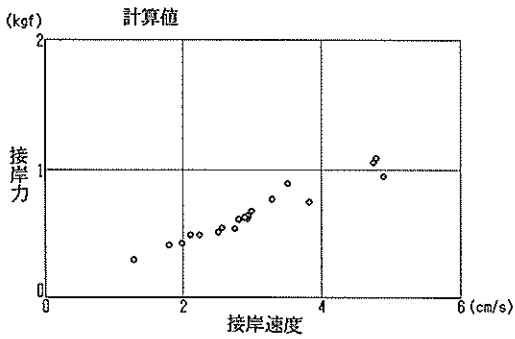


図-20-(2) 接岸速度と接岸力との関係  
(接岸位置を10 cm 変化させた場合)

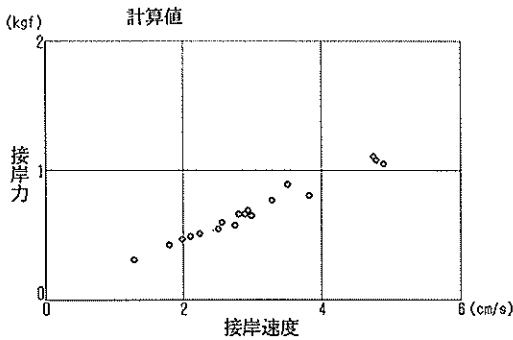


図-20-(3) 接岸速度と接岸力との関係  
(接岸位置を15 cm 変化させた場合)

### 3.2 波浪中の接岸力

波浪条件が接岸力へ及ぼす影響を調べるために、波周期および波向を変えて接岸実験を行った。図-21-(1)~図-21-(24)は波向 $0^\circ$ の場合の結果を示したものである。図の横軸は接岸速度、また縦軸は接岸力である。図-(1)~(5)は波周期が0.577 s、図-(6)~(10)は波周期が0.808 s、図-(11)~(15)は波周期が1.155 s、図-(16)~(20)は波周期が1.386 s、図-(21)~(24)は波周期が1.732 sであり、それぞれの周期について有義波高1.00, 1.33, 1.67, 2.00, 2.67 cmのときの実験結果である。ただし、波周期1.732 sで有義波高1.67 cmの実験結果は不良であったので作図していない。また、図-22-(1)~図-22-(24)は波向 $30^\circ$ の場合の結果を示したものである。波浪条件の詳細は図-21と同様である。なお、図の上部に示した数値は最小自乗法によって求めた回帰式の勾配である。

#### (1) 波向 $0^\circ$ の場合

図-21-(1)~(5), (6)~(10)などのように同一周期に対して、波高を変えて実験した結果を比較してみる。ここでは、実験値から最小自乗法によって求めた接岸速度と接岸力の回帰式の勾配を指標にして比較する。まず、接岸力は波高の増加と共におおむね大きくなっていると言える。ただし、波周期0.577 sのときで $H_{1/3}=2.67$  cmのときの接岸力は $H_{1/3}=2.00$  cmのときよりやや小さい。また、波周期0.808 sの波高2.0 cmおよび2.67 cmのときには、接岸速度が4 cm/s以上であっても接岸力が1 kgf程度にしかならず、回帰式の勾配で0.161 kgf/(cm/s)または0.233 kgf/(cm/s)となっており、波高がこれより小さいときの場合より接岸力はむしろ小さ目である。波周期1.155 sで有義波高2.67 cm、波周期1.732 sで有義波高2.67 cmのときにも同様のことが言える。これらは、静水中の実験において述べたように荷重計の性能に起因すると考えられる。

図-21-(1), (6), (11), (16), (21)のように有義波高1.00 cmのときに波周期を変えて実験した結果を比較してみる。回帰式の勾配は順に、0.185, 0.182, 0.199, 0.205, 0.215 kgf/(cm/s)であり、長周期波中における接岸力が、やや大き目であることが分る。この傾向は他の波高についても同様であるが、波周期0.577 sで有義波高1.67 cm, 2.00 cm, 2.67 cmのときには他の条件より接岸力がやや大きい。

波浪中の接岸実験結果と図19-(1)~(2)の計算値とを比較すると、波浪中においては長周期波中または波高が大きいときに、接岸力は静水中よりも大きいと言える。これは船舶の動揺に起因すると考える。

#### (2) 波向 $30^\circ$ の場合

図-22-(1)~(5), (6)~(10)などのように同一周期に対して、波高を変えて実験した結果を比較してみる。波向 $0^\circ$ のときと同様に、最小自乗法によって求めた接岸速度と接岸力の回帰式の勾配を指標にして比較する。まず、接岸力は波高の増加と共におおむね大きくなっていると言える。ただし、波周期0.577 sのときで $H_{1/3}=2.67$  cmおよび $H_{1/3}=1.67$  cmのときの接岸力は、それぞれ $H_{1/3}=2.00$  cmおよび $H_{1/3}=1.67$  cmのときよりやや小さい。また、波周期0.808 sの有義波高1.67 cmおよび2.00 cmのときには、接岸速度が4 cm/s以上であっても接岸力が1 kgf程度にしかならず、回帰式の勾配で0.226 kgf/(cm/s)または0.196 kgf/(cm/s)となっており、むしろ波高がこれより小さいときの場合より接岸力が小さ目である。波周期1.155 sで有義波高2.67 cm、波周期1.732 sで有義波高2.67 cmのときにも同様のことが言える。

図-22-(1), (6), (11), (16), (21) などのように有義波高 1.00 cm のときに波周期を変えて実験した結果を比較してみる。回帰式の勾配は順に, 0.176, 0.148, 0.142, 0.160, 0.199 kgf/(cm/s) であり, 長周期波中における接岸力がやや大き目であることが分る。この傾向は他の波高についても同様であるが, 波周期 0.577 s で有義波高 1.33 cm, 2.00 cm, 2.67 cm のときには他の条件より接岸力がやや大きい。

波向  $0^\circ$  の場合と同様に, 波浪中の接岸実験結果と図 19-(1)~(2) の計算値とを比較すると, 波向  $30^\circ$  の場合においても, 波浪中においては長周期波中または波高が大きいときに, 接岸力は静水中よりも大きいと言える。これは船舶の動揺に起因すると言える。

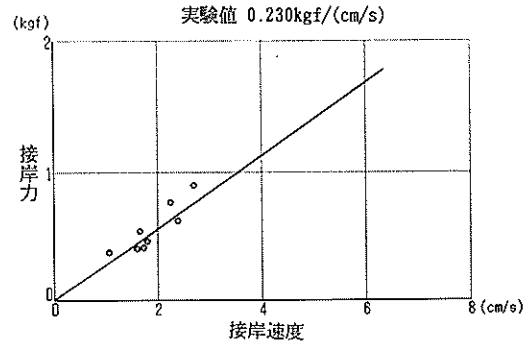


図-21-(3) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向  $0^\circ$ , 有義波周期 0.577s,  
有義波高 1.67 cm)

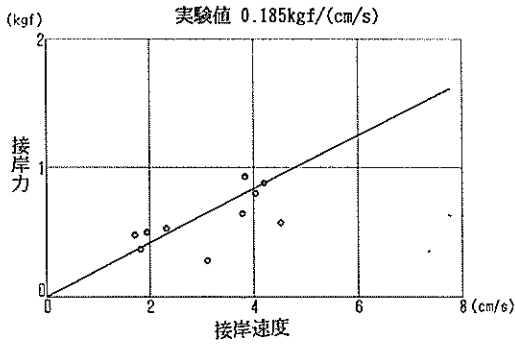


図-21-(1) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向  $0^\circ$ , 有義波周期 0.577s,  
有義波高 1.00 cm)

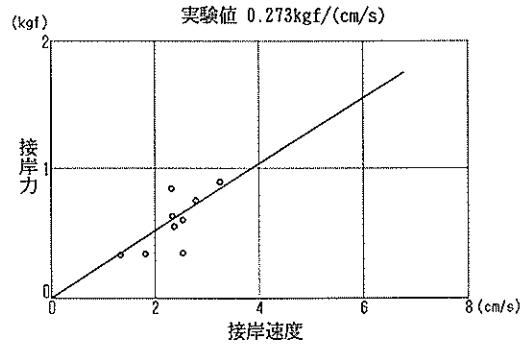


図-21-(4) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向  $0^\circ$ , 有義波周期 0.577s,  
有義波高 2.00 cm)

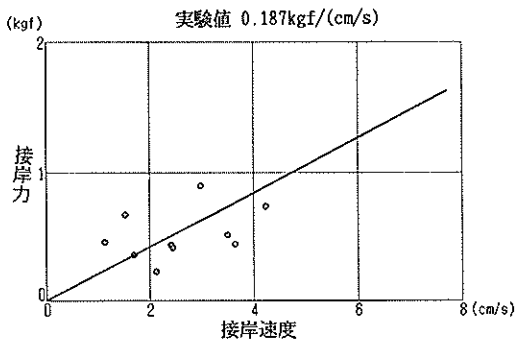


図-21-(2) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向  $0^\circ$ , 有義波周期 0.577s,  
有義波高 1.33 cm)

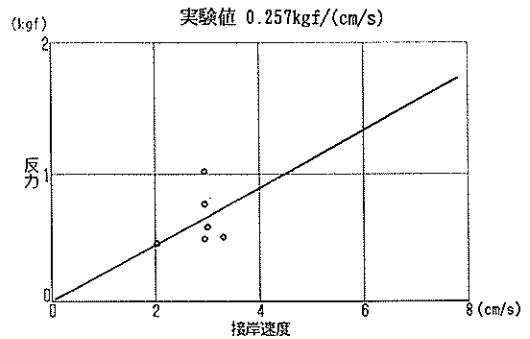


図-21-(5) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向  $0^\circ$ ; 有義波周期 0.577s,  
有義波高 2.67 cm)

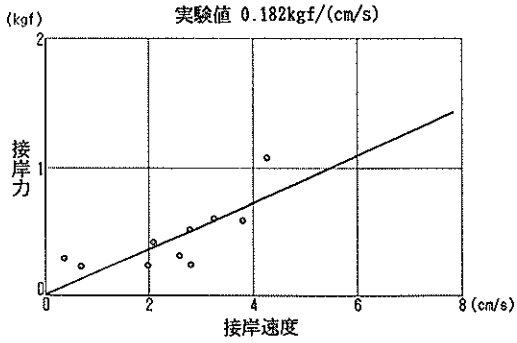


図-21-(6) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向0°, 有義波周期0.808s,  
有義波高1.00 cm)

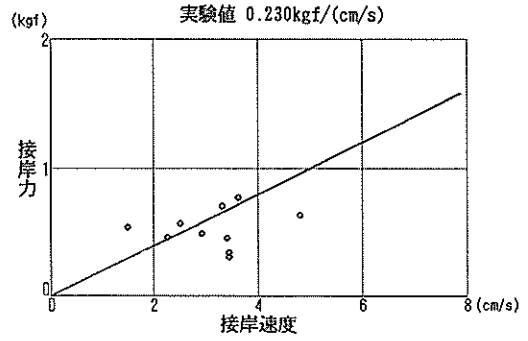


図-21-(9) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向0°, 有義波周期0.808s,  
有義波高2.00 cm)

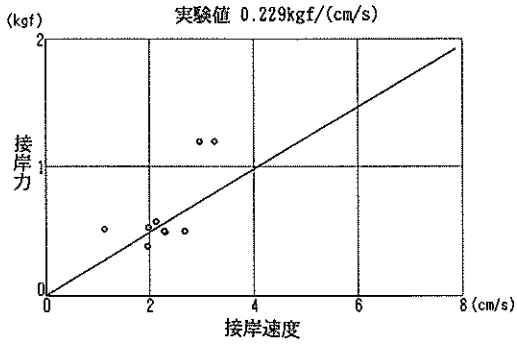


図-21-(7) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向0°, 有義波周期0.808s,  
有義波高1.33 cm)

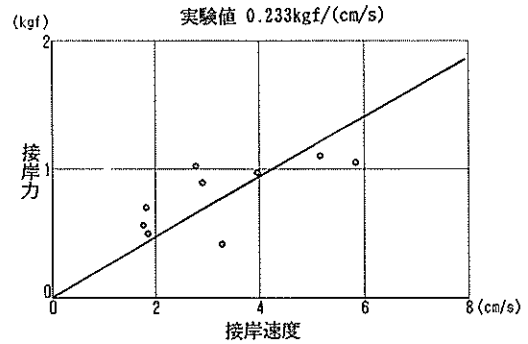


図-21-(10) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向0°, 有義波周期0.808s,  
有義波高2.67 cm)

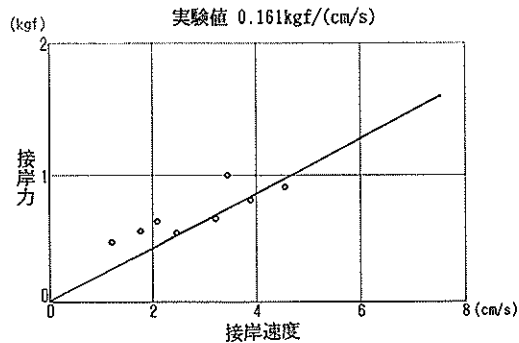


図-21-(8) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向0°, 有義波周期0.808s,  
有義波高1.67 cm)

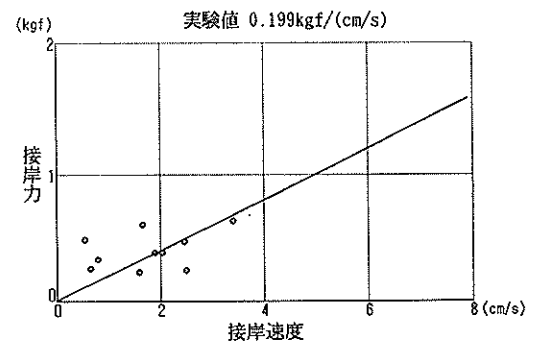


図-21-(11) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向0°, 有義波周期1.155s,  
有義波高1.00 cm)

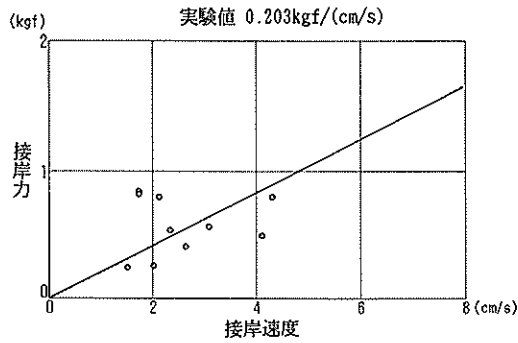


図-21-(12) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向0°, 有義波周期1.155s,  
有義波高1.33cm)

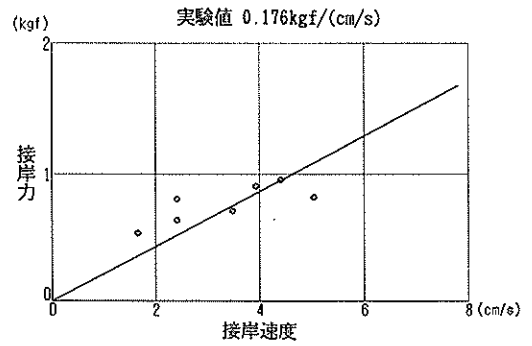


図-21-(15) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向0°, 有義波周期1.155s,  
有義波高2.67cm)

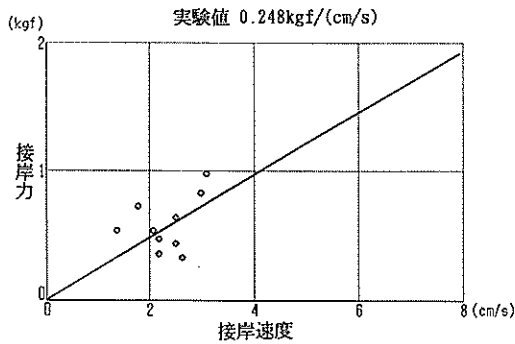


図-21-(13) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向0°, 有義波周期1.155s,  
有義波高1.67cm)

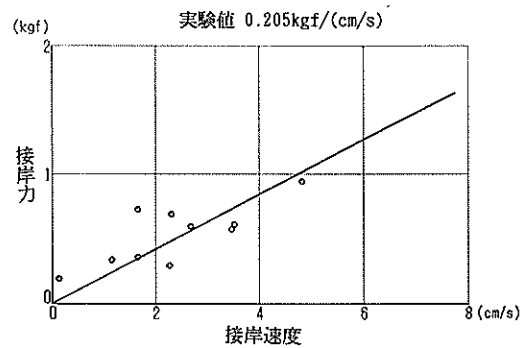


図-21-(16) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向0°, 有義波周期1.386s,  
有義波高1.00cm)

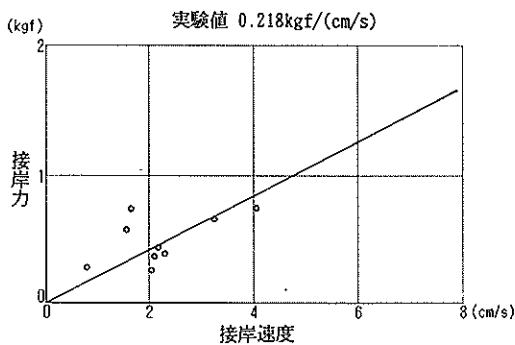


図-21-(14) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向0°, 有義波周期1.155s,  
有義波高2.00cm)

