

港湾技研資料

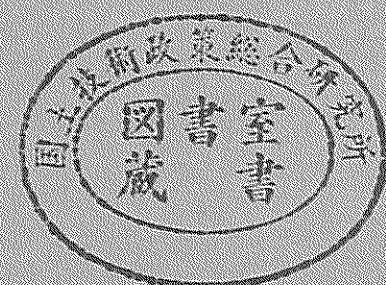
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 950 Dec. 1999

浮棧橋およびプレジャーボートの波浪中動揺特性に関する実験・解析

白	石		悟
名	里	健	吾
川	原	弘	靖

運輸省港湾技術研究所



目 次

要旨	3
1. まえがき	4
2. 水理模型実験およびデータ解析の方法	4
2. 1 実験施設および模型の構造	4
2. 2 実験方法および実験ケース	7
2. 3 実験データの解析方法	12
3. 水理模型実験結果	12
3. 1 単栈橋およびプレジャーボートの動揺	12
3. 2 くし型栈橋およびプレジャーボートの動揺	23
3. 3 くし型栈橋の曲げひずみ	30
4. 数値計算結果と水理模実験結果との比較	33
4. 1 概説	33
4. 2 数値計算手法	34
4. 3 単栈橋とプレジャーボートの流体力および動揺	38
4. 4 くし型栈橋とプレジャーボートの流体力および動揺	51
4. 5 本解析手法の応用	59
5. 結論	61
6. あとがき	61
参考文献	62
主要記号表	62

A Study on the Characteristics of Motions of Pleasure Boats and Floating Piers in a Marina

Satoru SHIRAISHI*

Kengo NAZATO**

Hiroyasu KAWAHARA***

Synopsis

Nowadays, construction and planning of marinas, which moor pleasure boats, are promoted. Most facilities are used to construct calm area sheltered well by bay or peninsula, but recently some of them are planned at the area where ocean wave easily enters. Thus, in the design of floating piers in a marina, it is important to consider not only motions of both floating piers and pleasure boats but also bending moments and shear forces of floating piers.

At first, motions of pleasure boats and floating piers and strain of floating piers are measured by hydraulic model tests scaled 1/20. Models of floating piers are both single rectangular one and comb-shaped one. The effect on the motion both of floating piers and pleasure boats and strains acting on floating piers due to the difference of the rigidity of floating piers, the mooring conditions of floating pier and the presence of pleasure boats at a pier are discussed.

Secondly, the motions and forces of floating piers and pleasure boats are analyzed by use of three dimensional source technique taking into account the interaction such as the effect on hydrodynamic interaction between floating bodies and mooring forces acting on mooring components connecting floating bodies.

Keywords : Marina, Floating pier, Pleasure boat, Motion, Moored floating body, Hydraulic model test, Numerical simulation

* Chief of Offshore Structures Laboratory, Structural Engineering Division

** Former Member of Offshore Structures Laboratory, Structural Engineering Division
(Nagasaki Ports and Airports Construction Office, The Forth District Ports and Harbours Construction Bureau)

*** Member of Offshore Structures Laboratory, Structural Engineering Division
Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport

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

phone: +81-468-44-5032, Fax: +81-468-44-4161, e-mail: shiraishi@cc.phri.go.jp

浮棧橋およびプレジャーボートの波浪中動揺特性に関する実験・解析

白石 悟*
名里 健吾**
川原 弘靖***

要 旨

国民の余暇の過ごし方の多様化に伴い、マリンスポーツに対する注目が高まっている。こうした背景を受けて、近年、プレジャーボートを係留するマリーナの計画および建設が全国で盛んに進められている。従来、こうした施設は比較的静穏な海域に建設される事例が多かったが、最近では外海の波の影響を受けやすい場所にも計画されている。したがって、マリーナの浮棧橋の設計においては、従来に増して波浪による動揺と断面力について配慮することが必要となる。本資料では、そのような観点からマリーナにおける浮棧橋とプレジャーボートの動揺および断面力（曲げひずみ）について水理模型実験の結果に基づいて考察した。また、新たに作成した複数係留浮体の動揺解析手法を用いて、浮棧橋とプレジャーボートの動揺量を動揺シミュレーションにより求め、この結果と水理模型実験結果とを比較した。

キーワード：マリーナ、浮棧橋、プレジャーボート、動揺、係留浮体、水理模型実験、動揺シミュレーション

* 構造部 海洋構造研究室長

** 前構造部 海洋構造研究室（現第四港湾建設局長崎港湾空港工事事務所）

*** 構造部 海洋構造研究室

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1

運輸省港湾技術研究所

Phone: 0468-44-5032 Fax: 0468-44-4161 e-mail:shiraishi@cc.phri.go.jp

1. まえがき

国民の余暇の過ごし方の多様化に伴い、マリンスポーツに対する注目が高まっている。こうした背景を受けて、近年、プレジャーボートを係留するマリーナの計画および建設が全国で盛んに進められている。従来、こうした施設は静穏な海域に建設される事例が多かったが、最近では外海の波の影響を受けやすい場所にも計画されている。したがって、マリーナの浮棧橋の設計においては、従来に増して波浪による動揺と断面力について配慮することが必要となる。本資料では、そのような観点からマリーナにおける浮棧橋とプレジャーボートの動揺および浮棧橋の断面力について水理模型実験および動揺シミュレーションの結果に基づいて設計上留意すべき点について考察する。

以下に、本資料の構成について簡単に示す。

第2章においては、水理模型実験の概要を記述した。水理模型実験は、浮棧橋の一部を取り出した単棧橋（箱型棧橋）にプレジャーボートが1隻係留しているモデルと、くし（櫛）型の浮棧橋にプレジャーボートが4隻係留されているモデルとについて実施している。いずれのモデルについても現実のマリーナの浮棧橋ほどには多数のプレジャーボートが係留されていないが、水理模型実験は複数浮体の動揺挙動の基本的な性質を明らかにすることと、第4章において述べる動揺解析手法の検証のために実施するものである。

第3章においては、単棧橋およびくし型棧橋について行った水理模型実験結果について示す。水理模型実験は、波高、波向、波周期等の波浪条件のほかに、浮棧橋の曲げ剛性の違い、棧橋の固定条件の違い、プレジャーボートの係留の有無などをパラメーターとして実施しており、これらのパラメーターが浮棧橋およびプレジャーボートの動揺、浮棧橋の曲げひずみに及ぼす影響について述べる。

第4章においては、複数浮体の相互干渉効果を考慮した動揺解析手法をマリーナにおける浮棧橋およびプレジャーボートの動揺解析に適用した事例について述べる。浮棧橋およびプレジャーボートは風荷重・波浪荷重等の外力の影響を受けて他の浮体の影響を受けながら動揺することから、浮体の動揺解析をより精緻に行うためには、浮体間の連成影響を数値解析においても考慮しなければならない。すなわち、浮棧橋とプレジャーボートとから構成される複数浮体の動揺解析においては、以下の2つの連成影響を考慮することが必要となる。

①流体力学的相互干渉効果

複数の浮体が近接して存在することにより、ある任意

の浮体が動揺したときに発生する波力は他の浮体に影響を及ぼす。これが、流体力学的相互干渉効果である。流体力学的相互干渉効果には、波浪強制力として寄与する項と、ラディエーション流体力（造波抵抗力と呼ばれることもある）として寄与する項とがある。

静止した浮体に波が作用するときの波浪強制力は、入射波による力（フルードクリロフ力）と波浪の作用によって浮体周辺に発生する散乱波による力（ディフラクション力）との和である。複数個の浮体が近接して存在することにより浮体が単独に存在するときと比べて浮体周辺の波動場が変化するので散乱波による波力もこれに伴って変化する。この効果によって、運動方程式中の右辺の波浪強制力に基づく外力項が変化する。

また、浮棧橋およびプレジャーボートはそれぞれ動揺することにより周辺の流体に波を発生させる。このとき浮体が流体から反作用の力として受ける力をラディエーション流体力と呼んでいるが、この力のうち浮体の加速度に比例する成分を付加質量力、浮体の速度に比例する成分を造波減衰力として運動方程式に組み込んで動揺解析がなされる。これらの力も複数個の浮体が近接して存在することによって浮体が単独に存在する場合と比べて変化する。すなわち、浮体の運動方程式中の付加質量マトリックスおよび造波減衰マトリックスは、流体力学的相互干渉効果の影響を考慮して設定しなければならない。

②連結力による相互干渉効果

従来の1浮体の動揺解析モデルにおいても、浮体が動揺することにより生ずる係留力を計算している。係留力は動揺する浮体上の係留点と固定点（固定棧橋、海底地盤等）との間の係留ばねに作用する力である。一方、複数個の浮体が存在することによって、浮体間を連結する係留索、防舷材等との間にも力が発生する。これらの力は浮体と固定点との間に作用する係留力とは区別して連結力と呼称する。この浮体間に作用する連結力を考慮する点が、複数浮体の動揺解析モデルが従来の1浮体の動揺解析モデルと異なるもう一つの重要な要素である。

第5章においては、以上の水理模型実験および数値シミュレーションによる結果に基づいて浮棧橋およびプレジャーボートの動揺特性についての主要な結論を述べる。

2. 水理模型実験およびデータ解析の方法

2.1 実験施設および模型の構造

(1) 水理模型実験の概要

浮棧橋およびそれに係留されたプレジャーボートの動揺特性を調べる目的で水理模型実験を実施した。水理模

型実験は運輸省港湾技術研究所の平面水槽（長さ25m×幅10m×深さ1m）を用いて実施した。水理模型実験は単棧橋にプレジャーボートが係留されている状態、およびくし型棧橋にプレジャーボートが係留されている状態の2状態について行っており、それぞれの状態において、浮棧橋の曲げ剛性が浮棧橋およびプレジャーボートの動揺特性に及ぼす影響、プレジャーボートの係留の有無による浮棧橋の動揺特性の差異などを調べている。水理模型実験はフルード相似則に従って実施しており、実験の際の模型縮尺は $S=1/20$ である。したがって、各物理量の縮尺は表-1に示すとおりである。すなわち、実物と模型の換算の比は、力および重量は $S^3=1/20^3=1/800$ 、ばね定数は $S^2=1/20^2=1/400$ 、周期は $\sqrt{S}=1/\sqrt{20}=1/4.47$ である。なお、以下の水理模型実験結果の記述においては、数値は主として模型における諸量を示すものとするが、必要に応じて現地換算の数値も併記する。