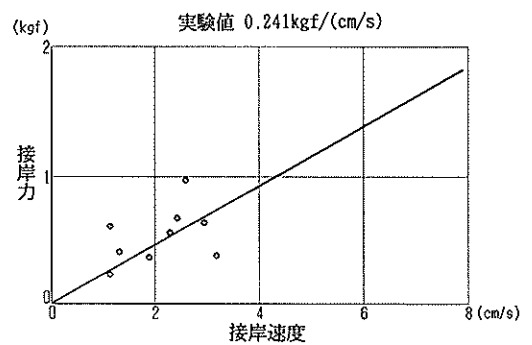


図-21-(17) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向0°, 有義波周期1.386s,  
有義波高1.33cm)



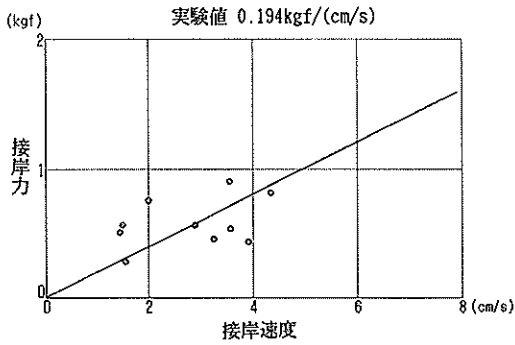


図-21-(18) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向0°, 有義波周期1.386s,  
有義波高1.67cm)

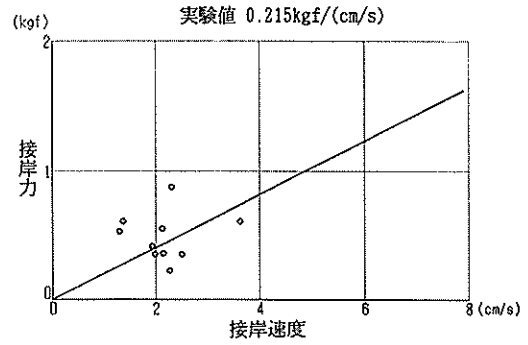


図-21-(21) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向0°, 有義波周期1.732s,  
有義波高1.00cm)

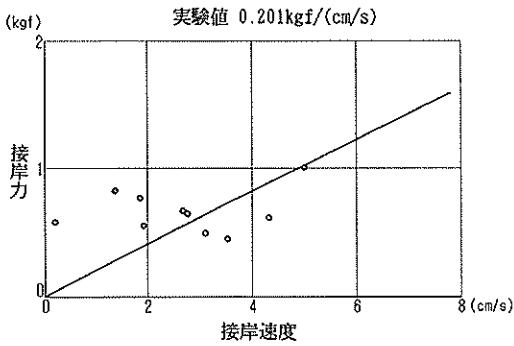


図-21-(19) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向0°, 有義波周期1.386s,  
有義波高2.00cm)

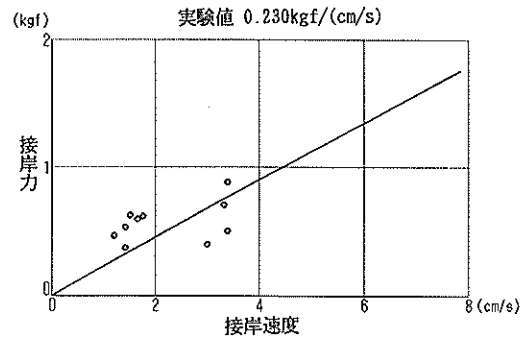


図-21-(22) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向0°, 有義波周期1.732s,  
有義波高1.33cm)

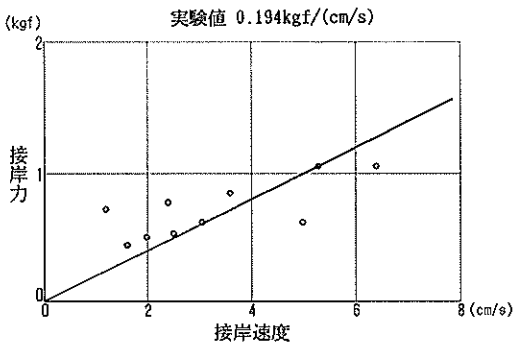


図-21-(20) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向0°, 有義波周期1.386s,  
有義波高2.67cm)

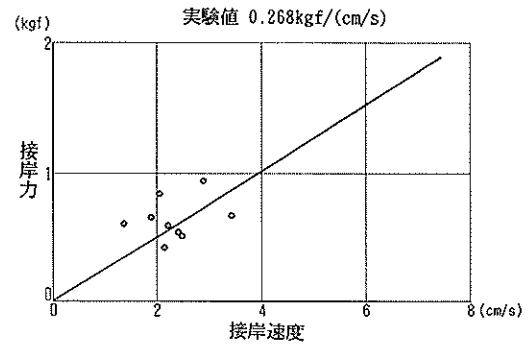


図-21-(23) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向0°, 有義波周期1.732s,  
有義波高2.00cm)

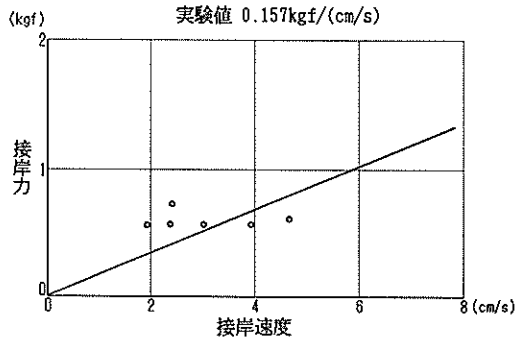


図-21-(2A) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向  $0^\circ$ , 有義波周期 1.732s,  
有義波高 2.67 cm)

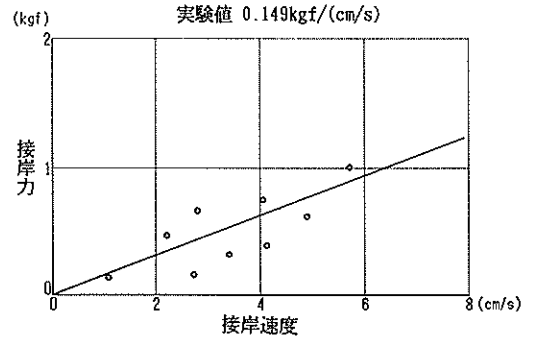


図-22-(3) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向  $30^\circ$ , 有義波周期 0.577s,  
有義波高 1.67 cm)

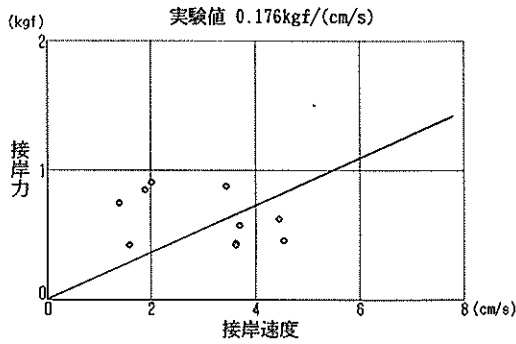


図-22-(1) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向  $30^\circ$ , 有義波周期 0.577s,  
有義波高 1.00 cm)

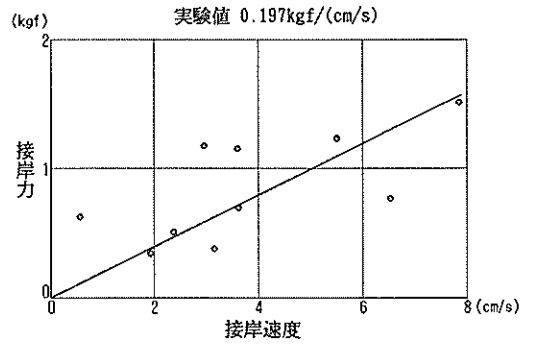


図-22-(4) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向  $30^\circ$ , 有義波周期 0.577s,  
有義波高 2.00 cm)

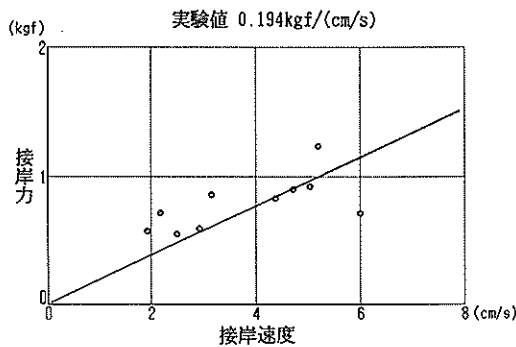


図-22-(2) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向  $30^\circ$ , 有義波周期 0.577s,  
有義波高 1.33 cm)

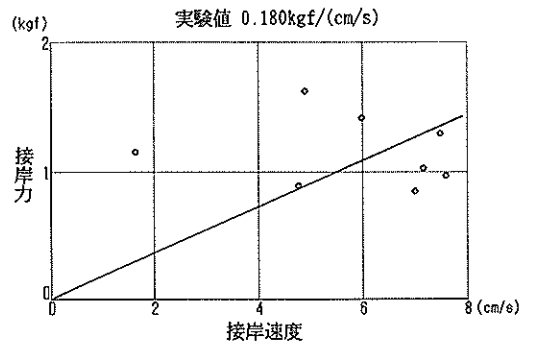


図-22-(5) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向  $30^\circ$ , 有義波周期 0.577s,  
有義波高 2.67 cm)

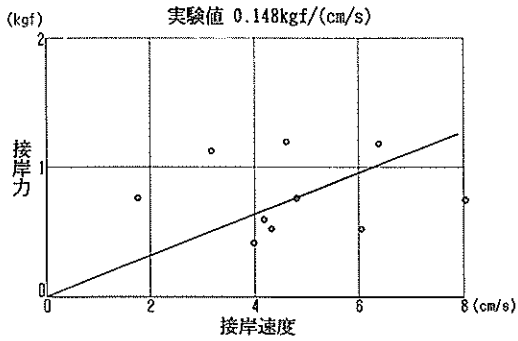


図-22-(6) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向 30°, 有義波周期 0.808s,  
有義波高 1.00 cm)

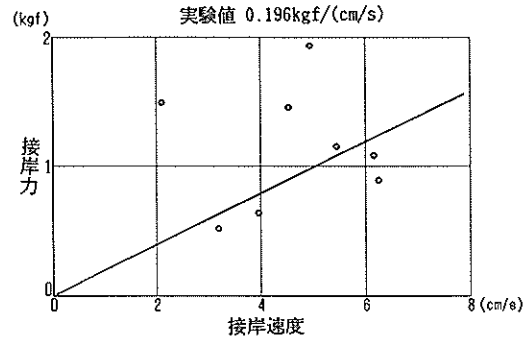


図-22-(9) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向 30°, 有義波周期 0.808s,  
有義波高 2.00 cm)

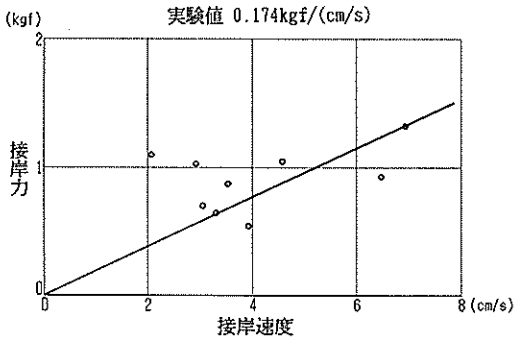


図-22-(7) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向 30°, 有義波周期 0.808s,  
有義波高 1.33 cm)

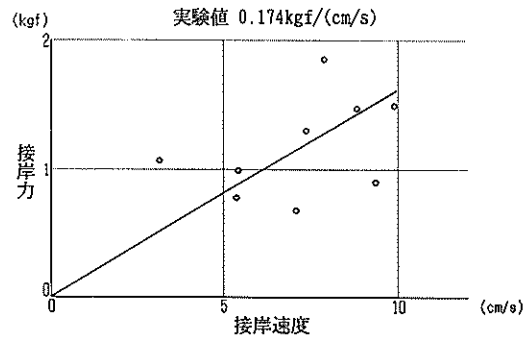


図-22-(10) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向 30°, 有義波周期 0.808s,  
有義波高 2.67 cm)

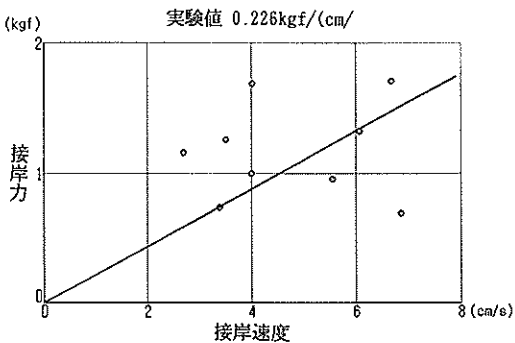


図-22-(8) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向 30°, 有義波周期 0.808s,  
有義波高 1.67 cm)

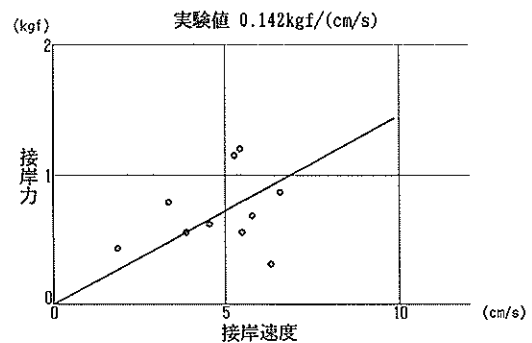


図-22-(11) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向 30°, 有義波周期 1.155s,  
有義波高 1.00 cm)

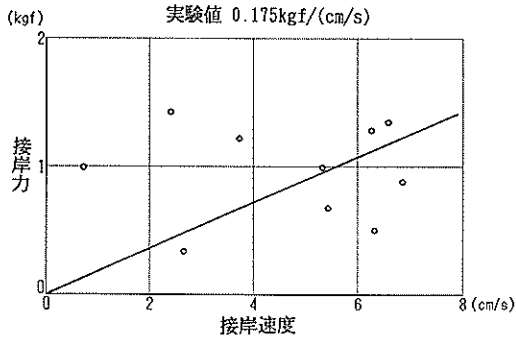


図-22-(12) 接岸速度と接岸力との関係  
 (波向 30°, 有義波周期 1.155s,  
 有義波高 1.33 cm)

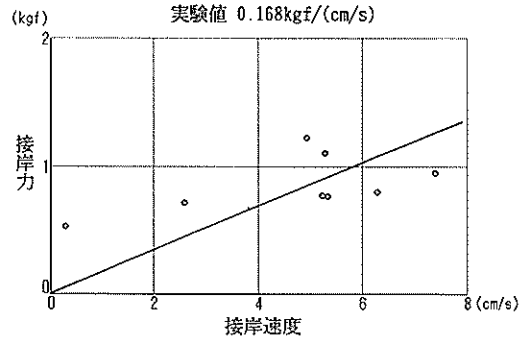


図-22-(15) 接岸速度と接岸力との関係  
 (波向 30°, 有義波周期 1.155s,  
 有義波高 2.67 cm)

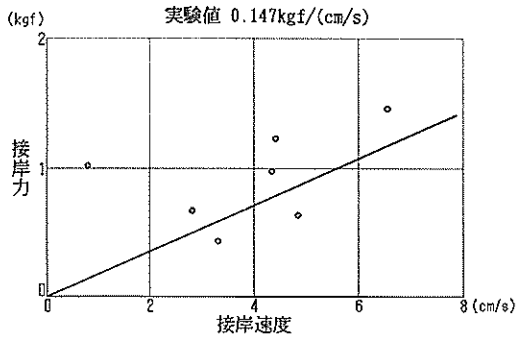


図-22-(13) 接岸速度と接岸力との関係  
 (波向 30°, 有義波周期 1.155s,  
 有義波高 1.67 cm)

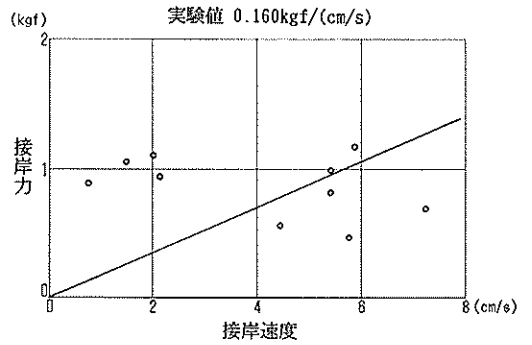


図-22-(16) 接岸速度と接岸力との関係  
 (波向 30°, 有義波周期 1.386s,  
 有義波高 1.00 cm)

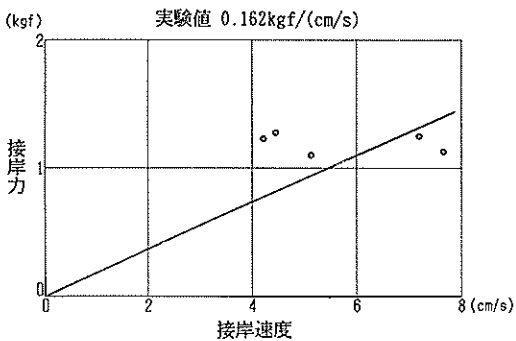


図-22-(14) 接岸速度と接岸力との関係  
 (波向 30°, 有義波周期 1.155s,  
 有義波高 2.00 cm)

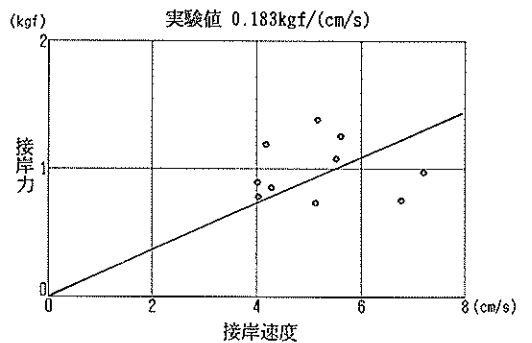


図-22-(17) 接岸速度と接岸力との関係  
 (波向 30°, 有義波周期 1.386s,  
 有義波高 1.33 cm)

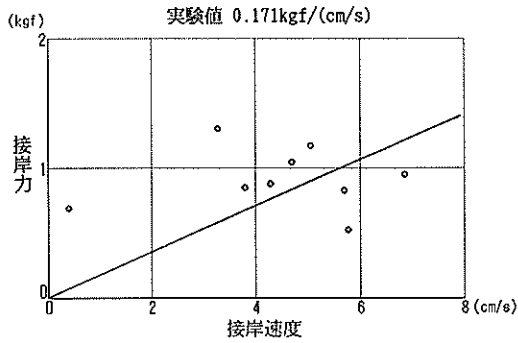


図-22-(18) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向 30°, 有義波周期 1.386s,  
有義波高 1.67 cm)

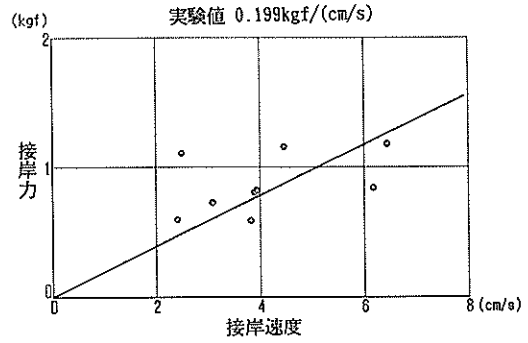


図-22-(21) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向 30°, 有義波周期 1.732s,  
有義波高 1.00 cm)

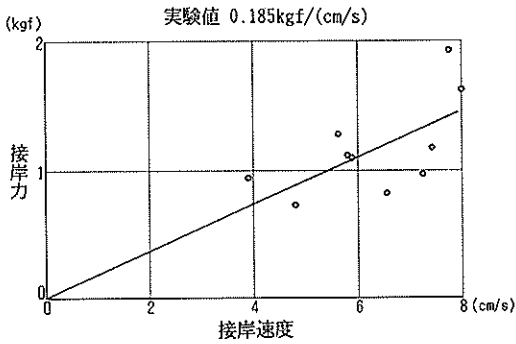


図-22-(19) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向 30°, 有義波周期 1.386s,  
有義波高 2.00 cm)

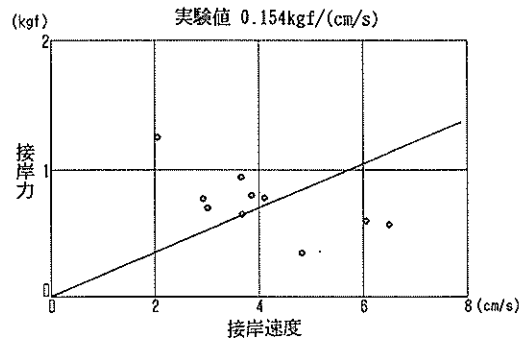


図-22-(22) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向 30°, 有義波周期 1.732s,  
有義波高 1.33 cm)

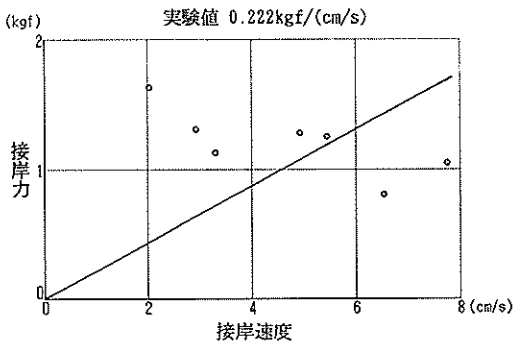


図-22-(20) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向 30°, 有義波周期 1.386s,  
有義波高 2.67 cm)

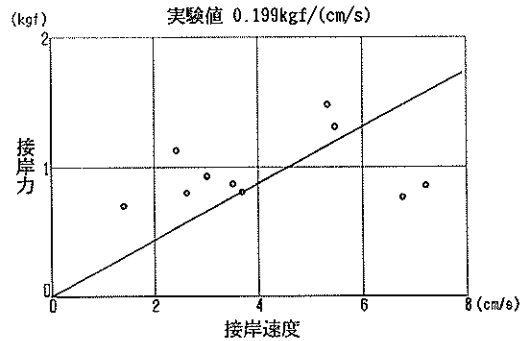


図-22-(23) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向 30°, 有義波周期 1.732s,  
有義波高 1.67 cm)

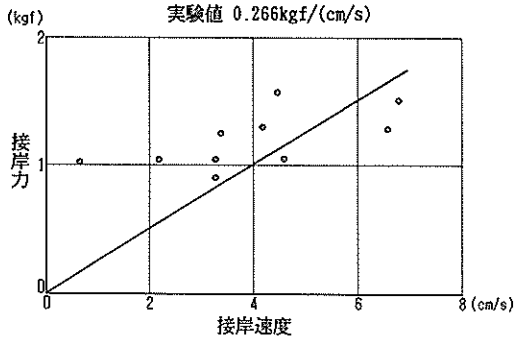


図-22-(24) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向 30°, 有義波周期 1.732s,  
有義波高 2.00 cm)

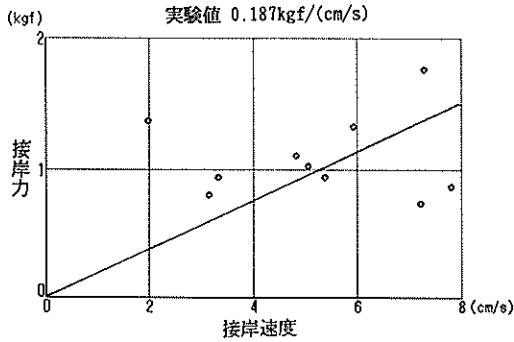


図-22-(25) 接岸速度と接岸力との関係  
(波向 30°, 有義波周期 1.732s,  
有義波高 2.67 cm)

## 4. 対称係留系における動揺実験

### 4.1 自由振動実験

実験水槽において模型船舶のロール、ピッチ、ヒーブについて、自由振動実験を行った。自由振動実験の結果より対数減衰率  $\delta$  を求め減衰定数  $h$  を求めた<sup>9)</sup>。また、固有周期を求めた。ただし、ヒーブとピッチについては減衰が大きく有効な結果が得られず減衰定数および固有周期を求めることができなかった。

図-23 は減衰自由振動の振幅  $x$  と時間  $t$  との関係を示したものである。図-23 において  $n$  周期だけ離れている 2 つのピークの比より対数減衰率  $\delta$  は式(11)で定義される。

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{x_i}{x_{i+n}} = \frac{2\pi h}{\sqrt{1-h^2}} \quad (11)$$

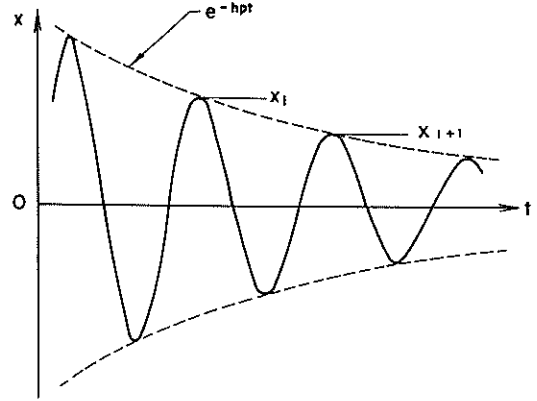


図-23 粘性減衰を受ける自由振動の振幅と時間の関係

通常の振動系 ( $h \ll 1$ ) では、

$$\delta = 2\pi h \quad (12)$$

$$h = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{x_i}{x_{i+n}} \quad (13)$$

と考えてよい。

上記の式(11)~(13)より求めた模型船舶のロールの固有周期は 2.18 s、減衰定数は 0.14 である。

ロールについては、渦の発生による減衰力が作用するが計算ではこれを求めることができない。したがって、数値シミュレーションにおいてロールの減衰定数は自由振動実験によって得られたものを用いる。

### 4.2 壁面両側非透過係船岸の場合の動揺実験結果

#### (1) 概要

図-24-(1)~(6) は対称係留系において、両側非透過で波向 0°, また、図-25-(1)~(6) は同じく波向 30° のときの実験結果の、各動揺成分の動揺両振幅の有義値と有義波周期との関係を有義波高をパラメータとして図示したものである。図は波向の相違による動揺量を比較しやすいように各動揺成分ごとに、波向 0° と 30° の結果を並べて掲載している。また、図番号の(1)~(6) はそれぞれ動揺 6 成分に対応しており、(1) はサージ、(2) はスウェイ、(3) はヒーブ、(4) ロール、(5) はピッチ、(6) はヨウについて示したものである。なお、図面の数値はすべて実機換算して示している。

図-16 に示したように係船岸は 9 つのユニット模型を配置して製作しているが、波向 0° の場合には図の上側にある係船岸の法線が波向の進行方向と一致する。ま

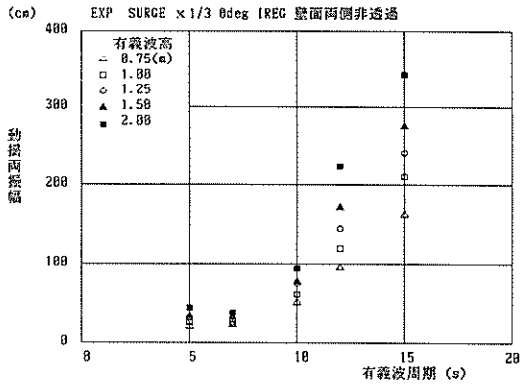


図-24-(1) 有義波周期とサージの動揺両振幅の関係  
(波向0°両側非透過)

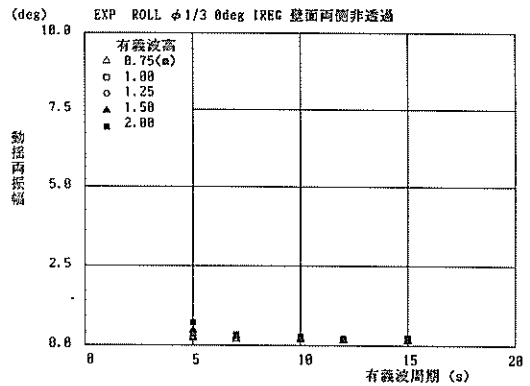


図-24-(4) 有義波周期とロールの動揺両振幅の関係  
(波向0°両側非透過)

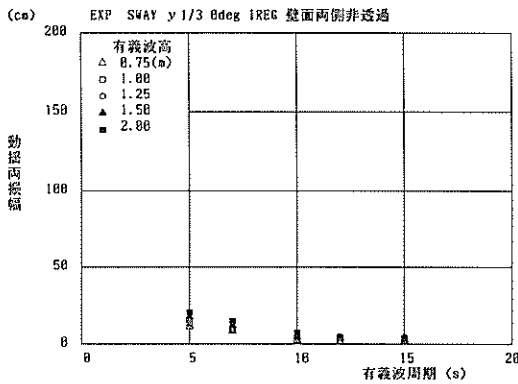


図-24-(2) 有義波周期とスウェイの動揺両振幅の関係  
(波向0°両側非透過)

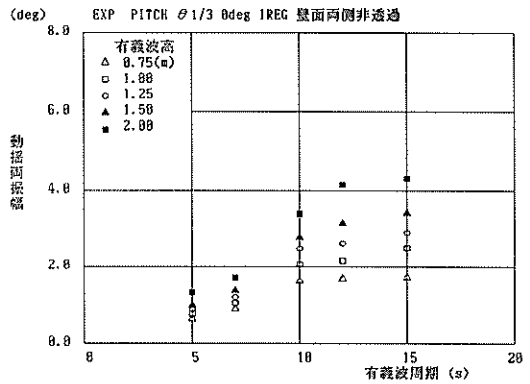


図-24-(5) 有義波周期とピッチの動揺両振幅の関係  
(波向0°両側非透過)

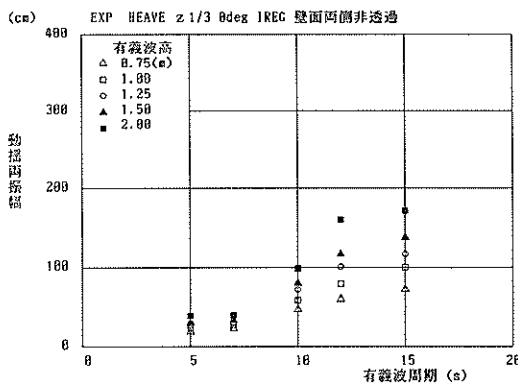


図-24-(3) 有義波周期とヒープの動揺両振幅の関係  
(波向0°両側非透過)

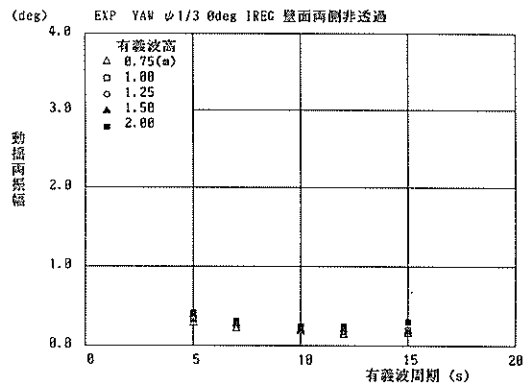


図-24-(6) 有義波周期とヨウの動揺両振幅の関係  
(波向0°両側非透過)

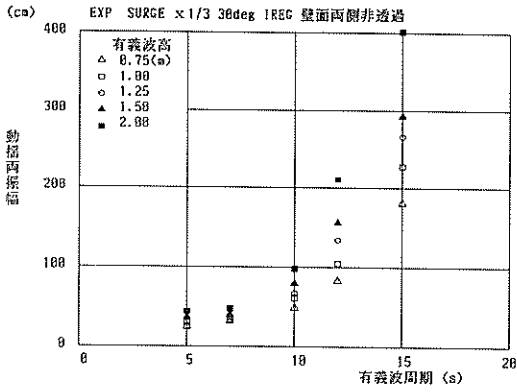


図-25-(1) 有義波周期とサージの動揺両振幅の関係 (波向 30° 両側非透過)

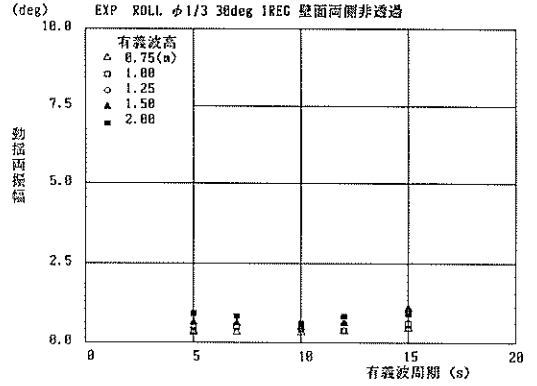


図-25-(4) 有義波周期とロールの動揺両振幅の関係 (波向 30° 両側非透過)

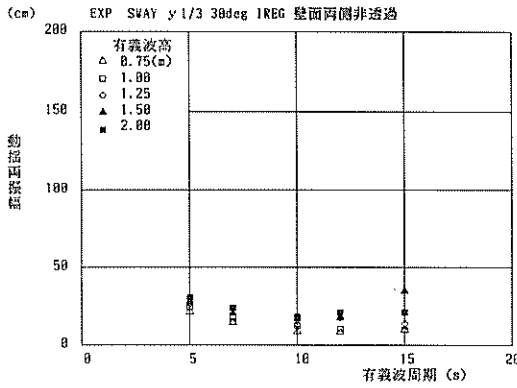


図-25-(2) 有義波周期とスウェイの動揺両振幅の関係 (波向 30° 両側非透過)

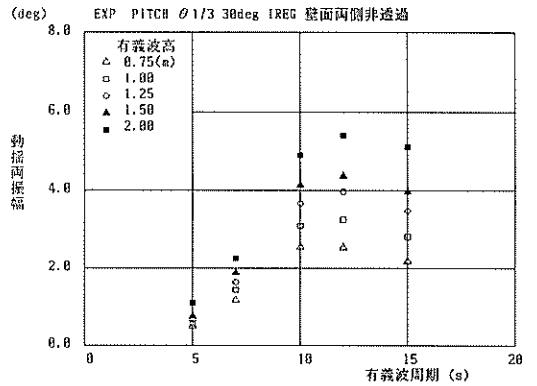


図-25-(5) 有義波周期とピッチの動揺両振幅の関係 (波向 30° 両側非透過)