(2) 単棧橋模型およびプレジャーボート模型

図-1は、単棧橋における水理模型実験の模型の概要図を示す。プレジャーボートは単棧橋の前面に1隻のみ係留されている。実際のマリーナにおいては、このような単純な係留状態になることは少ないが、浮棧橋とプレジャーボートの双方が動揺することによる相互干渉効果の影響を調べる目的で複数浮体の最も単純な状態として同図

表-1 水理模型実験における模型縮尺

物理量	模型	実物
長さ	$S=1/20$	1
荷重	$S^3=(1/20)^3$	1
質量	$S^3=(1/20)^3$	1
ばね定数	$S^2=(1/20)^2$	1
時間・周期	$S^{0.5}=(1/20)^{0.5}$	1

(注) 表中の数値は、本資料における模型縮尺を示す。

に示す係留状態で水理模型実験を実施したものである。同図には波向を示しており、単棧橋の長軸方向から入射する波向を 0° 、単棧橋の真横から入射する波向を 90° としている。なお、水理模型実験における水深は50cm（現地10.0m）である。

表-2は、単棧橋およびプレジャーボートの主要な諸元を示したものである。単棧橋は長さ75.0cm、幅18.0cm、高さ7.0cm、喫水4.0cm、重量5.56kgのポリウレタン製であり、棧橋模型は波の作用によって弾性的な変形性状を示す。模型に用いたポリウレタン板のヤング率は、 $E=1070\text{kg/cm}^2(10.49\text{kN/cm}^2)$ である。また動揺実験においては曲げ剛性を変化させた実験を行っており、剛体モデル

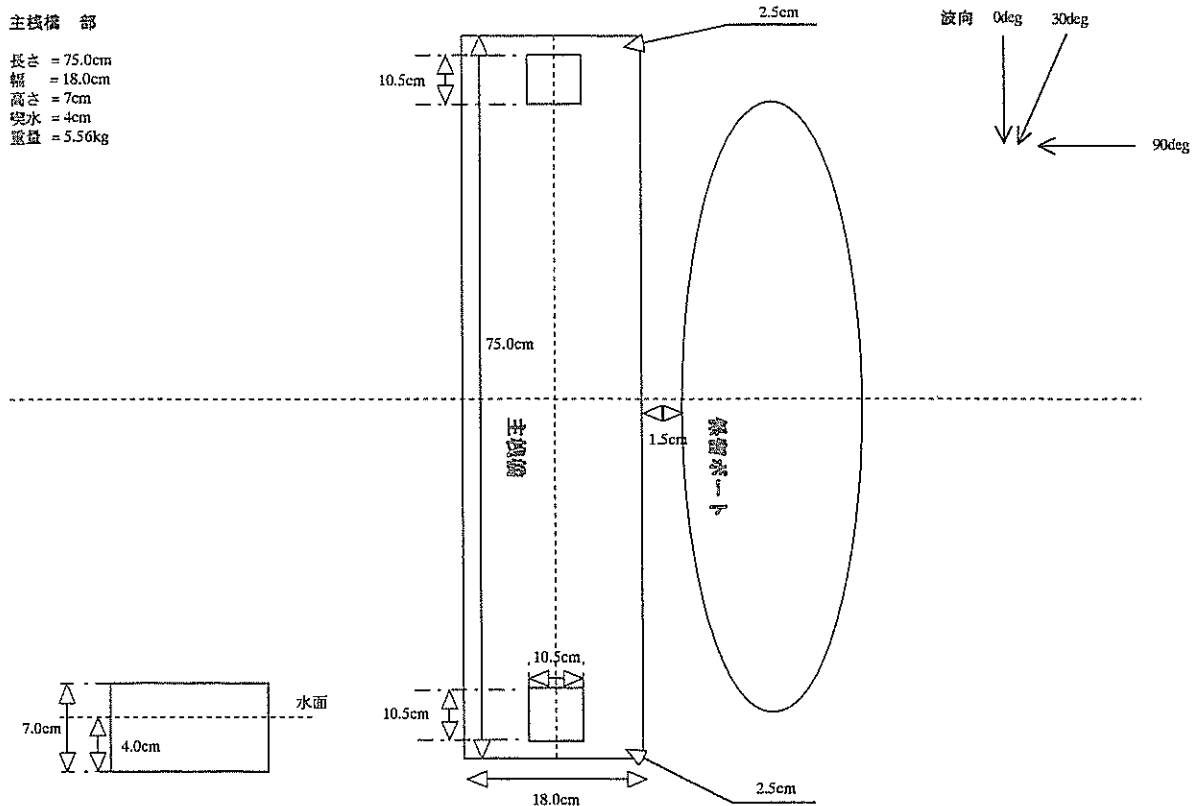


図-1 単棧橋にプレジャーボートが1隻係留されている場合のモデル

表-2 単棧橋およびプレジャーボートの諸元

単棧橋

諸元	模型	実物
長さ(m)	0.75	15.0
幅(m)	0.18	3.6
高さ(m)	0.07	1.4
喫水(m)	0.04	0.8
重量(kg)	5.56	44.48×10 ³

プレジャーボート

諸元	模型	実物
長さ(m)	0.60	12.0
幅(m)	0.205	4.1
型深さ(m)	0.107	2.13
喫水(m)	0.055	1.1
重量(kg)	1.45	11.60×10 ³

においては厚さ 4mmのアルミ板を弾性浮体モデルの表面に接着してその剛性を高めている。また、プレジャーボートは40フィート級のパワーボート（実機諸元：長さ12m×幅4.1m）に基づいて、その1/20縮尺の模型を作成している。外観形状を写真-1に示す。プレジャーボートの模型重量は1.45kgである。

単棧橋の両端には、長さ10.5cm、幅10.5cmの矩形の穴が開けられており、係留用のポールが貫通している。単棧橋とポールの間には線形の変位復元力特性を有するコイルスプリングがセットされているが、このコイルスプリングのばね定数は、浮棧橋が杭係留されている状態の杭の横抵抗力に基づいて求めた。水理模型実験における線形ばねのばね定数は、0.133kgf/mm(1.30N/mm)（現地換算値は53.2tf/m(521kN/m)）である。なお浮棧橋は通常、上下方向には拘束されていないが、浮棧橋を係留ポールにロックして上下方向の運動を拘束できるように模型を製作している。これは、浮棧橋の上下動を拘束することによって、拘束しないときのプレジャーボートの動揺特性との相違を調べることを目的としている。

プレジャーボートは合計4個のコイルスプリングによって単棧橋に係留されている。このコイルスプリングのばね定数は0.00055kgf/mm(0.0054N/mm)および0.0011kgf/

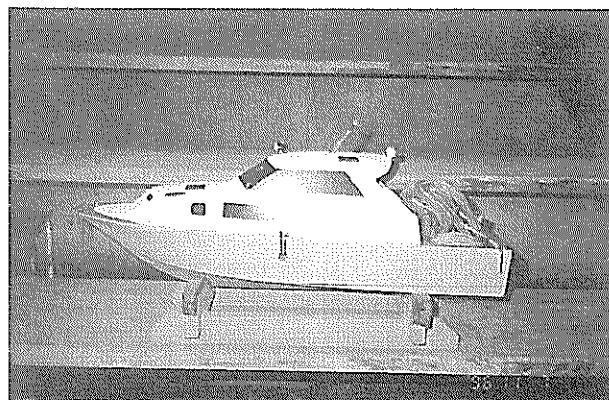


写真-1 模型実験に用いたプレジャーボートの外観形状

mm(0.011N/mm)（現地換算値は0.22tf/m(2.2kN/m)および0.44tf/m(4.3kN/m)）である。

(3) くし型棧橋模型

図-2は、くし型棧橋の模型の概要図を示す。プレジャーボートは、くし型棧橋に4隻係留されている。実際のマリナーでは、さらに多くのくし型浮体が連続的に配置されており、また、係留されているプレジャーボートの数も多い。しかしながら、水理模型実験を実施する上での造波可能な波浪諸元の制約、データの計測精度、実験経費等を勘案して、くし型浮体の最も単純なケースとして上述の形状および諸元を選定している。図中には波向を示しており、主棧橋の方向から波が作用する波向を0°、補助棧橋の方向から波が作用する波向を90°としている。ただし、浮棧橋については、主棧橋の長軸方向の動揺成分をサージ、それと直交する方向の動揺成分をスウェイと定義している。一方、プレジャーボートは船首尾方向の動揺成分をサージ、それと直交する動揺成分をスウェイと定義している。したがって、主棧橋に対してサージが卓越する波向0°の場合に、プレジャーボートは横波状態となり、スウェイが卓越する。水理模型実験における水深は単棧橋模型のときと同様に50cm（現地10.0m）である。

表-3は、くし型棧橋の諸元を示したものである。くし型浮体に用いた材質は単棧橋の場合と同じくポリウレタン製であり、そのヤング率は単棧橋のときと同一である。また単棧橋のときと同様にアルミ版を弾性浮体モデルに接着し曲げ剛性を変化させた実験を行っている。主棧橋の諸元は長さ172.0cm、幅20.0cm、高さ7.0cm、喫水4.0cmである。また、補助棧橋は長さ65.0cm、幅18.0cm、高さ7.0cm、喫水1.0cmであり、主棧橋に対して左右にそれぞれ2対存在する。くし型棧橋の模型総重量は、33.45kgである。くし型棧橋は、図-2に示すように主棧橋端部に2箇所係留

主栈橋部

長さ = 172.0cm
幅 = 20.0cm
高さ = 7cm
喫水 = 4cm
重量 = 14.17kg

補助栈橋部 (1個に対して)