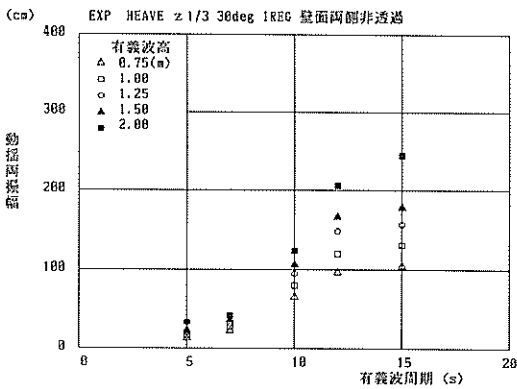


図-25-(3) 有義波周期とヒープの動揺両振幅の関係 (波向 30° 両側非透過)

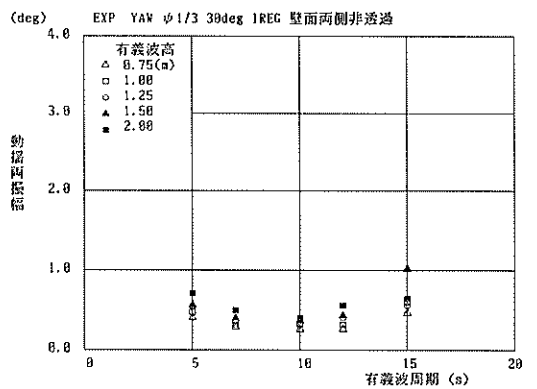


図-25-(6) 有義波周期とヨウの動揺両振幅の関係 (波向 30° 両側非透過)



た、波向 $30^\circ$ の場合には法線と波向との角度が $30^\circ$ になる。図の下側の係船岸は港口側で $30^\circ$ 角度が開いている。波向 $0^\circ$ のときは図の下側の $30^\circ$ 開いた係船岸によって波が回折して係船岸の奥へ進入してくる。また、波向 $30^\circ$ のときは図の上部の係船岸で反射した波が係船岸の奥へ進入してくる。この波の進入の程度は波向 $30^\circ$ の場合の方が波向 $0^\circ$ の場合に比べて大きい。

#### (2) サージ

図-24-(1)および図-25-(1)を比較してサージの動揺周期特性を考察する。波向 $0^\circ$ および波向 $30^\circ$ の場合とも有義波周期が長くなると動揺量が全般的にみて大きくなる傾向がある。有義波周期と動揺量の関係は線形ではなく、7sまでは有義波周期にかかわらず動揺量はほぼ同一であるが、10s以上では波周期に比例して大きくなっている。例えば、有義波高1m、波向 $0^\circ$ の条件について有義波周期別に動揺量を比較してみると、有義波周期5、7、10、12、15sのときに26cm、26cm、60cm、119cm、210cmである。

また、同図より動揺量は有義波高の増加と共に大きくなるが、明確な線形性はみられない。例えば、波向 $0^\circ$ のときに、波高1mと2mについて比較してみると、有義波周期10sでそれぞれ60cmと94cm、有義波周期12sで119cmと223cmである。

波向による動揺量の相違を $0^\circ$ および $30^\circ$ についてみると、有義波周期15sで波向 $30^\circ$ の動揺量が波向 $0^\circ$ の動揺量に比べてやや大きい、他の周期ではほぼ同じ値が得られている。波周期15sのとき波向 $30^\circ$ の動揺量の方が大きい理由は、先に示したように、係船岸で反射した波が係船岸の奥へ進入してくる程度が、波向 $30^\circ$ の場合の方が波向 $0^\circ$ の場合に比べて大きいためである。

#### (3) スウェイ

図-24-(2)および図-25-(2)を比較してスウェイの動揺周期特性を考察する。全般的に動揺量が小さく顕著な傾向は認められないものの、波周期の相違による動揺量の差異は大きくない。つぎに、動揺量は全般的にみて波向 $0^\circ$ および波向 $30^\circ$ の場合ともにおおむね波高と共に増加する。また、波向による差異を比較すると波向 $30^\circ$ のときの動揺量は波向 $0^\circ$ に比べるとやや大きい。例えば、有義波周期5sの条件について波向別に比較してみると、波向 $0^\circ$ では有義波高1mのときにスウェイは13cmであるが波向 $30^\circ$ のときには24cmである。

全般的に動揺量が小さいのは、波向が $0^\circ$ ということと、波向 $30^\circ$ であっても両側非透過であるために波は係船岸の港口部からの進入波となるので、実際には船舶に対する波の作用角度が $30^\circ$ よりも小さくなり、スウェイ

に影響の少ない波向になるためである。しかしながら、波向 $30^\circ$ のときのほうが動揺量は大きい。

#### (4) ヒープ

図-24-(3)および図-25-(3)を比較してヒープの動揺周期特性を考察する。波向 $0^\circ$ および波向 $30^\circ$ の場合とも波周期が長くなると動揺量が全般的にみて大きくなる傾向がある。有義波周期と動揺量の関係は線形ではなく、動揺量は5sおよび7sではほぼ同一であるが、10s以上では周期に比例して大きくなっている。有義波高1.25m以上のときには、12sと15sの動揺量の差異はさほど大きくない。例えば、有義波高1m、波向 $0^\circ$ の条件について有義波周期別に動揺量を比較してみると有義波周期5、7、10、12、15sのときにヒープは24cm、27cm、59cm、78cm、100cmである。

同図より動揺量と有義波高の関係には明確な線形性は見られない。例えば、波向 $0^\circ$ で有義波高1mと2mの条件について有義波周期別に動揺量を比較してみると有義波周期10sでそれぞれ59cmと99cm、有義波周期12sで78cmと160cmである。

波向による動揺量の相違を $0^\circ$ および $30^\circ$ についてみると波向 $30^\circ$ の動揺量が波向 $0^\circ$ の動揺量に比べてやや大きい。これはサージと同じ理由で、係船岸で反射した波が係船岸の奥へ進入してくる程度が、波向 $30^\circ$ の場合の方が波向 $0^\circ$ の場合に比べて大きいためである。

#### (5) ロール

図-24-(4)および図-25-(4)を比較してロールの動揺周期特性を考察する。全般的に動揺量が小さく顕著な傾向は認められないものの、波周期の相違による動揺量の差異は大きくない。全般的にみて波向 $0^\circ$ および波向 $30^\circ$ の場合ともに、動揺量と波高に明確な線形性は見られない。また、波向による差異を比較すると、波向 $30^\circ$ のときの動揺量は波向 $0^\circ$ に比べるとやや大きい。例えば、有義波周期5sの条件について波向別に動揺量を比較してみると、波向 $0^\circ$ で有義波高1mのロールの動揺量は $0.3^\circ$ であるが波向 $30^\circ$ のときは $0.4^\circ$ である。

全般的に動揺量が小さいのは、波向が $0^\circ$ ということと波向 $30^\circ$ であっても両側非透過であるために波は係船岸の港口部からの進入波となるので、実際には船舶に対する波の作用角度が $30^\circ$ よりも小さくなり、ロールに影響の少ない波向になるためである。

#### (6) ピッチ

図-24-(5)および図-25-(5)を比較してピッチの動揺周期特性を考察する。波向 $0^\circ$ および波向 $30^\circ$ の場合とも有義波周期が長くなると動揺量が全般的にみて大きくなる傾向がある。有義波周期と動揺量の関係は線形では

なく、動揺量は5sから10sまでは周期に比例して大きくなるが、10sから15sでは動揺量はほとんど増加しない。例えば、有義波高1m、波向0°の条件について有義波周期別に動揺量を比較してみると有義波周期5、7、10、12、15sに対し、0.8°、1.0°、2.1°、2.2°、2.5°である。

また、同図より動揺量と有義波高の係りに明確な線形性は認められないものの、波高が大きくなると動揺量も大きくなる。例えば、波向0°、有義波高1mと2mの動揺量について比較してみると、有義波周期10sでそれぞれ2.1°と3.4°、有義波周期12sで2.2°と4.2°である。

波向による動揺量の相違を0°および30°についてみると、波向30°の動揺量が波向0°の動揺量に比べてやや大きい。これはサージ等と同じ理由で、係船岸で反射した波が係船岸の奥へ進入してくる程度が波向30°の場合の方が波向0°の場合に比べて大きいためである。

#### (7) ヨウ

図-24-(6)および図-25-(6)を比較してヨウの動揺周期特性を考察する。全般的に動揺量が小さいために顕著な傾向は認められないものの、波周期の相違による動揺量の差異は大きくない。全般的にみて波向0°および波向30°の場合ともに動揺量と波高に明確な線形性は認められない。また、波向による差異を比較すると、波向30°のときの動揺量は波向0°に比べるとやや大きい。例えば、有義波周期5sの条件について波向別に動揺量を比較してみると、波向0°では有義波高1mのときにヨウは0.3°であるが波向30°のときには0.5°である。

全般的に動揺量が小さいのは、スウェイやロールと同じように、波向が0°ということと波向30°であっても両側非透過であるために波は係船岸の港口部からの進入波となるので、実際には船舶に対する波の作用角度が30°よりも小さくなり、ヨウに影響の少ない波向になる。

### 4.3 壁面片側透過片側非透過および壁面両側透過係船岸の場合の動揺実験結果

#### (1) 概要

図-26-(1)~(6)は片側透過で波向30°、また、図-27-(1)~(6)は両側透過で波向30°のときの実験結果の、各動揺成分の動揺両振幅の有義値と有義波周期との関係を有義波高をパラメータとして図示したものである。図は係船岸の影響による動揺量の相違を比較しやすいように各動揺成分ごとに、片側透過と両側透過の結果を並べて掲載している。ここでは先に示した図-25-(1)~(6)の両側非透過で波向30°の結果と比較しながら述べる。また、図番号の(1)~(6)はそれぞれ動揺6成分と対応している。

#### (2) サージ

図-25-(1)の両側非透過、図-26-(1)の片側透過および図-27-(1)の両側透過を比較してみると、この順に動揺量が小さくなる。例えば、有義波周期15s、有義波高1mについて動揺量を比較してみると、それぞれ227cm、198cm、92cmである。

片側透過および両側透過の場合の動揺周期特性は、先に示した両側非透過の場合の動揺周期特性とほぼ同じである。

この実験結果からは係船岸の構造を透過にすることによってサージの動揺量が小さくなると言えるが、波の入射方向も透過であるためにサージ以外の動揺成分が大きくなる可能性がある。離島等では、防波堤の片側を係船岸として利用することが多いので、一方が非透過の係船岸の状態である。したがって、両側透過という構造は現実的ではない。そこで、サージの動揺量を小さくするには、非透過性係船岸の反射波を小さくして、防波堤や係船岸に沿って入ってくる波を抑えるのがよい。

#### (3) スウェイ

図-25-(2)の両側非透過、図-26-(2)の片側透過および図-27-(2)の両側透過を比較してみると、片側透過および両側透過の場合の動揺量は両側非透過に比べて著しく大きい。例えば、有義波周期15s有義波高1mについて係船岸の透過性別に動揺量を比較してみると、両側非透過、片側透過、両側透過について、それぞれ10cm、51cm、23cmである。両側非透過の場合は波が回折して船舶に対する作用角度がほぼ0°に近いのに対して、片側透過および両側透過については30°の波が直接作用してくるので動揺量が大きくなったものである。しかも、片側非透過の場合には両側透過に比べ係船岸前面の反射波が加わるので、3形式のうちでは最も動揺量が大きい。

波高による動揺量の相違についてみると、例えば、片側透過の場合の有義波周期10s、有義波高1mおよび2mの場合の動揺量は33cm、64cmであるのに対し、有義波周期15s、有義波高1mおよび2mの動揺量は51cm、144cmであって、有義波高1mと2mでかなり相違があり、線形性がみられない。また、例えば片側透過の場合の有義波周期12s、有義波高0.75m、1m、1.25m、1.5m、2mのときの動揺量はそれぞれ28cm、39cm、67cm、77cm、125cmであり有義波高が1m以上になると動揺量が大幅に大きくなる。両側透過の場合についても波高に対する動揺量の関係は片側透過とほぼ同じと言える。

#### (4) ヒープ

図-25-(3)の両側非透過、図-26-(3)の片側透過お

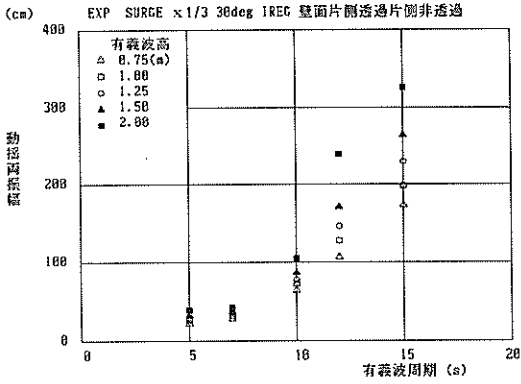


図-26-1) 有義波周期とサージの動揺両振幅の関係 (波向 30° 片側透過)

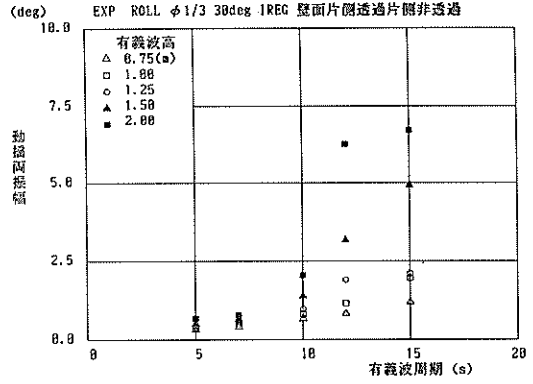


図-26-4) 有義波周期とロールの動揺両振幅の関係 (波向 30° 片側透過)

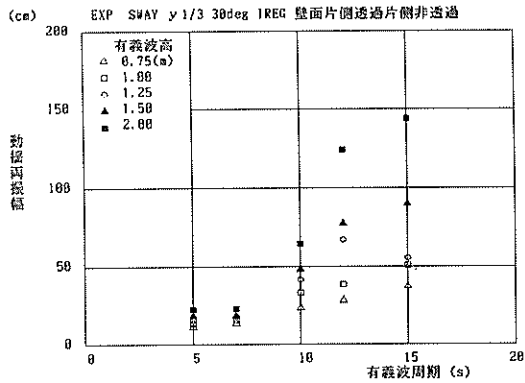


図-26-2) 有義波周期とスウェイの動揺両振幅の関係 (波向 30° 片側透過)

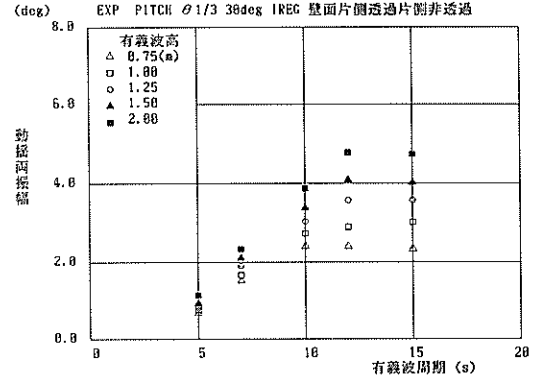


図-26-5) 有義波周期とピッチの動揺両振幅の関係 (波向 30° 片側透過)

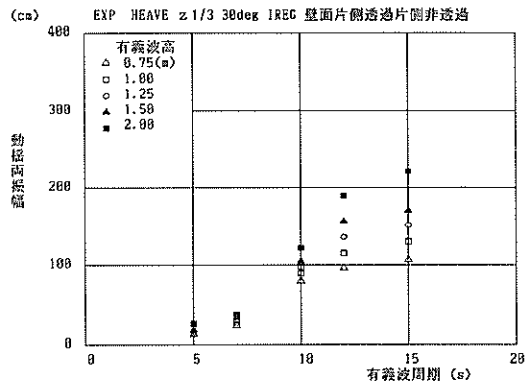


図-26-3) 有義波周期とヒープの動揺両振幅の関係 (波向 30° 片側透過)

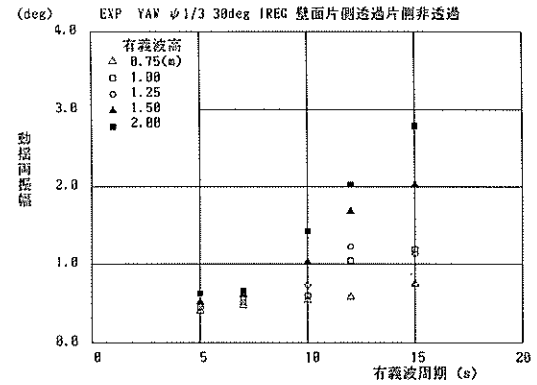


図-26-6) 有義波周期とヨウの動揺両振幅の関係 (波向 30° 片側透過)

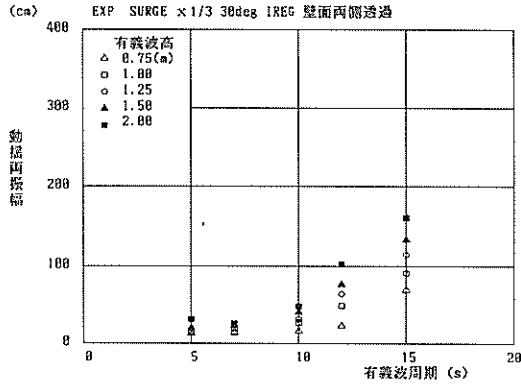


図-27-(1) 有義波周期とサージの動揺両振幅の関係 (波向 30° 両側透過)

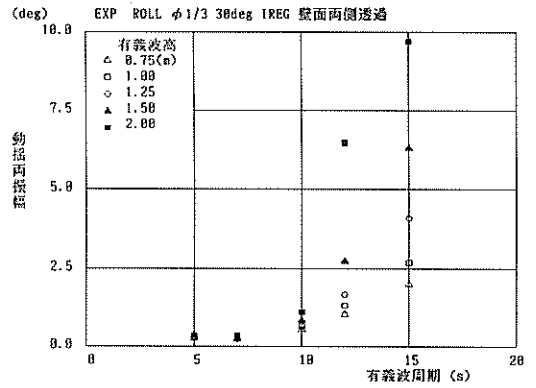


図-27-(4) 有義波周期とロールの動揺両振幅の関係 (波向 30° 両側透過)

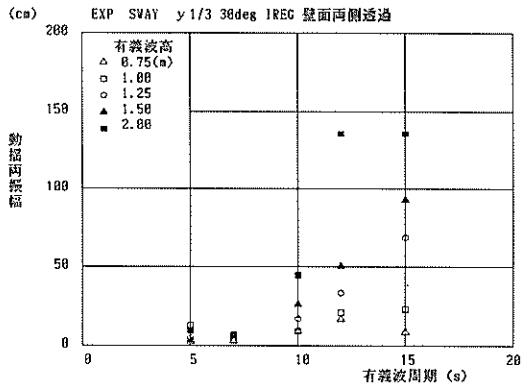


図-27-(2) 有義波周期とスウェイの動揺両振幅の関係 (波向 30° 両側透過)

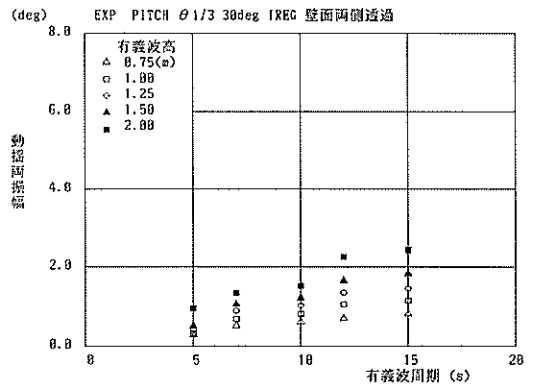


図-27-(5) 有義波周期とピッチの動揺両振幅の関係 (波向 30° 両側透過)

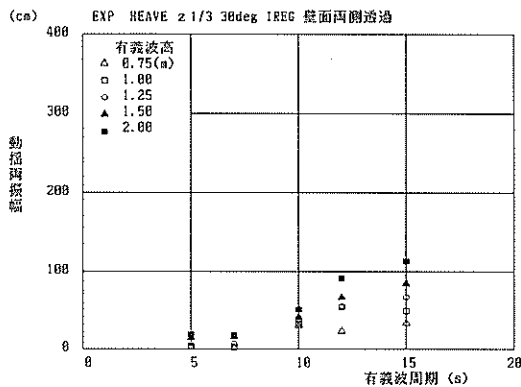


図-27-(3) 有義波周期とヒープの動揺両振幅の関係 (波向 30° 両側透過)

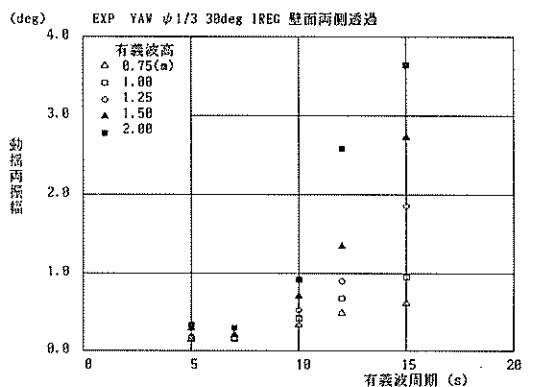


図-27-(6) 有義波周期とヨウの動揺両振幅の関係 (波向 30° 両側透過)

よび図-27-(3)の両側透過を比較してみる。両側非透過と片側透過の動揺量はほぼ同じと言えるが、それらに比べて両側透過の動揺量が小さい。例えば、有義波周期15 s 有義波高1 mの動揺量は、それぞれ131 cm, 130 cm, 50 cmである。両側非透過および片側透過では、係船岸での反射波により波高が大きくなるためである。

片側透過および両側透過の場合の動揺周期特性は、先に示した両側非透過の場合と同様である。

これらの結果から係船岸の構造を両側透過にすることによってヒープの動揺量を小さくすることができると言えるが、両側透過は現実的ではない。そこで、非透過性係船岸の反射波を小さくして、防波堤や係船岸に沿って入ってくる波を抑えるのがよい。

#### (5) ロール

図-25-(4)両側非透過、図-26-(4)の片側透過および図-27-(4)の両側透過を比較してみると、片側透過および両側透過の場合の動揺量は両側非透過に比べて著しく大きくなる。例えば、有義波周期15 s, 有義波高1 mの場合に動揺量は両側非透過、片側透過、両側透過について、それぞれ $0.6^\circ$ ,  $1.9^\circ$ ,  $2.7^\circ$ である。スウェイトと同じく両側非透過の場合は波が回折して作用角度がほぼ $0^\circ$ に近いのに対して、片側透過および両側透過については $30^\circ$ の波が直接作用してくるので動揺量が大きくなると考えられる。

波高に対しては、例えば片側透過の場合の有義波周期10 s, 有義波高1 mおよび2 mの動揺量は $0.8^\circ$ ,  $2.0^\circ$ であるのに対し、有義波周期15 s, 有義波高1 mおよび2 mの動揺量は $1.9^\circ$ ,  $6.7^\circ$ である。有義波高1 mと2 mでかなり相違があり、線形性が認められない。また、例えば片側透過の場合の有義波周期12 sの有義波高0.75 m, 1 m, 1.25 m, 1.5 m, 2 mのときの動揺量はそれぞれ $0.8^\circ$ ,  $1.1^\circ$ ,  $1.9^\circ$ ,  $3.2^\circ$ ,  $6.3^\circ$ であり、有義波周期が長く、かつ、有義波高が1 m以上になると動揺量が大幅に大きくなる。両側透過の場合についても波高に対する動揺量の関係は片側透過とほぼ同じと言える。

#### (6) ピッチ

図-25-(5)の両側非透過、図-26-(5)の片側透過および図-27-(5)の両側透過を比較してみる。両側非透過と片側透過の動揺量はほぼ同じと言えるが、それに比べて両側透過の動揺量が小さい。例えば、有義波周期15 s, 有義波高1 mの動揺量は、それぞれ $2.8^\circ$ ,  $3.0^\circ$ ,  $0.2^\circ$ である。これはヒープと同じく、両側非透過および片側透過については係船岸での反射波により波高が大きくなるためである。

片側透過および両側透過の場合の動揺周期特性は、先

に示した両側非透過の場合と同様である。

これらの結果からは係船岸の構造を両側透過にすることによってピッチの動揺量が小さくなると言えるが、両側透過は現実的ではない。そこで、非透過性係船岸の反射波を小さくして、防波堤や係船岸に沿って入ってくる波を抑えるのがよい。

#### (7) ヨウ

図-25-(6)の両側非透過、図-26-(6)の片側透過および図-27-(6)の両側透過を比較してみると、片側透過および両側透過の場合の動揺量は両側非透過に比べて著しく大きくなる。例えば、有義波周期15 s, 有義波高1 mの場合に動揺量は両側非透過、片側透過、両側透過について、それぞれ $0.6^\circ$ ,  $1.2^\circ$ ,  $1.0^\circ$ である。スウェイトと同じく両側非透過の場合は波が回折して作用角度がほぼ $0^\circ$ に近いのに対して、片側透過および両側透過については $30^\circ$ の波が直接作用してくるので動揺量が大きくなっている。

波高に対しては、例えば片側透過の場合の有義波周期10 s, 有義波高1 mおよび2 mの動揺量は $0.6^\circ$ ,  $1.4^\circ$ であるのに対し、有義波周期15 s, 有義波高1 mおよび2 mの動揺量は $1.2^\circ$ ,  $2.8^\circ$ である。また、例えば片側透過の場合の有義波周期12 s, 有義波高0.75 m, 1 m, 1.25 m, 1.5 m, 2 mのときの動揺量はそれぞれ $0.6^\circ$ ,  $1.0^\circ$ ,  $1.2^\circ$ ,  $1.7^\circ$ ,  $2.0^\circ$ であり、有義波周期が長く、かつ、波高が大きくなると動揺量が大きくなる。係船岸壁面の影響はスウェイトと同様であるが、ヨウは波高による線形性が認められる。両側透過の場合についても波高に対する動揺量の関係は片側透過とほぼ同じと言える。

## 5. 動揺シミュレーション

### 5.1 検討の手順および計算ケース

#### (1) 検討の手順

実験に使用した1/75の模型船舶の実機について港湾技術研究所で開発した係留船舶の動揺計算プログラムを用いて数値シミュレーションを行った<sup>7)</sup>。表-4は対象船舶の諸元である。計算は以下の手順で行った。

まず、船舶の船体を船首尾軸に添って21の断面に分割し、個々の断面をルイス断面に近似してストリップ法により流体力を求める。その際、有義波周期3~20 sの範囲で1 sごとに規則波に対する波力を求めておいて、後に行う動揺計算の際に不規則波の波力を合成する。なお、本計算においては波漂流力および流れによる力は微小であるとして無視する。

つぎに、防舷材および係留索の変位復元力特性をモデル化し、動揺シミュレーションに入力した。

表-4 対象船舶の諸元

計算船舶	単位		
全長	(m)	102.6	
垂線間長	(m)	101.3	
型深さ	(m)	10.5	
喫水	(m)	15.2	
船首から重心までの水平距離	(m)	52.5	
キールから重心までの高さ	(m)	5.88	
キールから浮心までの高さ	(m)	4.86	
浮心からメタセンターまでの高さ	(m)	1.44	
ロールの固有周期	(s)	18.9	
排水量	(t)	11000	
水深	(m)	22.5	
環動半径	ロール	(m)	5.624
	ピッチ	(m)	25.3
	ヨウ	(m)	25.3
船長方向付加質量係数			0.085
横揺無次元減衰係数			0.28
	減衰定数		0.14
	対数減衰率		0.904
方形係数			0.777
水線面積係数			0.869

(2) 計算ケース

表-5は動揺シミュレーションケースを示したものである。

まず、波向0°および波向30°の両側透過と波向30°で反射波を考慮した片側透過の条件において、それぞれ有義波周期5~15sの5種類、有義波高1mについて数値シミュレーションを行い、その結果と実験結果とを比較した。表中のHARD FENDERは実験に用いた模型防舷材のばね定数を用いた計算ケースであり、SOFT FENDERはそれよりも軟らかい240tf/mのばね定数の防舷材を使用したケースである。ただし、波向0°についての実験は、両側非透過の条件で行っているのに対して、計算では透過の条件で行っている。これは、波向が0°であるので、実験においても波は通り抜けて船舶の両側に配置されている壁面の影響は少ないと考えられ

るからである。しかし、実験においては港口部に図-5に示したユニット9が設置されていて、これが30°開いているのでこれに沿って波が係船岸の奥へ進入してくる。そこで、波向0°の場合の実験と計算の結果を比較するときには、実験における波高が計算における波高より多少大きくなっていることを考慮するものとする。また、波向30°の両側透過では模型係留施設の脚の部分によって波が干渉され多少波高が減少するようである。波向30°で両側非透過については、現有の動揺シミュレーションプログラムでは計算が困難であるので実施しなかった。つぎに、対称係留系と非対称係留系の動揺特性を比較するためにそれぞれについて波向0~90°の4種類、有義波周期5~15sまでの5種類、有義波高1mの計算を行った。

最後に、防舷材の個数を変化させて、その影響をみる

表-5 動揺シミュレーションケース

対称係留					非対称係留						
HARD FENDER											
No.	係留配置図	防舷材 係留索 数	波浪条件 波向 (deg)	周期 (s)	波高 (m)						
HD01		4 4	IREG 0, 30	5~15	1.0						
			透過								
HD02		4 4	IREG 30	5~15	1.0						
			反射波考慮								
SOFT FENDER											
No.	係留配置図	防舷材 係留索 数	波浪条件 波向 (deg)	周期 (s)	波高 (m)	No.	係留配置図	防舷材 係留索 数	波浪条件 波向 (deg)	周期 (s)	波高 (m)
SD02		30 4	IREG 0, 30	5~15	1.0	SS02		15 2	IREG 0, 30	5~15	1.0
			60, 90						60, 90		
			透過						透過		
SD04		8 4	IREG 30, 60	12	1.0						
			防舷材の数を変化								
			透過								

ために波向30°および60°，有義波周期12 s，有義波高1 mで計算を行った。

## 5.2 計算値と実験値との比較

### (1) 概要

図-28-(1)~(6)は波向0°で両側非透過のとき，また図-29-(1)~(6)は波向30°で片側透過のとき，また図-30-(1)~(6)は波向30°で両側透過のときの計算値と実験値とを比較して図示したものである。これらは，各動揺成分の動揺両振幅の有義値と有義波高との関係を示している。図番号の(1)~(6)は図-24~図-27と同じようにそれぞれ動揺6成分と対応している。また，比較する波浪条件は有義波周期12 s，有義波高1 mである。

### (2) サージ

図-28-(1)の波向0°で両側非透過の実験値と計算値とを比較すると，波周期が長くなるに従って実験値に比べて計算値が小さくなっている。これは，先に述べたように，実験においては港口部に30°角度が開いて係船岸があり，これに沿って係船岸の奥へ進入してくる波による波高の増大があり，波周期の長いときほどその影響が大きいためであると考えられる。

図-29-(1)の波向30°で片側透過の実験値と計算値とを比較すると実験値と計算値とがよく一致している。片側透過においては，非透過性係船岸による反射波と透過係船岸の脚による波の干渉が係留船舶の動揺に影響を及ぼすが前者の影響の方が大きい。したがって，計算では透過性係船岸の脚による波の干渉は考慮していないもの

の，実験値と計算値とがよく一致している。

図-30-(1)の波向30°で両側透過の実験値と計算値とを比較すると波周期が長いところで実験値に比べて計算値が大きくなる。これは先に述べたように，実験では両側の壁面が完全に透過ではなく，模型係留施設の脚の部分の消波効果による波高の減少があるためであると考えられる。

### (3) スウェイ

図-28-(2)の波向0°の実験値と計算値とを比較すると，実験値では10 cm程度の動揺をしているのに対して，波向が0°であるので計算ではスウェイ方向の波力がほぼ零になって，係留船舶はほとんど動揺しない結果になっている。ただし，実験においても極めて小さい動揺量であるから，実験値と計算値はほぼ一致しているものと言える。

図-29-(2)の波向30°で片側透過の実験値と計算値とを比較すると，実験値では波周期が長くなるにつれて動揺量が大きくなるのに対して計算値では波周期にかかわらずほぼ一定の動揺量である。計算においても係船岸による反射波を考慮してはいるものの，実験における状況とはやや異なっていて，計算においては反射波の影響は実験におけるものより小さかったものと考えられる。

図-30-(2)の波向30°で両側透過の実験値と計算値とを比較すると波周期が長いときには実験値に比べて計算値が大きくなる。これは先に述べたように，実験で両側の壁面が完全に透過ではなく，模型係留施設の脚の部分

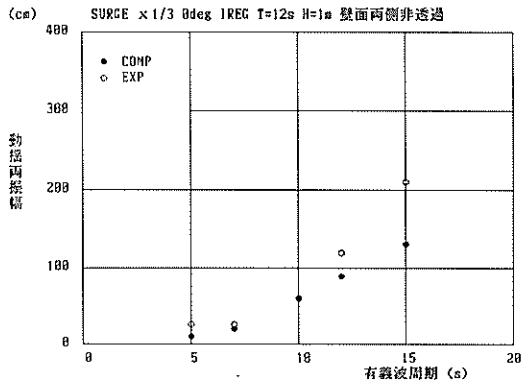


図-28-(1) 有義波周期とサージの動揺両振幅の関係  
(波向 $0^\circ$ , 両側非透過の実験値と計算値との比較)