長さ = 65.0cm
幅 = 18.0cm
高さ = 7.0cm
喫水 = 4.0cm
重量 = 4.82kg

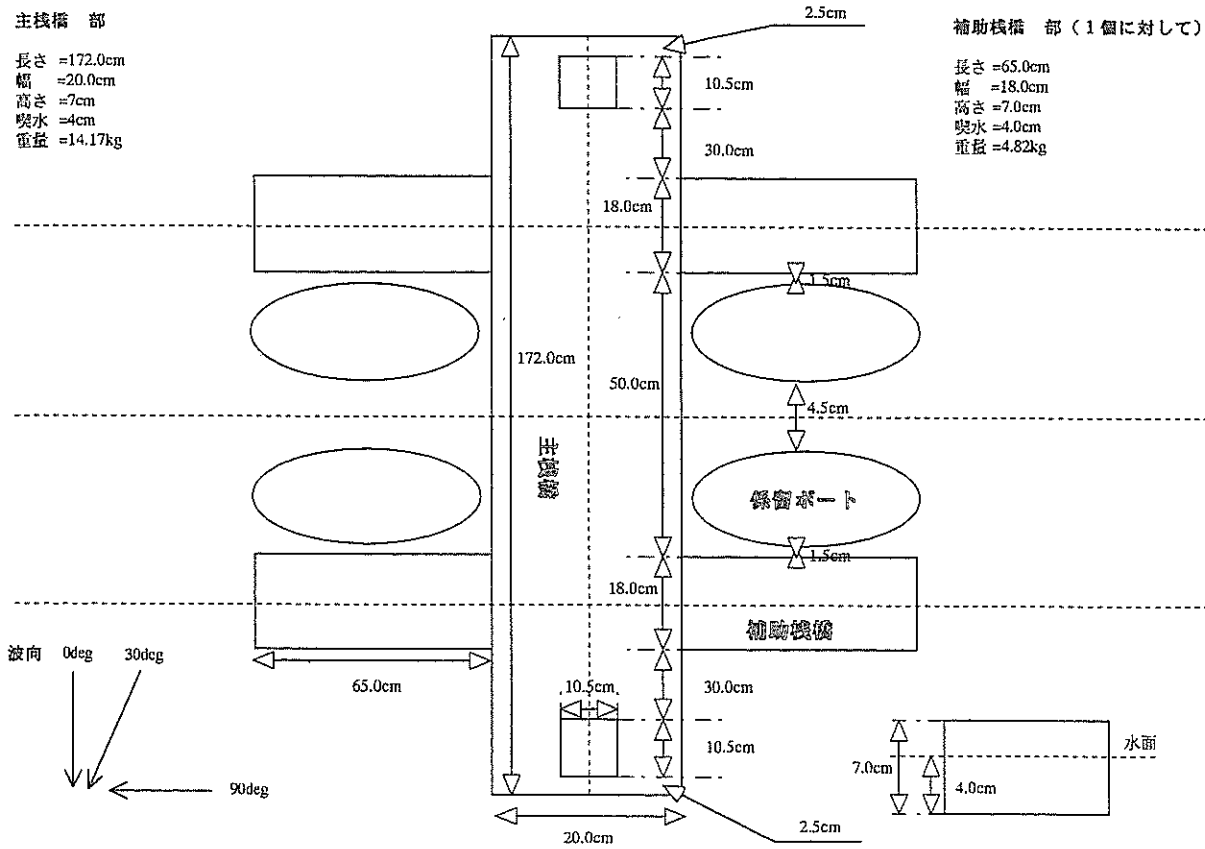


図-2 くし型栈橋にプレジャーボートが複数隻係留されている場合のモデル

表-3 くし型栈橋の諸元

主栈橋

諸元	模型	実物
長さ(m)	1.72	34.4
幅(m)	0.20	4.0
高さ(m)	0.07	1.4
喫水(m)	0.04	0.8
重量(kg)	14.17	113.36×10^3

補助栈橋 (1体あたり)

諸元	模型	実物
長さ(m)	0.65	13.0
幅(m)	0.18	3.6
型深さ(m)	0.07	1.4
喫水(m)	0.04	0.8
重量(kg)	4.82	38.56×10^3

されている。くし型栈橋の係留部の構造は単栈橋のときと同一である。また、そのばね定数は 0.293 kgf/mm (2.87 N/mm) (現地換算値は 117.2 tf/m (1150 kN/m)) である。また、それぞれのプレジャーボートは4個のコイルスプリングで係留されているが、そのばね定数はプレジャーボートの船首側から、それぞれ 0.043 , 0.0096 , 0.0096 , 0.051 kgf/mm (0.42 , 0.94 , 0.94 , 0.50 N/mm)、(現地換算値は 2.2 , 3.84 , 3.84 , 20.4 tf/m , (169 , 37.6 , 37.6 , 200 kN/m)) である。

2.2 実験方法および実験ケース

(1) 単栈橋模型

水理模型実験における計測項目は、加速度計 (共和電業(株)製AS-1TG型 (3軸) およびAS-1GA型 (1軸)) によるプレジャーボートおよび浮栈橋の上下加速度および水平加速度、X-Yトラッカー (浜松フォトニクス(株)製C3162型) による浮栈橋の水平変位 (Surge, Sway)、ひずみゲージ (共和電業(株)製KFML-5-350-C1) による浮栈橋の曲げひずみ、容量式波高計による波高である。加速度計によって計測された加速度記録は、後述するように周波数領域で二階積分を行って変位を求める。図-3は、単栈橋模型における計測ブロック図である。計測成分は、

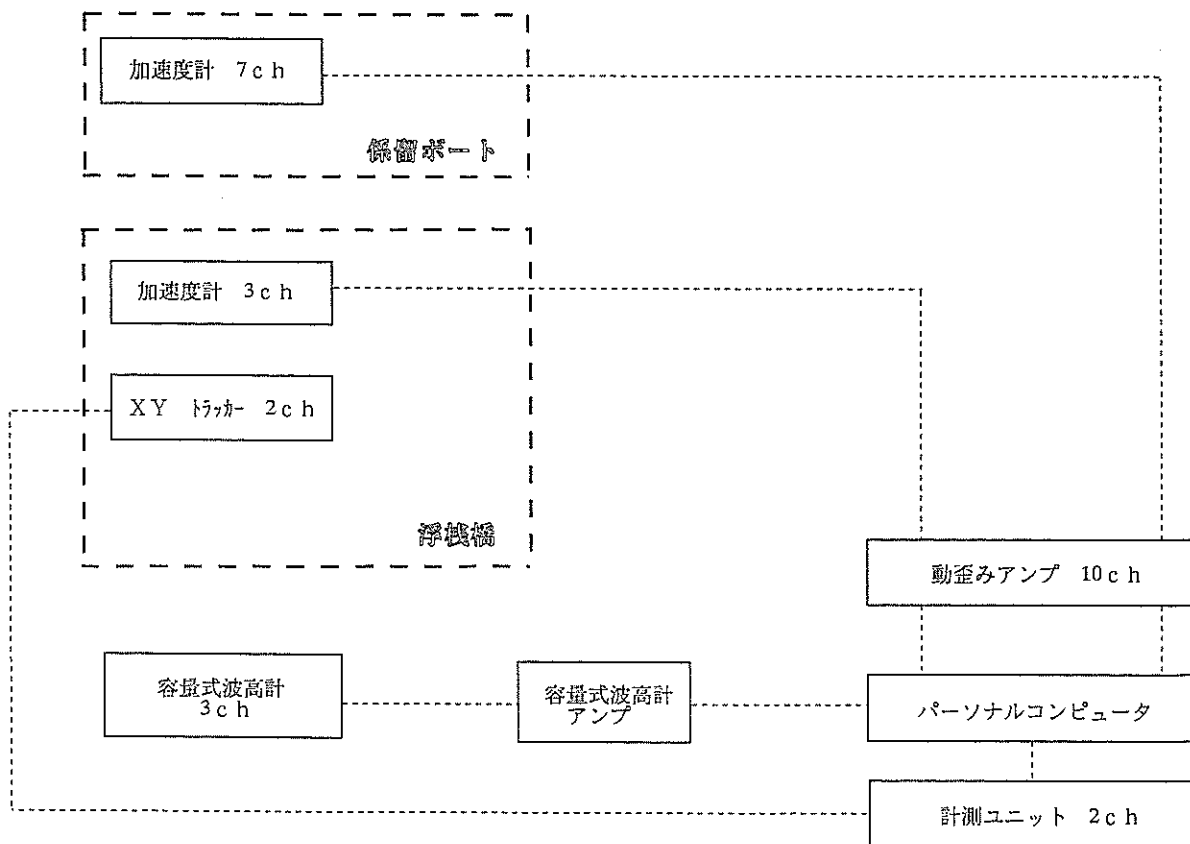


図-3 単棧橋模型における計測ブロック図

プレジャーボートの加速度については合計7成分（船体中央に3成分，船首に1成分，船尾に1成分，船側に2成分）であり，計測後これらの加速度記録を用いて二階積分を行って変位を求め，これを演算処理することによってプレジャーボートのサージ，スウェイ，ヒープ，ロール，ピッチ，ヨウの動揺量を求める。浮棧橋については，棧橋中央位置に設置した加速度計による加速度3成分を用いてサージ，スウェイ，ヒープを，X-Yトラッカーによってサージ，スウェイを計測している。これらの計測データは，動ひずみアンプ（共和電業（株）製 CDA-21A型，DPM-611B型，日本電気三栄（株）製A51203型，6M82型）および容量式波高計アンプによって信号増幅した後に，パーソナルコンピュータのA/D変換ボードを介してハードディスクに記憶される。なお，計測の際のサンプリング周波数は20Hzとした。写真-2は，プレジャーボートが単棧橋模型に係留されている状態の実験状況を示す。

(2) くし型棧橋模型

水理模型実験における計測項目は，単棧橋のときと同様であるが，X-Yトラッカーのかわりにレーザー式変位計（（株）キーエンス製LB-300型）を用いている。図-4に計測器の設置位置を示しているが，加速度計は，プレ

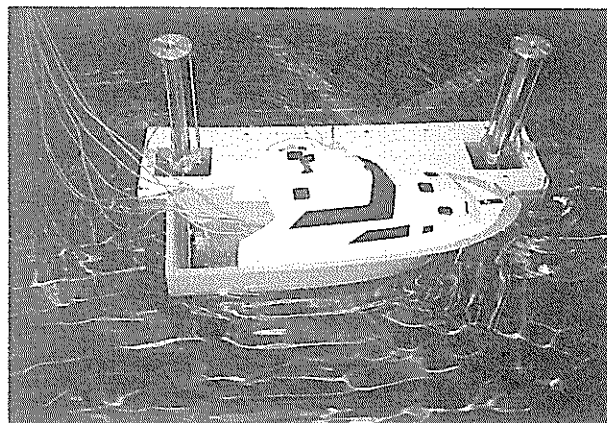


写真-2 単棧橋模型における実験状況
(プレジャーボート係留状態)

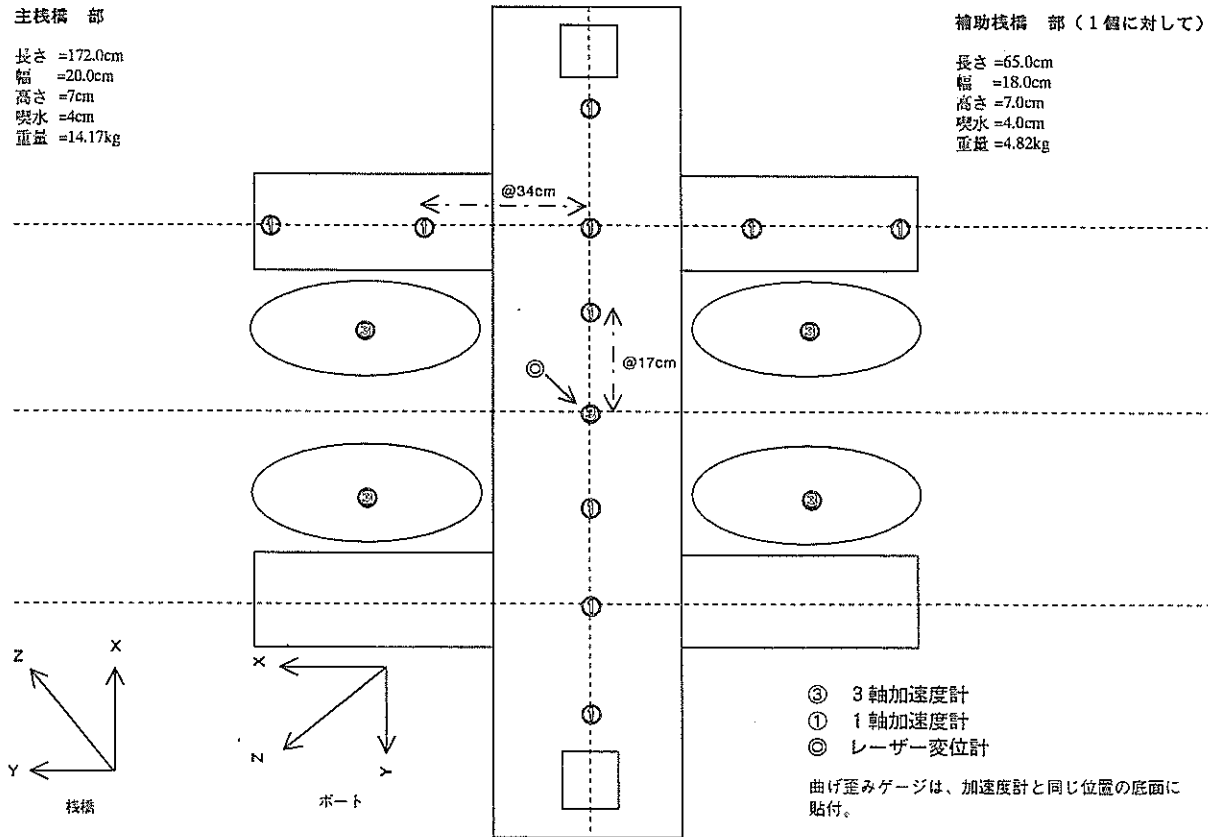
ジャーボート4隻にそれぞれ3軸型の加速度計を，主棧橋および補助棧橋には鉛直加速度計測用に10個の1軸型加速度計を配置している。これとは別に主棧橋中央位置に3軸型の加速度計を設置して鉛直および水平方向の加速度を計測している。また，レーザー式変位計を用いて主棧橋中央の鉛直変位を計測している。ひずみゲージは，主棧橋に7点，補助棧橋に4点貼付しており，これらのデータを用いて浮棧橋の曲げひずみの分布を求めている。

主栈橋部

長さ =172.0cm
幅 =20.0cm
高さ =7cm
喫水 =4cm
重量 =14.17kg

補助栈橋部（1個に対して）

長さ =65.0cm
幅 =18.0cm
高さ =7.0cm
喫水 =4.0cm
重量 =4.82kg



計測器設置図（動揺測定時）

図-4 くし栈橋における計測器の配置

ひずみゲージの貼付位置は加速度計と同じ位置であり、浮栈橋模型の底面に貼付した。また、容量式波高計を用いて波高を計測している。図-5は、くし型栈橋模型における計測ブロック図である。ただし、前述したパーソナルコンピュータを用いた計測システムにおける同時計測可能なチャンネル数の制約（最大32ch）があったことから、動揺を主に計測する場合（図-5(a)）と、曲げひずみを主に計測する場合（図-5(b)）とに分けて計測している。写真-3および写真-4は、くし型栈橋模型にプレジャーボートが係留されている状態の水理模型実験の状況を示す。

(3) 実験ケース

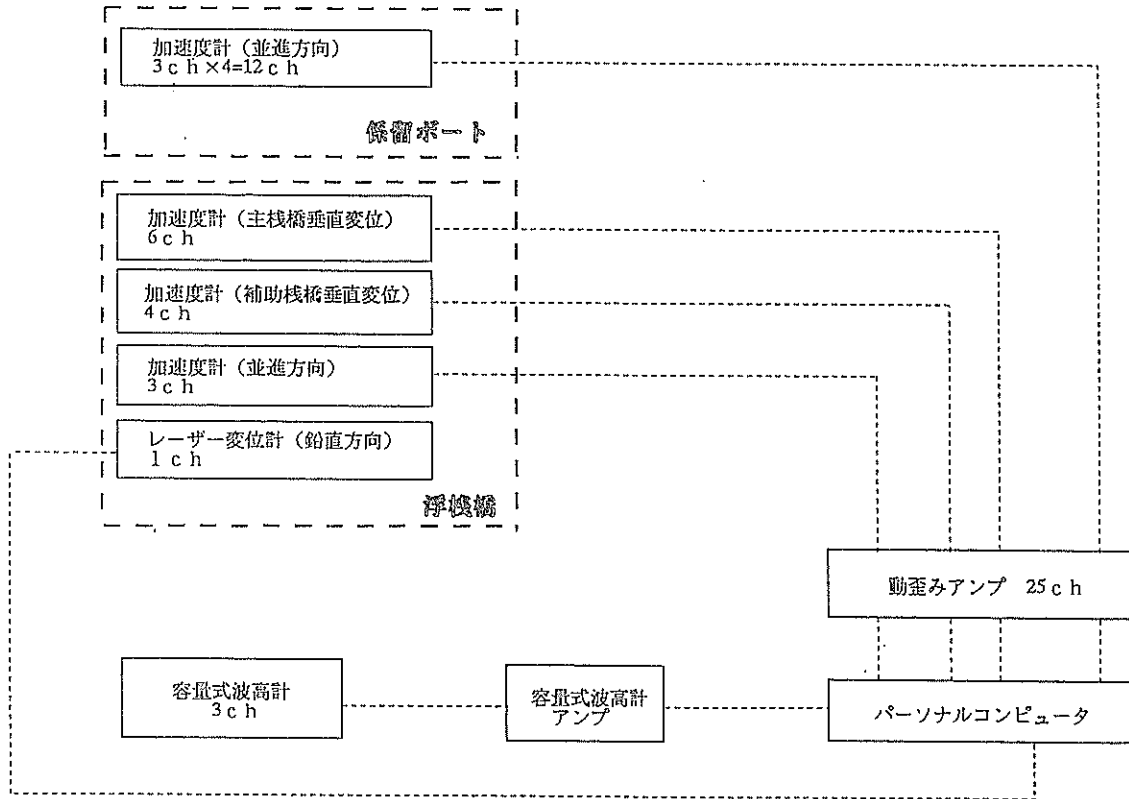
a) 単栈橋模型

水理模型実験においては、浮栈橋の曲げ剛性の相違による浮栈橋およびプレジャーボートの動揺特性の相違、プレジャーボートの係留の有無による浮栈橋の動揺特性の相違、栈橋固定条件によるプレジャーボートの動揺特性の相違、波高、波向、波周期による浮栈橋およびプレジャーボートの動揺特性の相違などを調べた。表-4は単栈橋における実験条件の一覧表であり、実験ケースの総数は198である。栈橋模型は前述したようにポリウレタン

製であり弾性的な性状を示す材質であるが、その弾性的な性状を示す状態で実験を行ったものを”弾性体”、これにアルミ製の板を張り付けて浮栈橋の剛性を増したものを”剛体”と表記している。また、浮栈橋の両端の係留ポールの箇所で栈橋の上下方向の運動を拘束したものを”固定”、拘束しないものを”浮動”と表記している。水理模型実験におけるプレジャーボートの係留の有無は、表中に○×で記載している。波高（不規則波では有義波高）は、模型で2.5cmまたは5.0cm（現地換算で0.5mまたは1.0m）である。波向は0°、30°、60°、90°である。波周期（不規則波では有義波周期）は、規則波実験では1.12、1.34、1.57、1.79、2.01、2.24 s（現地換算で5、6、7、8、9、10 s）の6種、不規則波実験では、1.12、1.78、2.24 s（現地換算で5、8、10 s）の3種である。