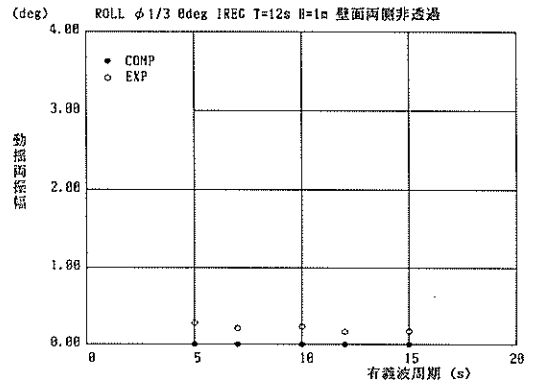


図-28-(4) 有義波周期とロールの動揺両振幅の関係  
(波向 $0^\circ$ , 両側非透過の実験値と計算値との比較)

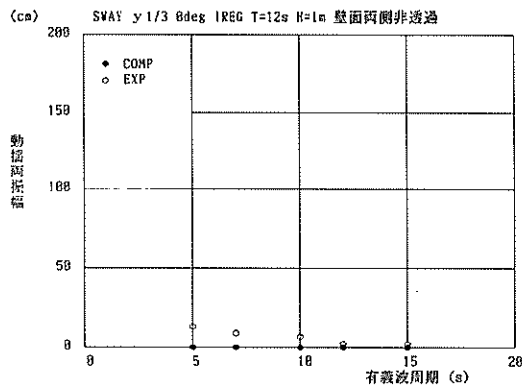


図-28-(2) 有義波周期とスウェイの動揺両振幅の関係  
(波向 $0^\circ$ , 両側非透過の実験値と計算値との比較)

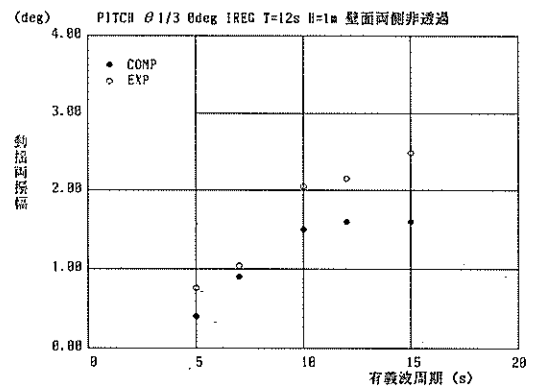


図-28-(5) 有義波周期とピッチの動揺両振幅の関係  
(波向 $0^\circ$ , 両側非透過の実験値と計算値との比較)

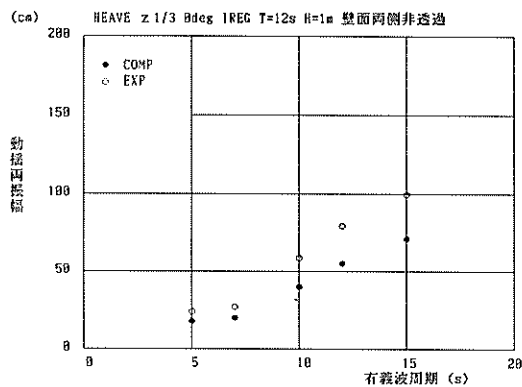


図-28-(3) 有義波周期とヒープの動揺両振幅の関係  
(波向 $0^\circ$ , 両側非透過の実験値と計算値との比較)

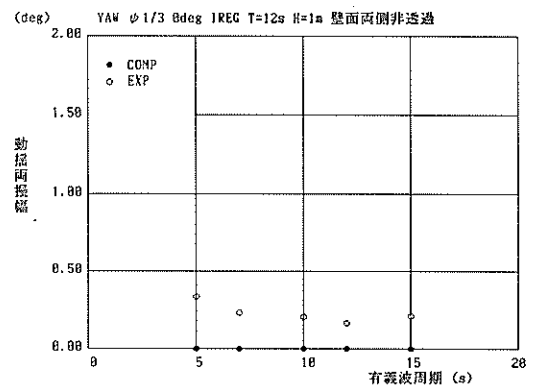


図-28-(6) 有義波周期とヨウの動揺両振幅の関係  
(波向 $0^\circ$ , 両側非透過の実験値と計算値との比較)



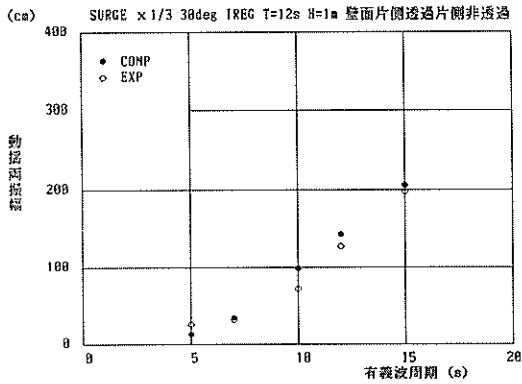


図-29-1) 有義波周期とサージの動揺両振幅の関係 (波向 30°, 片側透過の実験値と計算値との比較)

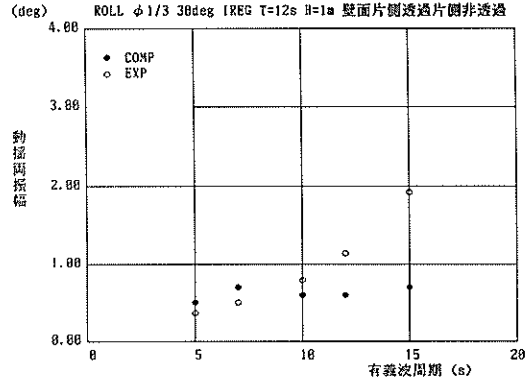


図-29-4) 有義波周期とロールの動揺両振幅の関係 (波向 30°, 片側透過の実験値と計算値との比較)

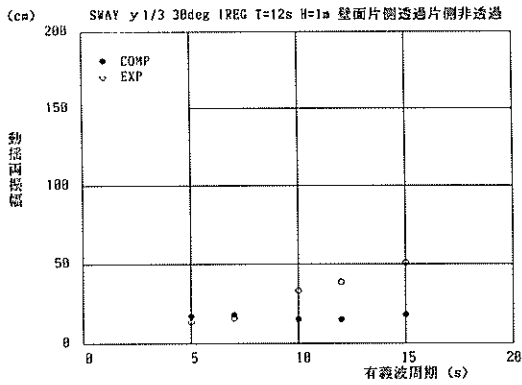


図-29-2) 有義波周期とスウェイの動揺両振幅の関係 (波向 30°, 片側透過の実験値と計算値との比較)

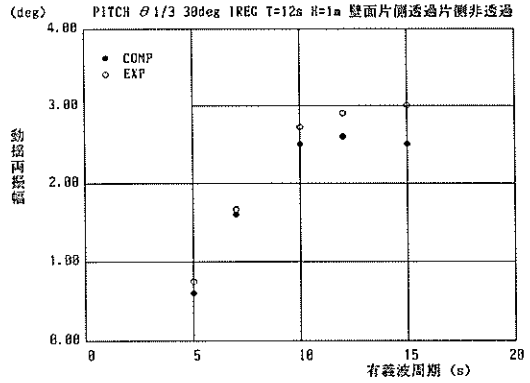


図-29-5) 有義波周期とピッチの動揺両振幅の関係 (波向 30°, 片側透過の実験値と計算値との比較)

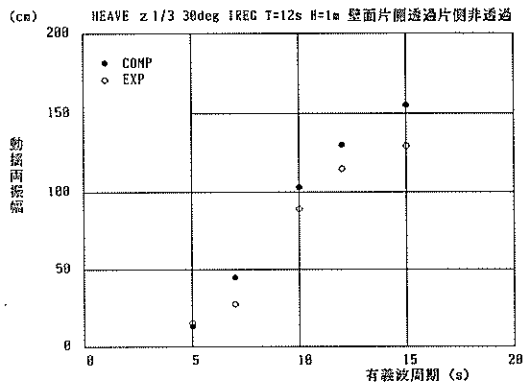


図-29-3) 有義波周期とヒープの動揺両振幅の関係 (波向 30°, 片側透過の実験値と計算値との比較)

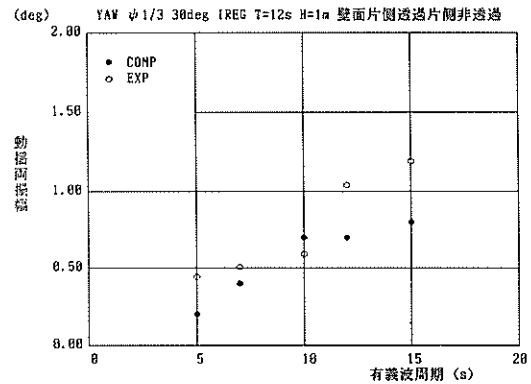


図-29-6) 有義波周期とヨウの動揺両振幅の関係 (波向 30°, 片側透過の実験値と計算値との比較)

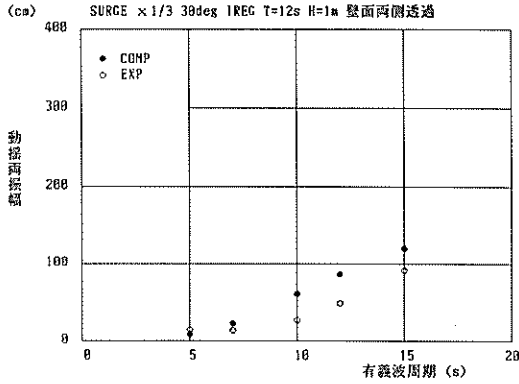


図-30-(1) 有義波周期とサージの動揺両振幅の関係 (波向 30°, 両側透過の実験値と計算値との比較)

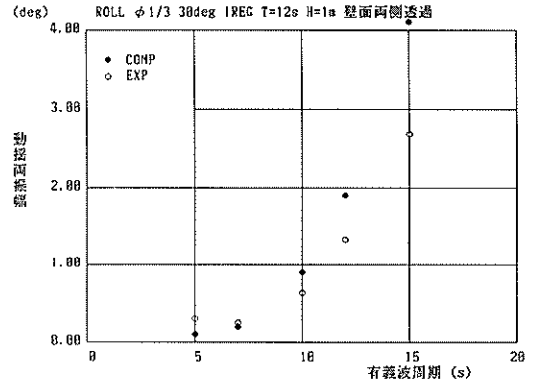


図-30-(4) 有義波周期とロールの動揺両振幅の関係 (波向 30°, 両側透過の実験値と計算値との比較)

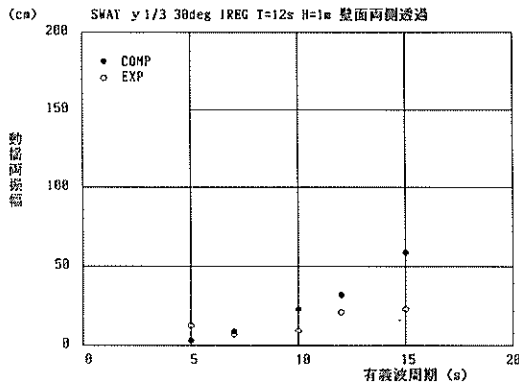


図-30-(2) 有義波周期とスウェイの動揺両振幅の関係 (波向 30°, 両側透過の実験値と計算値との比較)

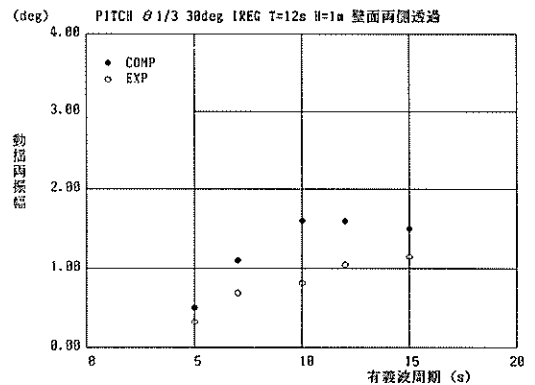


図-30-(5) 有義波周期とピッチの動揺両振幅の関係 (波向 30°, 両側透過の実験値と計算値との比較)

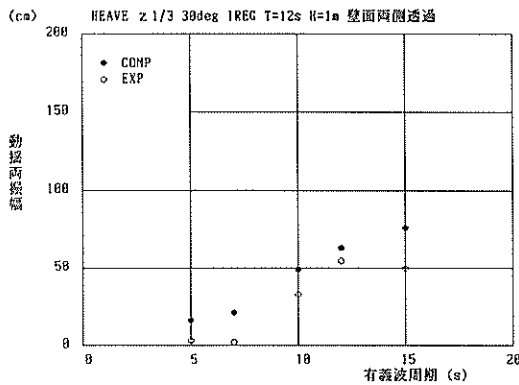


図-30-(3) 有義波周期とヒープの動揺両振幅の関係 (波向 30°, 両側透過の実験値と計算値との比較)

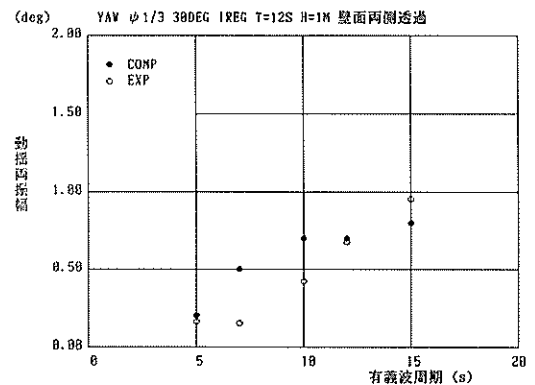


図-30-(6) 有義波周期とヨウの動揺両振幅の関係 (波向 30°, 両側透過の実験値と計算値との比較)

の消波効果による波高の減少があるためであると考えられる。

#### (4) ヒープ

図-28-(3)の波向 $0^\circ$ の実験値と計算値とを比較すると波周期が長くなるに従って実験値に比べて計算値が小さくなっている。これは、先に述べたように、実験においては港口部に $30^\circ$ 角度が開いた係船岸があり、これに沿って係船岸の奥へ進入してくる波による波高の増大があり、波周期の長いときほどその影響が大きいためであると考えられる。

図-29-(3)の波向 $30^\circ$ で片側透過の実験値と計算値とを比較すると実験値と計算値とがおおむね一致している。

図-30-(3)の波向 $30^\circ$ で両側透過の実験値と計算値とを比較すると全体的に実験値に比べて計算値が大きくなる。これは先に述べたように、実験では両側の壁面が完全に透過ではなく、模型係留施設の脚の部分の消波効果による波高の減少があるためであると考えられる。

#### (5) ロール

図-28-(4)の波向 $0^\circ$ の実験値と計算値とを比較すると、実験値では $0.2^\circ$ 程度の動揺をしているのに対して、計算値では波向が $0^\circ$ のためにロール方向の波力が計算されないためにほとんど動揺をしない結果となっている。ただし、実験においても極めて小さい動揺量であり、実験値と計算値とがほぼ一致しているものと言える。

図-29-(4)の波向 $30^\circ$ で片側透過の実験値と計算値とを比較すると、実験値では波周期が長くなるにつれて動揺量が大きくなるのに対して計算値では波周期にかかわらずほぼ一定の動揺量である。計算においても係船岸による反射波を考慮してはいるものの、実験における状況とはやや異なっていて、計算においては反射波の影響は実験におけるものより小さかったものと考えられる。

図-30-(4)の波向 $30^\circ$ で両側透過の実験値と計算値とを比較すると波周期が長いときには実験値に比べて計算値が大きくなる。これは先に述べたように、実験で両側の壁面が完全に透過ではなく、模型係留施設の脚の部分の消波効果による波高の減少があるためであると考えられる。

#### (6) ピッチ

図-28-(5)の波向 $0^\circ$ の実験値と計算値とを比較すると全体的に実験値に比べて計算値が小さくなっている。これは、先に述べたように、実験においては港口部に $30^\circ$ 度の開いた係船岸あり、これに沿って係船岸の奥へ入射してくる波による波高の増大があり、波周期の長いときほどその影響が大きいためであると考えられる。

図-29-(5)の波向 $30^\circ$ で片側透過の実験値と計算値とを比較すると実験値と計算値とがよく一致している。

図-30-(5)の波向 $30^\circ$ で両側透過の実験値と計算値とを比較すると全体的に実験値に比べて計算値が大きくなる。これは先に述べたように、実験では両側の壁面が完全に透過ではなく、模型係留施設の脚の部分の消波効果による波高の減少があるためであると考えられる。

#### (7) ヨウ

図-28-(6)の波向 $0^\circ$ の実験値と計算値とを比較すると、実験値では $0.2^\circ$ 程度の動揺をしているのに対して、計算値では波向が $0^\circ$ のためにロール方向の波力がほぼ零になって、係留船舶はほとんど動揺しない結果になっている。ただし、実験においても極めて小さい動揺量であり、実験値と計算値とが一致しているものと言える。

図-29-(6)の波向 $30^\circ$ で片側透過の実験値と計算値とを比較すると、実験値および計算値は共に波周期が長くなるにつれて動揺量が大きくなるが、有義波周期 $12\sim 15$ sでは計算値と実験値との差異がやや大きい。しかし、いずれにしても動揺量は $1^\circ$ 以下であって大きくない。

図-30-(6)の波向 $30^\circ$ で両側透過の実験値と計算値とを比較すると、有義波周期 $7$ sおよび $10$ sのときには実験値に比べて計算値が大きい。しかし、全般的にみて動揺量が小さいので波周期に対する動揺量の傾向は似ていると言える。

### 5.3 対称係留系と非対称係留系との比較

#### (1) 概要

図-31-(1)~(6)は対称係留系で波向 $0\sim 90^\circ$ 、また図-32-(1)~(6)は非対称係留系で波向 $0\sim 90^\circ$ のときの計算結果について、各動揺成分の動揺両振幅の有義値と有義波周期との関係を、波向をパラメータとして図示したものである。図は係留系の相違による動揺量を比較しやすいように各動揺成分ごとに、対称係留と非対称係留の結果を並べて掲載している。また、図番号の(1)~(6)はそれぞれ動揺6成分に対応している。

対称係留系の計算においてはV型1000L(長さ1000mm)またはCELL型630H(高さ630mm)程度の防舷材が片側に15個づつ合計30個付いているものとし、 $\phi 50$ mm長さ40mのナイロンロープ程度の係留索を片舷に2本づつ、両舷で計4本取るものとする。また、非対称係留系の計算においては対称係留系と同一の防舷材と係留索が片側のみに付いているものとする。

#### (2) サージ

図-31-(1)および図-32-(1)を比較しサージの動揺周期特性を考察する。対称係留系および非対称係留系のいずれについても、動揺量は波周期に比例して大きくな

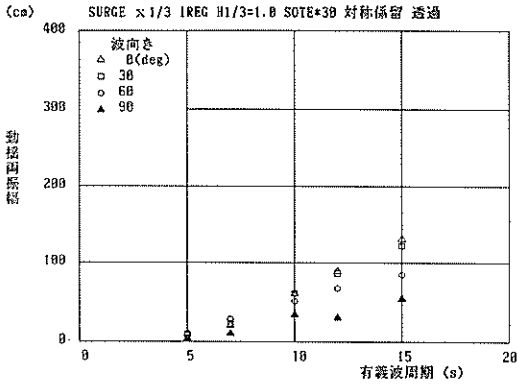


図-31-(1) 有義波周期とサージの動揺両振幅の関係 (対称係留系)

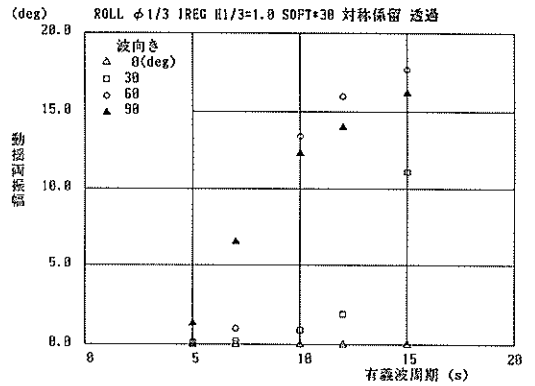


図-31-(4) 有義波周期とロールの動揺両振幅の関係 (対称係留系)

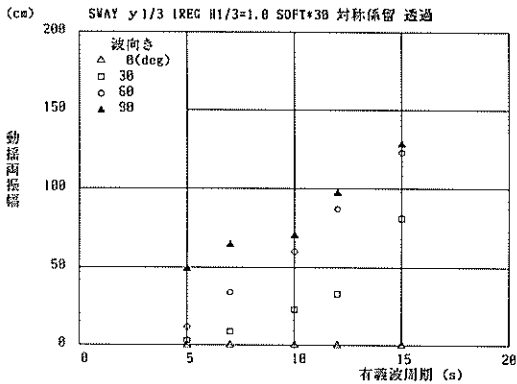


図-31-(2) 有義波周期とスウェイの動揺両振幅の関係 (対称係留系)

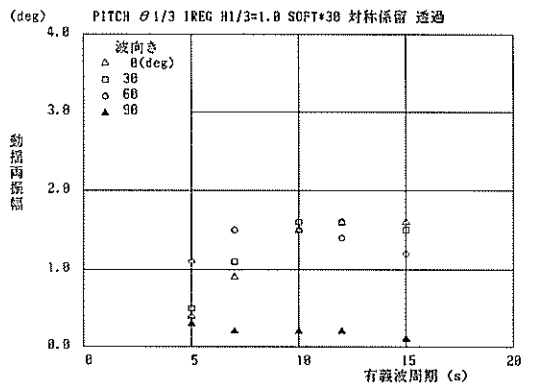


図-31-(5) 有義波周期とピッチの動揺両振幅の関係 (対称係留系)

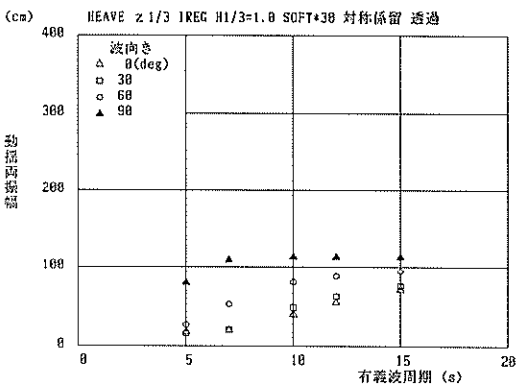


図-31-(3) 有義波周期とヒープの動揺両振幅の関係 (対称係留系)

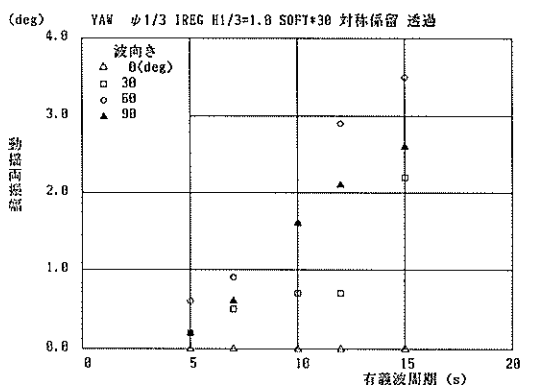


図-31-(6) 有義波周期とヨウの動揺両振幅の関係 (対称係留系)

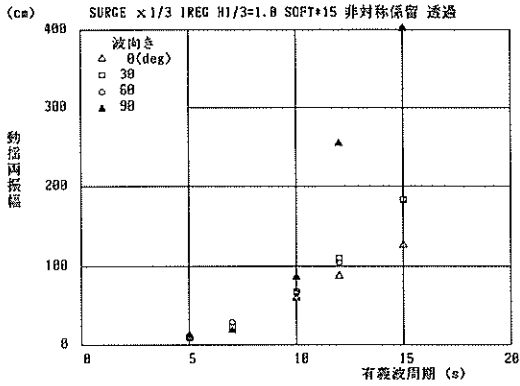


図-32-(1) 有義波周期とサージの動揺両振幅の関係 (非対称係留系)

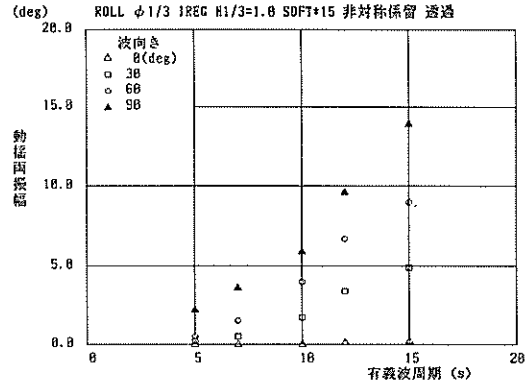


図-32-(4) 有義波周期とロールの動揺両振幅の関係 (非対称係留系)

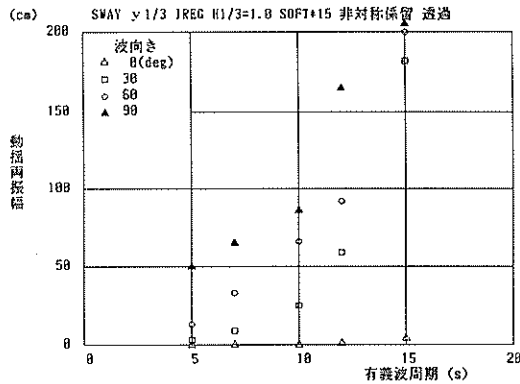


図-32-(2) 有義波周期とスウェイの動揺両振幅の関係 (非対称係留系)

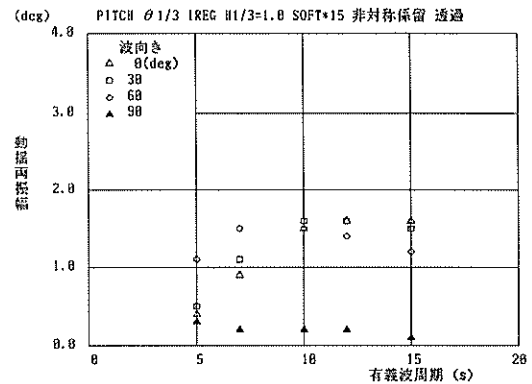


図-32-(5) 有義波周期とピッチの動揺両振幅の関係 (非対称係留系)

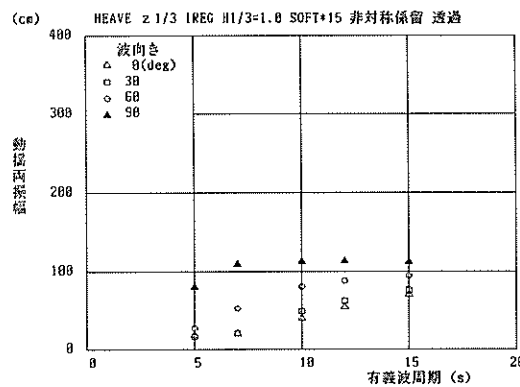


図-32-(3) 有義波周期とヒープの動揺両振幅の関係 (非対称係留系)

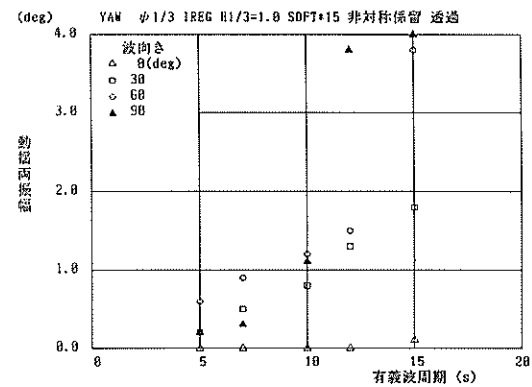


図-32-(6) 有義波周期とヨウの動揺両振幅の関係 (非対称係留系)

る傾向にある。ただし、非対称係留系の波向 $60^\circ$ で有義波周期 $15\text{ s}$ および波向 $90^\circ$ で有義波周期 $10\sim 15\text{ s}$ のときに、図では欄外に示しているように、特に大きな動揺量を示す。例えば、非対称係留系において波向 $30^\circ$ で有義波周期 $5\sim 15\text{ s}$ のときのサージの動揺量はそれぞれ $9\text{ cm}$ ,  $23\text{ cm}$ ,  $68\text{ cm}$ ,  $111\text{ cm}$ ,  $184\text{ cm}$ であり、また波向 $60^\circ$ で有義波周期 $5\sim 15\text{ s}$ のときのサージの動揺量はそれぞれ $12\text{ cm}$ ,  $29\text{ cm}$ ,  $66\text{ cm}$ ,  $105\text{ cm}$ ,  $400\text{ cm}$ である。

つぎに、波向がサージの動揺に及ぼす影響を対称係留系と非対称係留系において比較してみる。対称係留系および非対称係留系の両者とも $7\text{ s}$ までの動揺量は小さく、波向による差異がない。また波向 $0^\circ$ で有義波周期 $7\text{ s}$ 以下のときには、船舶が防舷材にほとんど当たらないので、対称係留系および非対称係留系のいずれの場合も動揺量はほぼ同一である。有義波周期が $10\text{ s}$ 以上のときには、動揺量は非対称係留系では $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ の順に動揺量が大い。これは、対称係留系の場合と全く逆の傾向である。対称係留系では、波向が $0^\circ$ に近いほどサージに対する波力が大きくなりサージが大きくなっている。ここで、図-32-(2)の、非対称係留系で長周期波に対するスウェイの計算結果をみると、波向 $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ の順の場合によっては $2\text{ m}$ を超えるほどスウェイが大きくなる。この結果、係留索張力が大きくなって、サージ方向の係留索張力成分によって係留船舶のサージが生じるものと考えられる。このように波周期が長いときにスウェイの動揺量が大きくなるのは、係留系の変位復元力特性の非対称性に起因するサブハーモニックモーションが生じる<sup>9)</sup>ためであり、スウェイの動揺が増幅し係留索に張力がかかり、これがサージ方向の動揺をも大きくしている原因と考えられる。

### (3) スウェイ

図-31-(2)および図-32-(2)を比較してスウェイの動揺周期特性を考察する。対称係留系および非対称係留系のいずれについても波周期が長くなると動揺量が大きくなる傾向にあるが、有義波周期 $10\text{ s}$ を超えると対称係留系に比べ非対称係留系の方が波周期の影響が大きくなり動揺量が増大する。例えば、対称係留系において波向 $30^\circ$ で有義波周期 $5\sim 15\text{ s}$ のときのスウェイの動揺量はそれぞれ $3\text{ cm}$ ,  $9\text{ cm}$ ,  $23\text{ cm}$ ,  $33\text{ cm}$ ,  $81\text{ cm}$ であり、また非対称係留系において波向 $30^\circ$ で有義波周期 $5\sim 15\text{ s}$ のときのスウェイの動揺量はそれぞれ $3\text{ cm}$ ,  $9\text{ cm}$ ,  $25\text{ cm}$ ,  $59\text{ cm}$ ,  $182\text{ cm}$ である。

つぎに、波向がスウェイに及ぼす影響を対称係留系と非対称係留系において比較してみる。対称係留系および非対称係留系のいずれについても動揺量が波向 $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,

$60^\circ$ ,  $90^\circ$ の順で大きくなる。例えば、対称係留系で有義波周期 $12\text{ s}$ の条件について波向 $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ でスウェイの動揺量はそれぞれ $0\text{ cm}$ ,  $33\text{ cm}$ ,  $87\text{ cm}$ ,  $97\text{ cm}$ である。これは波向が $90^\circ$ に近いほどスウェイ方向の波力が大きくなるためである。ただし、波向 $0^\circ$ の場合はスウェイ方向の波力が計算されないために動揺しない。

### (4) ヒープ

図-31-(3)および図-32-(3)を比較してヒープの動揺周期特性を考察する。図からもわかるようにヒープについては対称係留系と非対称係留系の差異はない。対称係留系および非対称係留系のいずれについても波周期が長くなると動揺量が大きくなる傾向にあるが、波向 $90^\circ$ の条件について有義波周期 $7\text{ s}\sim 15\text{ s}$ までヒープの動揺量は波周期が変わっても動揺量は一定である。例えば、対称係留系の有義波高 $1\text{ m}$ の条件について波向別に動揺量を比較すると波向 $30^\circ$ の有義波周期 $5\sim 15\text{ s}$ の動揺量はそれぞれ $16\text{ cm}$ ,  $21\text{ cm}$ ,  $49\text{ cm}$ ,  $63\text{ cm}$ ,  $76\text{ cm}$ であり、波向 $90^\circ$ の有義波周期 $5\sim 15\text{ s}$ の動揺量はそれぞれ $80\text{ cm}$ ,  $109\text{ cm}$ ,  $113\text{ cm}$ ,  $113\text{ cm}$ ,  $112\text{ cm}$ である。

つぎに、波向がヒープに及ぼす影響を比較してみる。対称係留系および非対称係留系のいずれも動揺量が波向 $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ の順で大きくなる。例えば、対称係留系で有義波周期 $12\text{ s}$ の条件について波向 $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ の場合のヒープの動揺量はそれぞれ $55\text{ cm}$ ,  $63\text{ cm}$ ,  $88\text{ cm}$ ,  $113\text{ cm}$ である。

### (5) ロール

図-31-(4)および図-32-(4)を比較してロールの動揺周期特性および波向による影響を考察する。対称係留系および非対称係留系のいずれについても波周期が長くなると動揺量が大きくなる傾向にある。しかし、波向によって対称係留系と非対称係留系との動揺周期特性が異なっている。波向 $0^\circ$ の場合は、対称係留系および非対称係留系のいずれもロールの動揺量が極めて小さくほぼ一致している。しかし、非対称係留系では波向 $30^\circ\sim 90^\circ$ のロールの動揺量は波周期に比例して大きくなる傾向にあるが、対称係留系では波向 $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ のロールの動揺量はそれぞれ有義波周期 $15\text{ s}$ ,  $10\text{ s}$ ,  $7\text{ s}$ で急激に増加する。

波向が $60^\circ$ 以上の場合については、ロールの動揺を抑制する点からは非対称係留系の方が有効的であると考えられる。しかしながら、実際に係留施設を設計する場合に波向が $0^\circ\sim 30^\circ$ になるように配置するのがスウェイ、ロール、ヨウなどの動揺量を抑制する上で効果的である。そこで同図より波向 $0^\circ$ および $30^\circ$ における対称係留系と非対称係留系とのロールの動揺量を比較してみる。波向