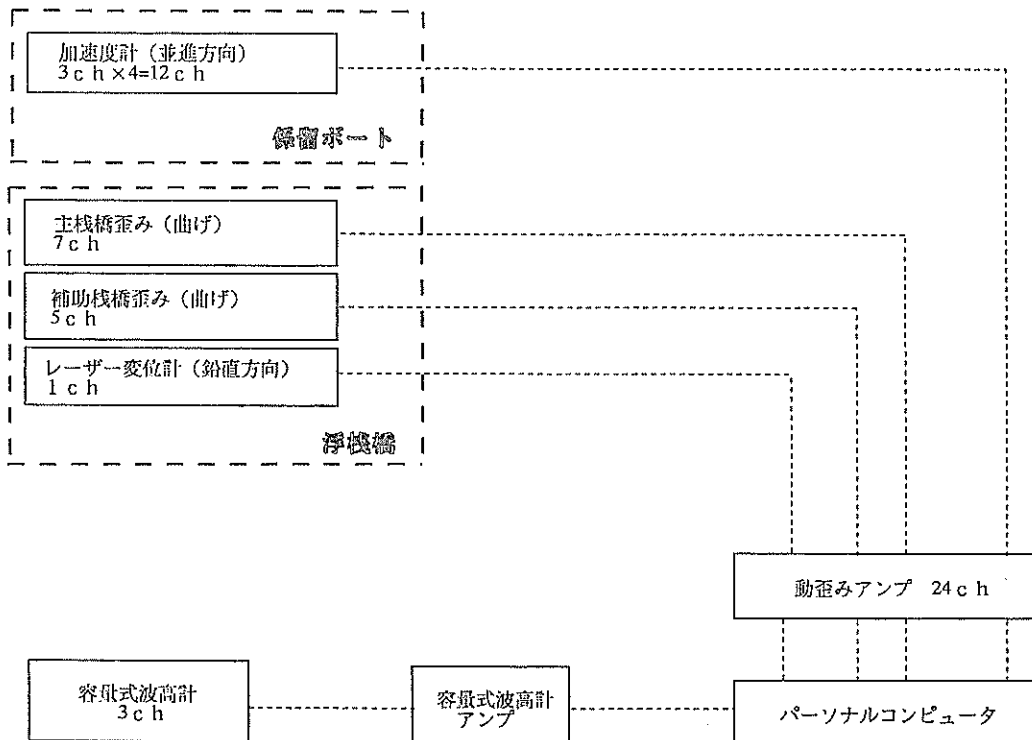
b) くし型栈橋模型

くし型栈橋模型に対する水理模型実験においては、浮栈橋の曲げ剛性の相違による浮栈橋およびプレジャーボートの動揺特性の相違、プレジャーボートの係留の有無による浮栈橋の動揺特性の相違、波高、波向、波周期による浮栈橋およびプレジャーボートの動揺特性の相違を調べた。ただし、単栈橋のときに実施した栈橋の固定条



計測器構成図 (動揺測定時)

(a) 動揺を主として計測する場合



計測器構成図 (歪み測定時)

(b) 曲げひずみを主として計測する場合

図-5 くし型栈橋模型における計測ブロック図

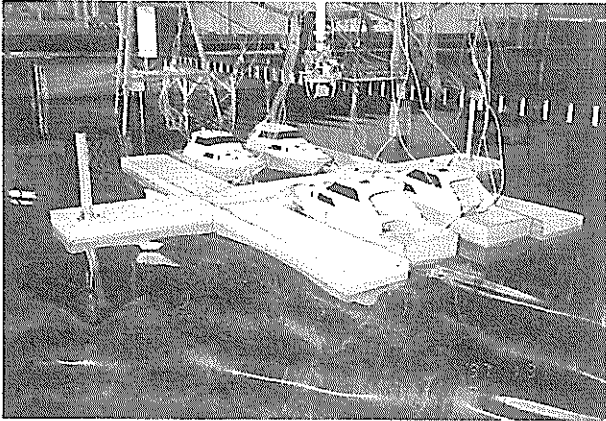


写真-3 くし型栈橋状態模型の実験状況
(プレジャーボート係留状態, 全体状況)

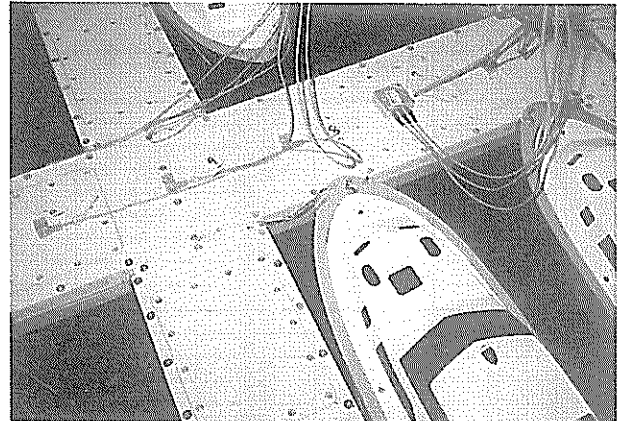


写真-4 くし型栈橋状態模型の実験状況
(プレジャーボート係留状態, 計測器の設置状況)

表-4 単栈橋模型における実験ケースの一覧表

番号	剛性	栈橋	ボート	波高	波向	波周期		ケース数
						規則波	不規則波	
1	剛体	固定	○	0.5	0	6	3	9
2		浮動	○	0.5	0	6	3	9
3		浮動	×	0.5	0	6	3	9
4		浮動	○	0.5	30	6	3	9
5		浮動	×	0.5	30	6	3	9
6		固定	○	0.5	90	6	3	9
7		浮動	○	0.5	90	6	3	9
8		浮動	×	0.5	90	6	3	9
9	弾性体	浮動	○	0.5	0	6	3	9
10		浮動	○	1.0	0	6	3	9
11		浮動	×	0.5	0	6	3	9
12		浮動	×	1.0	0	6	3	9
13		浮動	○	0.5	30	6	3	9
14		浮動	○	1.0	30	6	3	9
15		浮動	×	0.5	30	6	3	9
16		浮動	×	1.0	30	6	3	9
17		浮動	○	0.5	60	6	3	9
18		浮動	○	1.0	60	6	3	9
19		浮動	○	0.5	90	6	3	9
20		浮動	○	1.0	90	6	3	9
21		浮動	×	0.5	90	6	3	9
22		浮動	×	1.0	90	6	3	9

TOTAL 198

注) 栈橋 固定 = 栈橋の上下方向を拘束。 浮動 = 栈橋の上下方向を自由。
 ボート ○ = ボート係留あり。 × = ボート係留なし。
 波周期 6 = 波周期1.12s~2.24sの6種類(現地では5s~10s)。
 3 = 波周期1.12s, 1.79s, 2.24sの3種類(現地では5s, 8s, 10s)。

件に関する実験は実施しておらず、すべて、くし型栈橋は浮動状態である。表-5はくし型栈橋における実験条件の一覧表であり、実験ケースの総数は180である。表中の表記は、単栈橋のときに準じている。ただし、ひずみ測定のカラムの×は動揺のみを計測していることを表し、○は浮栈橋の曲げひずみを計測していることを示す。波高(不規則波では有義波高)は、模型で1.5cmまたは2.5cm

(現地換算で0.3mまたは0.5m)である。波向、波周期の条件は単栈橋模型のときと同様である。

表-5 くし型栈橋模型における実験ケースの一覧表

番号	剛性	栈橋	ボート	歪み測定	波高	波向	波周期		ケース数
							規則波	不規則波	
1	剛体	浮動	○	×	0.5	0	6	3	9
2		浮動	○	×	0.5	0	6	3	9
3		浮動	△	×	0.5	0	6	3	9
4		浮動	×	×	0.5	0	6	3	9
5		浮動	○	×	0.3	0	6	3	9
6		浮動	○	×	0.5	30	6	3	9
7		浮動	○	×	0.3	30	6	3	9
8		浮動	○	×	0.5	90	6	3	9
9		浮動	○	×	0.3	90	6	3	9
10	弾性体	浮動	○	×	0.5	0	6	3	9
11		浮動	○	×	0.3	0	6	3	9
12		浮動	○	○	0.5	0	6	3	9
13		浮動	○	○	0.3	0	6	3	9
14		浮動	×	○	0.5	0	6	3	9
15		浮動	○	×	0.5	30	6	3	9
16		浮動	○	×	0.3	30	6	3	9
17		浮動	○	×	0.5	90	6	3	9
18		浮動	○	×	0.3	90	6	3	9
19		浮動	×	○	0.5	90	6	3	9
20		浮動	×	○	0.5	30	6	3	9
TOTAL								180	

注) 栈橋 固定 = 栈橋の上下方向を拘束。 浮動 = 栈橋の上下方向を自由。
 ボート ○ = ボート係留あり。 × = ボート係留なし。
 △ = ボート係留ばね変更。
 波周期 6 = 波周期1.12s~2.24sの6種類(現地では5s~10s)。
 3 = 波周期1.12s, 1.79s, 2.24sの3種類(現地では5s, 8s, 10s)。

2.3 実験データの解析方法

前出のブロックダイアグラムに示したように全ての計測データはA/D変換されてパーソナルコンピューターのハードディスクにデジタルデータとして保存される。これらのデータのうち加速度計で計測された成分については周波数領域における数値2階積分を行って加速度データから変位データに変換処理を行った。数値積分における積分の周波数帯域を決定するにあたってはレーザー式変位計と同じポイントで計測されている加速度データの積分結果を用いて比較検討を行った。

浮栈橋の動揺量は栈橋上に配置した3成分または1成分の加速度計で計測されているので、これらのデータを用いて変位を二階積分で求めた後に浮栈橋のロール、ピッチ、ヨウを演算処理によって求めている。

3. 水理模型実験結果

3.1 単栈橋およびプレジャーボートの動揺

(1) 水理模型実験の概要

ここでは、単栈橋について行った水理模型実験について以下のパラメーターが単栈橋およびプレジャーボートの動揺に及ぼす影響について述べることにする。

- ・波向の影響
- ・波高の影響
- ・栈橋剛性の影響

・栈橋固定条件の影響

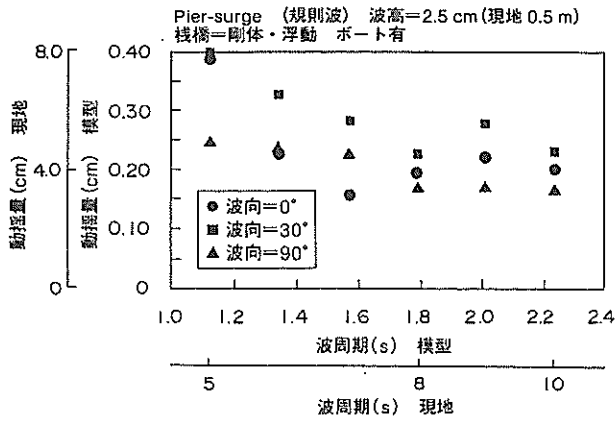
・プレジャーボートの係留の有無の影響

(2) 波向の影響

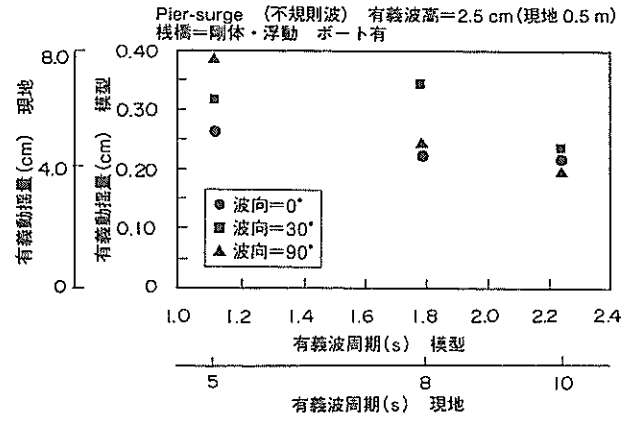
ここでは、波向の影響について、浮栈橋にプレジャーボートが係留されている状態における浮栈橋およびプレジャーボートの動揺量を示す。

図-6(1)~(6)は、浮栈橋のサージ、スウェイ、ヒープの3成分について波高2.5cmの規則波中および不規則波中の動揺量を示している。同一図面に波向0°、30°、90°の実験結果を示している。ただし、ここで示す条件は、浮栈橋の剛性が“剛体”モデルであり、浮栈橋の固定条件が“浮動”である。

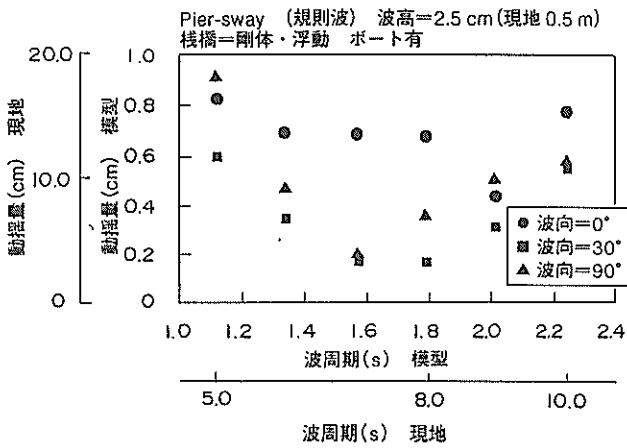
図-6(5)~(6)に示すように、浮栈橋のヒープの動揺量は波高(模型で2.5cm)に対して0.7~1.0倍であり、不規則波中においては、波向90°の状態の動揺量が、他の波向における動揺量に比べてやや大きい。これに対して、図-6(1)~(4)に示すように、サージおよびスウェイの動揺量は波高に対して0.1~0.3倍程度であるが、これは浮栈橋が上下方向に対しては自由状態であるのに対して、水平方向には係留ばねによって拘束されているおり、サージおよびスウェイの水平方向の動揺成分については運動が拘束されていることがわかる。スウェイにおいては、図-6(4)に示すように不規則波中では、横波となる波向90°における動揺量が、他の波向における動揺量に比べてやや大きい傾向がみられるが、図-6(3)に示すように



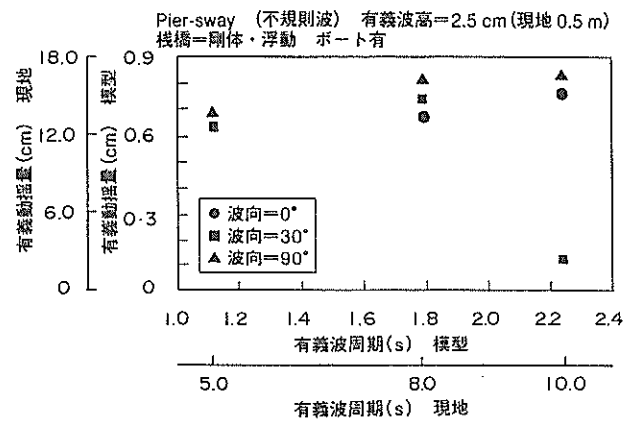
(1) サージ (規則波)



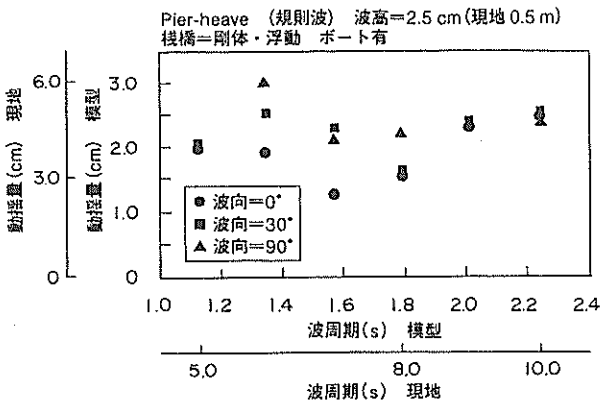
(2) サージ (不規則波)



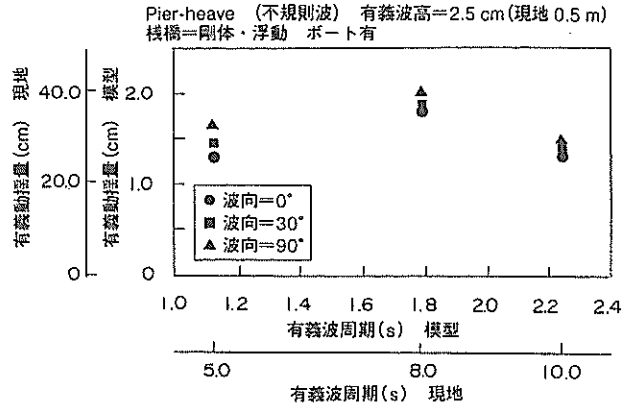
(3) スウェイ (規則波)



(4) スウェイ (不規則波)



(5) ヒープ (規則波)



(6) ヒープ (不規則波)

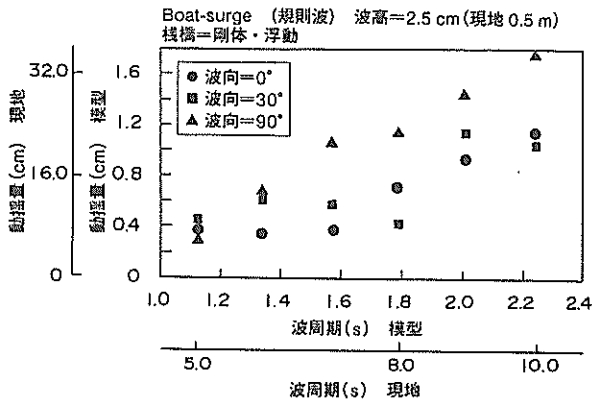
図-6 浮栈橋の動揺の波向による影響 (栈橋: 剛体, 浮動, ポート: 係留)

規則波中については波周期によって動揺量の変化が大きく、波向に対する影響は明確に把握できない。

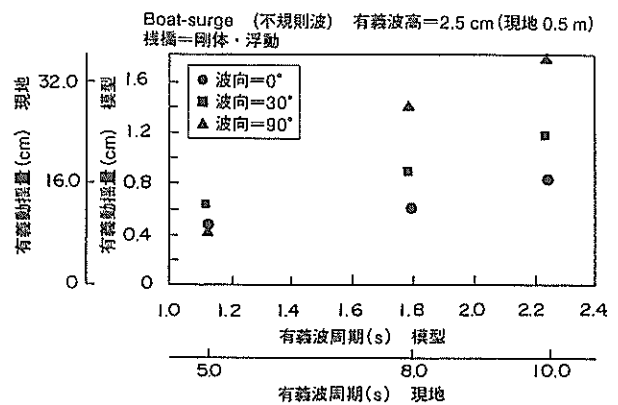
図-7(1)~(8)は、プレジャーボートの動揺6成分のうち、サージ、スウェイ、ヒープ、ロールについて波高2.5 cmの規則波中および不規則波中の動揺量を示している。

同一図面に波向0°, 30°, 90°の実験結果を示している。

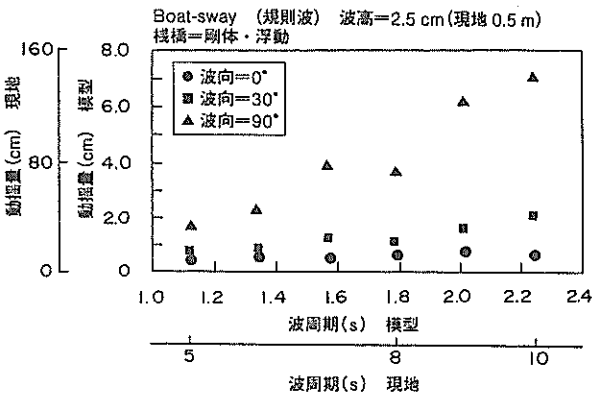
図-7(1)~(2)に示すようにプレジャーボートのサージは、波高に対して0.2~0.7倍であり、前出の浮栈橋のサージに比べて大きい。また、波向0°よりも横波中(90°)において動揺振幅が大きくなっているが、これは、プレ