0°においては先に述べたように対称係留系と非対称係留系の動揺量は一致している。つぎに、波向30°においては対称係留系では有義波周期5～15sの動揺量はそれぞれ0.1°, 0.2°, 0.9°, 1.9°, 11.1°, また、非対称係留系では有義波周期5～15sの動揺量はそれぞれ0.2°, 0.5°, 1.7°, 3.4°, 4.9°であって、有義波周期12sまでは対称係留系でのロールの動揺量は非対称係留系でのロールの動揺量より小さくなる。したがって、波向30°以下で有義波周期12s以下の場合にはロールの動揺量を抑制する対策として対称係留系は有効である。

#### (6) ピッチ

図-31-(5)および図-32-(5)を比較してピッチの動揺周期特性を考察する。図からもわかるようにピッチについてはヒープと同様に対称係留系と非対称係留系の差異はない。対称係留系および非対称係留系のいずれについても、長周期波中において動揺量が大きくなる傾向があるが、いずれの波向についても有義波周期10s～15sではピッチの動揺量はほぼ一定である。例えば、対称係留系の有義波高1mの条件について波向別に動揺量を比較すると波向30°の有義波周期5～15sの動揺量はそれぞれ0.5°, 1.1°, 1.6°, 1.6°, 1.5°であり、波向90°の有義波周期5～15sの動揺量はそれぞれ1.1°, 1.5°, 1.5°, 1.4°, 1.2°である。

#### (7) ヨウ

図-31-(6)および図-32-(6)を比較してヨウの動揺周期特性および波向による影響を考察する。対称係留系および非対称係留系のいずれについても、長周期波中において動揺量が大きくなる傾向がある。例えば、対称係留系において波向30°で有義波周期5～15sのときのヨウの動揺量はそれぞれ0.2°, 0.5°, 0.7°, 0.7°, 2.2°であり、また非対称係留系の波向30°で有義波周期5～15sのときのヨウの動揺量はそれぞれ0.2°, 0.5°, 0.8°, 1.3°, 1.8°である。有義波周期12s以下では対称係留系と非対称係留系において、ヨウの動揺量の差異は小さい。また、波向0°の場合は、対称係留系と非対称係留系といずれもヨウの動揺量が極めて小さく、対称係留系および非対称係留系の差異はみられない。

### 5.4 防衝工の個数が動揺量に及ぼす影響

#### (1) 概要

対称係留系について、最適防舷材配置を調べるために防舷材の個数等を変えて数値シミュレーションを行った。

図-33-(1)～(6)は対称係留で有義波高1m、有義波周期12sの条件について波向30°および60°のときの計算結果の各動揺成分の動揺両振幅の有義値と防舷材の個数(スウェイ方向のばね定数)との関係を波向をパラメー

タとして図示したものである。この場合、防舷材1個のばね定数は240tf/mとして、図-34に示すように配置した。図-33-(1)～(6)には波向30°の条件の動揺シミュレーション結果を△で示し、波向60°の条件の動揺シミュレーション結果を□で示している。さらに、防舷材個数30に相当するばね定数を持つ係留系を防舷材4個で代用した係留系のシミュレーション結果を「HARD」として○で、また、対称係留系における波向30°の実験結果を「EXP」として●で示した。これらの点は図の横軸が30以上のところにプロットされているが、防舷材は4個である。

#### (2) サージ

図-33-(1)はサージの動揺量と防舷材の個数との関係を図示したものである。対称係留系の計算においては波向30°および波向60°のいずれも防舷材の個数がサージの動揺量に及ぼす影響は小さい。また、計算結果は実験結果に比べて小さい。これは先に述べたように実験で両側の壁面が完全に透過ではなく模型係留施設の脚の部分の消波効果により波高が減少するためであると考えられる。

#### (3) スウェイ

図-33-(2)はスウェイの動揺量と防舷材の個数との関係を図示したものである。対称係留系の計算においては防舷材の個数がスウェイの動揺量に及ぼす影響は小さい。また、計算結果と実験結果とはよく一致している。

#### (4) ヒープ

図-33-(3)はヒープの動揺量と防舷材の個数との関係を図示したものである。対称係留系の計算においては防舷材の個数がヒープの動揺量に及ぼす影響は小さい。また、計算結果と実験結果とはよく一致している。

#### (5) ロール

図-33-(4)はロールの動揺量と防舷材の個数との関係を図示したものである。対称係留系の計算においては防舷材の個数がロールの動揺量に及ぼす影響は小さい。また、計算結果と実験結果とはよく一致している。

#### (6) ピッチ

図-33-(5)はピッチの動揺量と防舷材の個数との関係を図示したものである。対称係留系の計算においては防舷材の個数がピッチの動揺量に及ぼす影響は小さい。また、計算結果は実験結果に比べてやや小さい。これは先に述べたように実験で両側の壁面が完全に透過ではなく模型係留施設の脚の部分の消波効果による波高の減少があるためであると考えられる。

#### (7) ヨウ

図-33-(6)はヨウの動揺量と防舷材の個数との関係

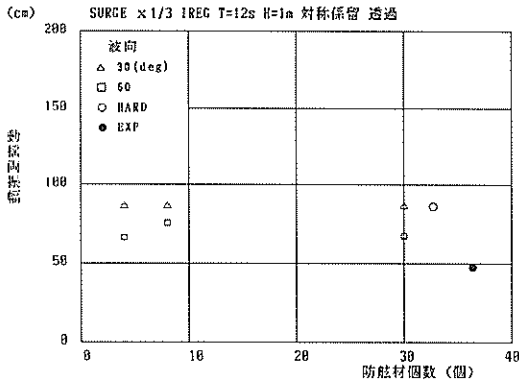


図-33-(1) 防舷材個数とサージの動揺両振幅の関係 (対称係留系)

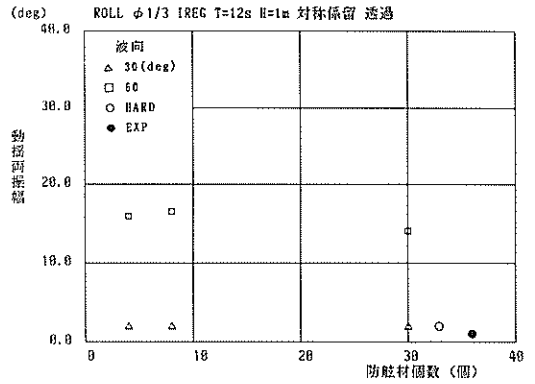


図-33-(4) 防舷材個数とロールの動揺両振幅の関係 (対称係留系)

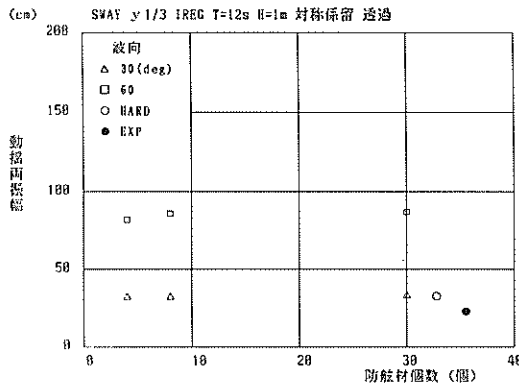


図-33-(2) 防舷材個数とスウェイの動揺両振幅の関係 (対称係留系)

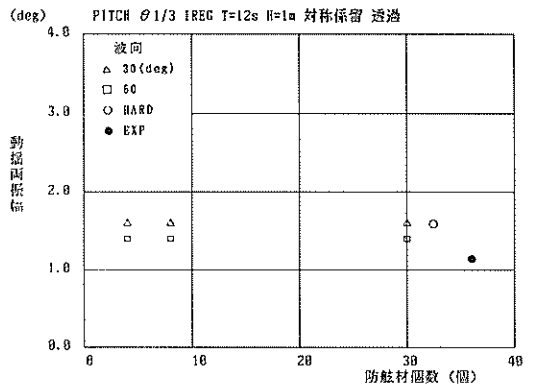


図-33-(5) 防舷材個数とピッチの動揺両振幅の関係 (対称係留系)

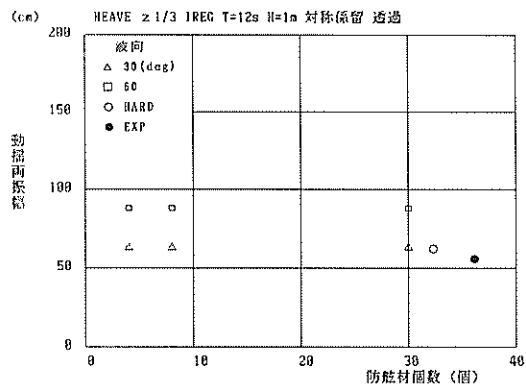


図-33-(3) 防舷材個数とヒープの動揺両振幅の関係 (対称係留系)

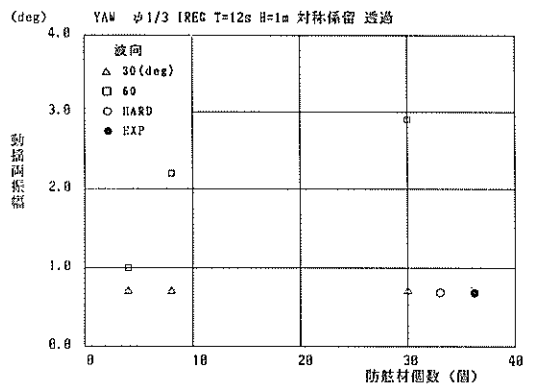


図-33-(6) 防舷材個数とヨウの動揺両振幅の関係 (対称係留系)



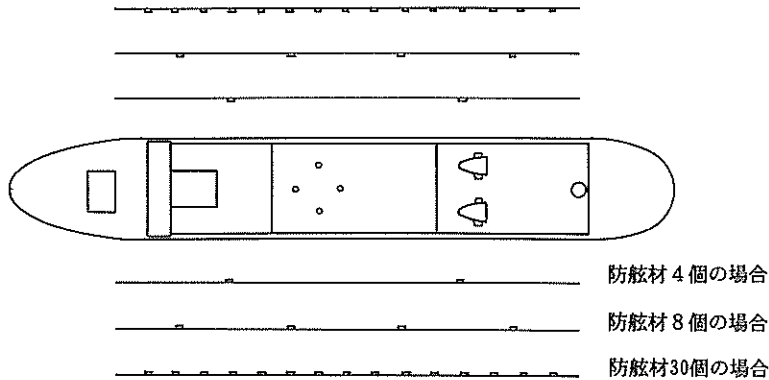


図-34 防舷材の配置

を图示したものである。対称係留系の計算においては防舷材の個数がヨウの動揺量に及ぼす影響は小さい。しかし、波向 $60^\circ$ の場合には、防舷材の個数が多い場合に動揺量が大きくなる。これは、防舷材30個配置した場合には係船岸の両側に近い位置に設置された防舷材の反力による回転モーメントが大きくなるためである。波向 $30^\circ$ の場合に同様のことが考えられるが、計算において防舷材に接触することが波向 $60^\circ$ の場合に比べて少なかったためと考えられる。また、計算結果と実験結果とはよく一致している。

## 6. 結 論

本論文における主要な結論は以下のとおりである。

接岸速度については以下のことが言える。

- 1) 船舶係留誘導装置に作用する接岸力は、前進速度をもつ接岸の場合も前進速度をもたない接岸の場合も計算値と実験値がほぼ一致しており、接岸力は係船岸の法線に直角方向の速度成分  $V_r$  を接岸速度とし、これをもって技術基準の方法に従って計算してよいといえる。
- 2) 波浪中においては長周期波中または波高が大きいときには船舶の動揺が大きいため、接岸力は静水中よりも大きいので、設計上留意する必要がある。

動揺実験および数値シミュレーションについては以下ことが言える。

- 3) 対称係留系と非対称係留系について動揺シミュレーション計算を行った結果を比較すると、対称係留系においては防舷材と係留系ばね定数の相違によるサブハーモニックモーメントが抑制されるため、サージ、スウェ

イ、ロール、ヨウについて、非対称係留系より係留船舶の動揺が小さい。ただし、ヒープ、ピッチについては、両者の差異はない。

- 4) 対称係留系において、係船岸の構造を、両側非透過、片側透過、両側透過として、それらについて動揺実験を行って係留船舶の動揺量を比較してみると、スウェイ、ロール、ヨウについては両側非透過が、またサージ、ヒープ、ピッチについては両側透過の動揺量が他の形式のものよりも小さい。両側非透過の場合には、係船岸で反射した波が係船岸の奥へ進入してくるためにサージなどの動揺量が大きくなっている。
- 5) 対称係留系について、防舷材の適性な配置を調べるために防舷材の個数等を変えて波向 $30^\circ$ および波向 $60^\circ$ について計算を行った結果、波向 $60^\circ$ の場合で防舷材の個数が多い場合にヨウの動揺量が大きくなった。これは防舷材を多数個配置した場合には、係船岸の両端附近に設置された防舷材の反力による回転モーメントが大きくなるためである。
- 6) 係留船舶の動揺シミュレーション結果は実験結果とよく一致した。

## 7. あとがき

本研究は港湾施設の係留および荷役の稼働率の向上を目的として、係留船舶の動揺特性に着目して船舶の動揺を抑制する係留システムを提案し、係留船舶の動揺を模型実験および動揺シミュレーションによって検討した。また、このシステムを利用するに当たり入港時の操船の困難さを解消するための船舶係留誘導装置に作用する接岸力を実験により求めた。対称係留系は係留船舶の動揺を低減する効果があることが確認され、この施設の有効性が確認された。対称係留系および船舶係留誘導装置は、

全天候バース、スーパーライナー用バース、離島等の外洋性港湾などにおける活用が期待される。

本研究で行った実験においては、船舶係留誘導装置に接岸時のせん断力が作用しないよう、模型製作上の工夫を凝らしたが、実現に当たっては前進速度をもつ船舶が船舶係留誘導装置に与えるせん断力を明らかにするとともに、これに対して安定な防衛工を開発しなければならない。防衛工と船舶との間に働く摩擦力は接岸船舶の前進速度を止め、また、係留船舶の動揺を抑制する効果を持つので、防衛工の耐せん断性が向上すれば、積極的に摩擦力を活用することが有効である。さらに、対称係留系への入港操船に関する検討も必要である。今後これらについて研究を行いたい。(1992年3月31日受付)

### 参 考 文 献

- 1) 社団法人日本港湾協会：“港湾の施設の技術上の基準・同解説”，1989年2月，下巻 p. 12.
- 2) 久保雅義，斎藤勝彦，大音宗昭：“漁船の入港援助施設に関する基礎的研究”，海岸工学論文集，第37巻，1990，pp. 728～732.
- 3) 社団法人日本港湾協会：“港湾の施設の技術上の基準・同解説”，1989年2月，上巻 pp. 17～20.
- 4) 上田 茂：“大型タンカーの接岸力に関する研究”，港湾技術研究所報告，第20巻2号，1981年6月，pp. 169～209.
- 5) 元良誠三：“Gravity Dyamometer による波浪中抵抗試験および Surging について”，造船協会論文集94号，1963年，pp. 43～52
- 6) 小坪清真：“土木振動学”，森北出版株式会社，1973年4月，pp. 31～43.
- 7) 上田 茂・白石 悟：“係留船舶の動揺計算法とその評価”，港湾技術研究所報告，第22巻4号，1983年12月，pp. 181～218.
- 8) 上田 茂：“係留船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究”，港湾技研資料，No. 504，1984年，372 p.

### 記号一覧表

$B$	: 船幅 (m)
$C_b$	: ブロック係数
$C_c$	: バースの形状係数
$C_e$	: 偏心係数
$C_m$	: 仮想質量係数
$C_s$	: 柔軟性係数
$E_t$	: 船舶の接岸エネルギー (tf·m)
$K$	: 模型防舷材のばね定数 (kgf/cm)
$L_s$	: 船体と前面受圧板と接触した位置と防舷材までの距離 (cm)
$L_{pp}$	: 垂線間長 (m)
$P$	: 模型接岸力 (kgf)
$P_1$	: 模型防舷材 1 にかかる接岸力 (kgf)
$P_2$	: 模型防舷材 2 にかかる接岸力 (kgf)
$V$	: 船舶の接岸速度 (m/s)
$V_x$	: 接岸速度の係船岸方向成分 (m/s)
$V_y$	: 接岸速度の係船岸に直交する方向成分 (m/s)
$W_s$	: 船舶の排水量 (tf)
$d$	: 喫水 (m)
$g$	: 重力加速度 (9.8m/s <sup>2</sup> )
$h$	: 減衰定数
$l$	: 係留施設に平行に測った接触点から船舶の重心までの距離 (cm)
$r$	: 環動半径 重心を通る鉛直軸まわりの回転半径 $r = 0.25 \times L_{pp}$ (cm)
$t$	: 減衰自由振動の周期 (s)
$w_0$	: 単位体積重量 (tf/m)
$x$	: 減衰自由振動の振幅 (cm)
$\delta$	: 対数減衰率
$\theta_s$	: 船体と係船岸法線とのなす角度 (°)
$\theta_v$	: 接岸速度の方向と係船岸法線とのなす角度 (°)
$\pi$	: 円周率

港湾技研資料 No.730

1992・6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 東京プリント

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1992) by P.H.R.I

Allright reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitt-ed, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of. P.H.R.I

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所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。