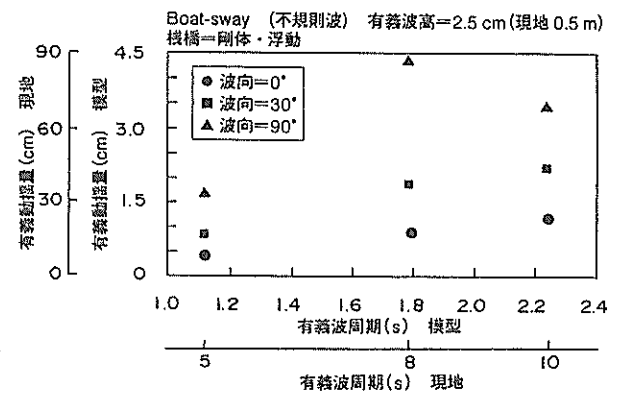
(1) サージ (規則波)



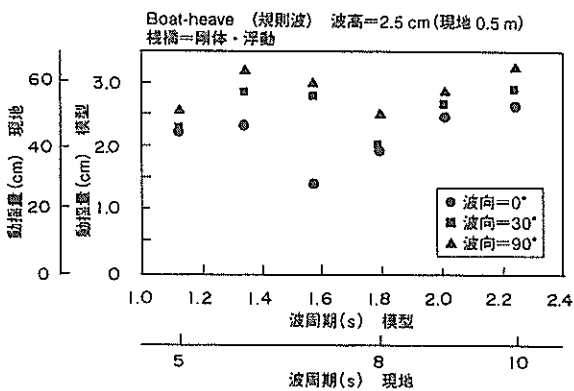
(2) サージ (不規則波)



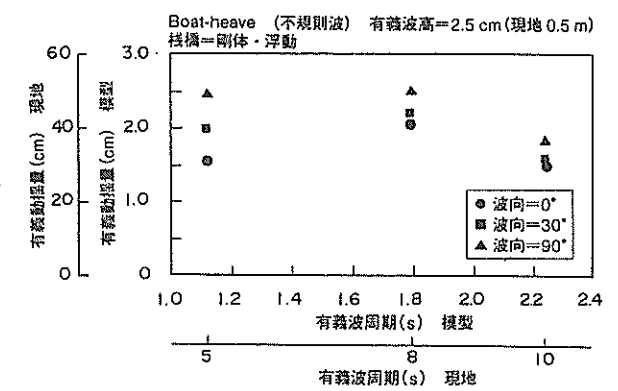
(3) スウェイ (規則波)



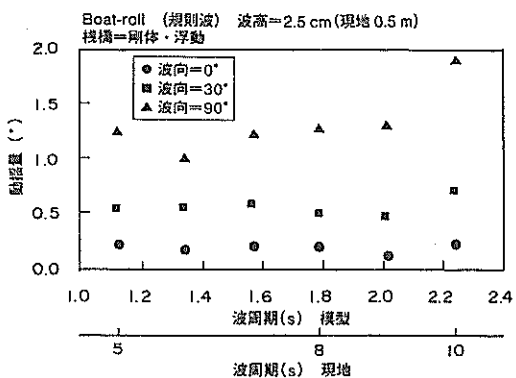
(4) スウェイ (不規則波)



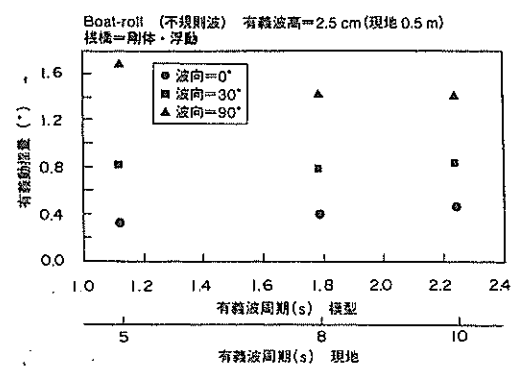
(5) ヒープ (規則波)



(6) ヒープ (不規則波)



(7) ロール (規則波)



(8) ロール (不規則波)

図-7 プレジャーボートの動揺の波向による影響 (栈橋:剛体, 浮動, ボート:係留)

ジャーボートのスウェイが大きくなることにより浮棧橋とプレジャーボート間の連結力（係留ばねの張力）が大きくなり、その影響を受けてプレジャーボートの長軸方向成分についても張力の変動が生じ、これに伴ってサージの動揺振幅も大きくなっているものと考えられる。図-7(3)~(4)に示すようにプレジャーボートのスウェイは、波高に対して0.2~3.0倍であり、波向および波周期に対して動揺量の変化が大きいことがわかる。とくに、波高および波周期に対して動揺量の変化が大きいことが分かる。とくに、波向が90°で、かつ波周期が長いときに、プレジャーボートの動揺量が大きくなることがわかる。図-7(5)~(6)に示すようにプレジャーボートのヒープは、波高に対して0.6~1.3倍であり、特に横波中(90°)で大きい。図-7(7)~(8)に示すようにプレジャーボートのロールは、スウェイと同様に横波中で大きい。したがって、横波を受ける条件に対しては、スウェイおよびロールの影響を考慮して、船体と浮棧橋との間の緩衝材（防舷材）

等を設置するなどプレジャーボートの船体側面の保護に配慮する必要がある。

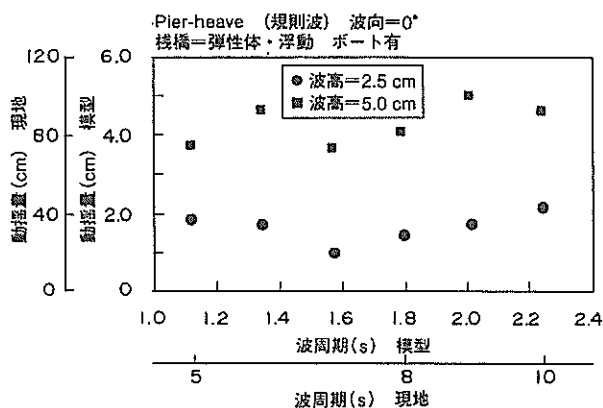
(3) 波高の影響

図-8(1)~(2)は、浮棧橋のヒープについて規則波中および不規則波中の動揺量を示している。同一図面に波高2.5cmと5.0cmの実験結果を示している。ただし、棧橋の剛性は“弾性体”モデルであり、浮棧橋の固定条件は“浮動”である。また、波向は0°であり、浮棧橋にはプレジャーボートが係留されている。浮棧橋のヒープの動揺量は、おおむね波高に比例していることがわかる。

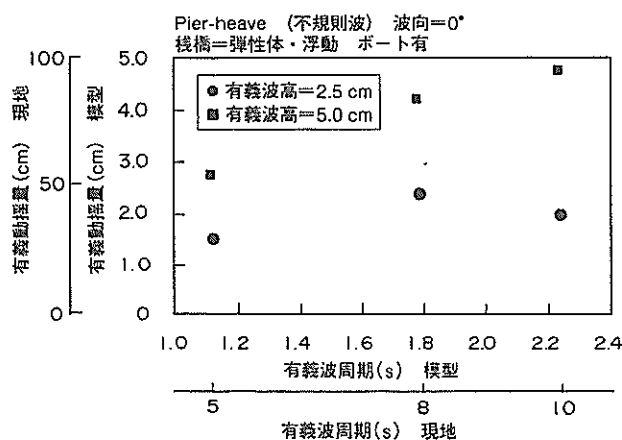
図-9(1)~(2)は、プレジャーボートのヒープについて規則波中および不規則波中の動揺量を示している。同一図面に波高2.5cmと5.0cmの実験結果を示している。実験条件は図-8と同一である。プレジャーボートのヒープの動揺量についても、おおむね波高に比例している。

(4) 棧橋剛性の影響

ここでは、棧橋剛性の影響について、浮棧橋にプレジ

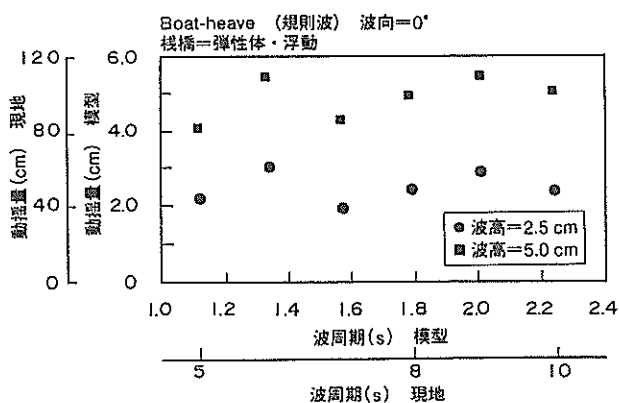


(1) ヒープ (規則波)

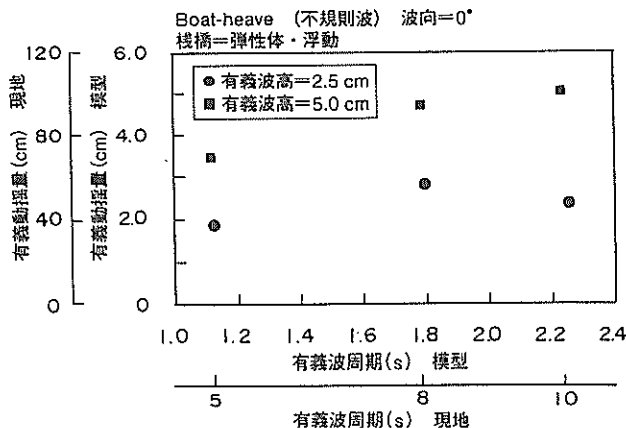


(2) ヒープ (不規則波)

図-8 浮棧橋の動揺の波向による影響 (棧橋：弾性体，浮動，ポート：係留)



(1) ヒープ (規則波)



(2) ヒープ (不規則波)

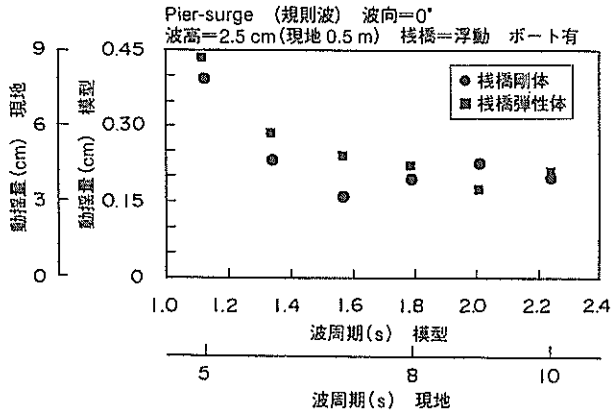
図-9 プレジャーボートの動揺の波向による影響 (棧橋：弾性体，浮動，ポート：係留)

ャーボートが係留されている状態における浮棧橋およびプレジャーボートの動揺量を示す。

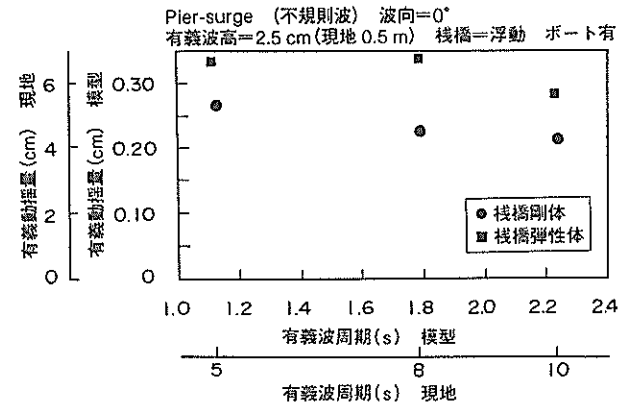
図-10(1)~(6)は、浮棧橋のサージ、スウェイ、ヒープの3成分について波高 2.5cmの規則波中および不規則波中の動揺量を示している。同一図面に浮棧橋が”剛体”であるときと”弾性体”であるときの実験結果を示して

いる。ただし、浮棧橋の固定条件は”浮動”であり、波向は 0° である。

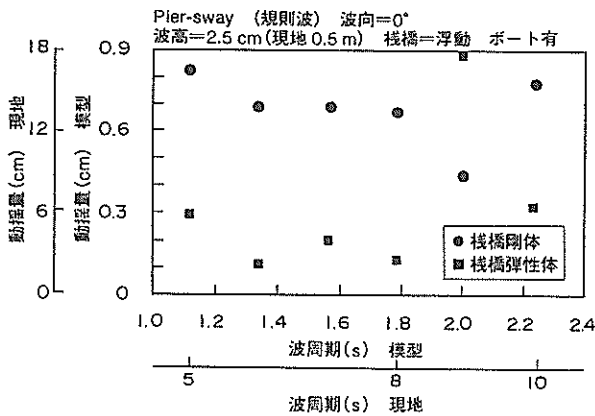
図-10(1)~(2)は、浮棧橋のサージについて棧橋剛性の影響を示す。浮棧橋の動揺量自体は、係留ばねによって拘束されているため、波高に対して0.1~0.15倍と小さいが、浮棧橋が弾性体であるときの方が動揺振幅はやや大



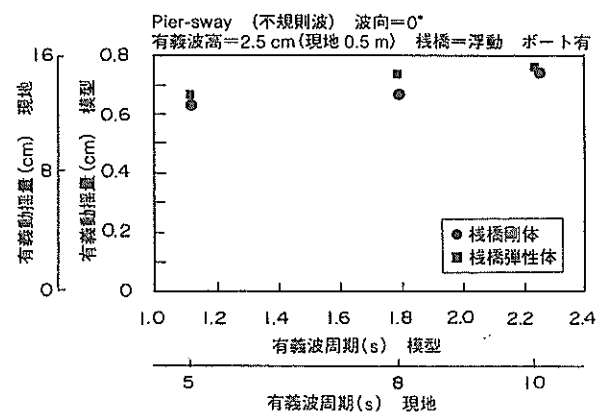
(1) サージ (規則波)



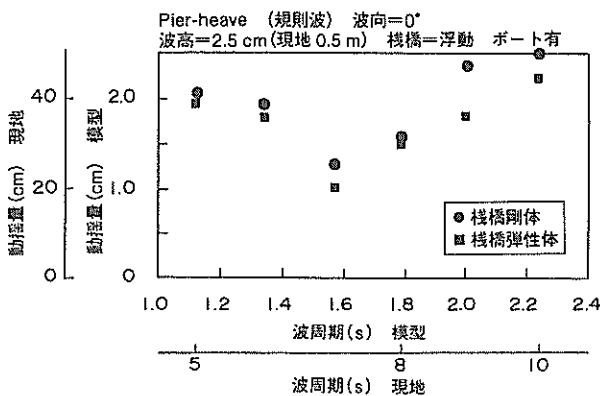
(2) サージ (不規則波)



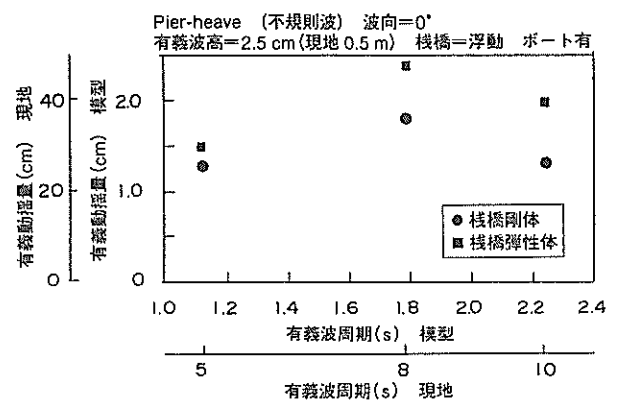
(3) スウェイ (規則波)



(4) スウェイ (不規則波)



(5) ヒープ (規則波)



(6) ヒープ (不規則波)

図-10 浮棧橋の動揺の棧橋剛性による影響 (棧橋：浮動, ポート：係留)

きい。図-10(3)~(4)は、浮棧橋のスウェイについて棧橋剛性の影響を示す。この場合も波向が 0° であるため、浮棧橋の動揺量は波高に対して0.2~0.3倍とあまり大きくなく、また、不規則波中では浮棧橋が剛体であるときと弾性体であるときとの動揺量の相違は大きくない。規則波中では棧橋が剛体であるときの動揺量が弾性体であるときの値と比較して大きい。規則波中と不規則波中の動揺特性の差異の原因は定かではないが、波向が 0° であるため、棧橋の動揺量自体はそれほど大きくない。図-10(5)~(6)は、浮棧橋のヒープについて棧橋剛性の影響を示す。ヒープについては不規則波中において棧橋の剛性の影響が動揺量に対して生じており、浮棧橋が弾性体である方が動揺振幅が大きくなる。

図-11(1)~(8)は、プレジャーボートの動揺6成分のうち、サージ、スウェイ、ヒープ、ロールについて波高2.5cmの規則波中および不規則波中の動揺量を示している。同一図面に浮棧橋が剛体であるときと弾性体であるときの実験結果を対比して示している。ただし、これらの図における波向は図-10と同じ 0° である。

図-11(1)~(2)に示すようにプレジャーボートのサージは、波高に対して0.2~0.5倍である。長周期側では、浮棧橋が剛体であるときの方がプレジャーボートのサージが大きく、浮棧橋自体の傾向とは逆になっている。図-11(3)~(4)に示すようにプレジャーボートのスウェイは、波高に対して0.1~0.5倍である。浮棧橋が剛体であるときの方がプレジャーボートのスウェイが大きくなっているが、これは規則波中では浮棧橋の動揺と同じ傾向になっている。図-11(5)~(6)に示すようにプレジャーボートのヒープは、波高に対して0.6~1.0倍である。プレジャーボートのヒープは、浮棧橋本体と同じく、棧橋が弾性体のときに大きい。図-11(7)~(8)に示すようにプレジャーボートのロールは、不規則波中で周期が長いとき、かつ浮棧橋が剛体のときにやや動揺振幅が大きい傾向がみられる。

以上のことから、プレジャーボートの動揺は、浮棧橋の剛性の影響を受けるが、水理模型実験の範囲においては、サージ、スウェイ、ロールについては、浮棧橋が剛体であるときに動揺量が大きく、ヒープについては、浮棧橋が弾性体であるときに動揺が大きい傾向がみられた。

(5) 棧橋固定条件の影響

ここでは、浮棧橋の固定条件の影響について、浮棧橋にプレジャーボートが係留されている状態における浮棧橋およびプレジャーボートの動揺量を示す。ただし、ここで示す条件は波向が 90° のときのものである。

図-12(1)~(2)は、浮棧橋のヒープについて波高2.5cm

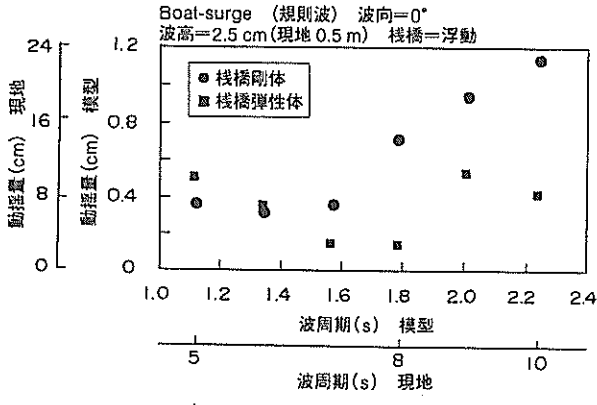
の規則波中および不規則波中の動揺量を示している。同一図面に棧橋が”固定”であるとき、および”浮動”であるときの実験結果を示している。ただし、棧橋の剛性条件は”剛体”である。これらの図より、”固定”状態の実験においては、模型棧橋の上下方向の運動を拘束したが、結果的には、浮棧橋の中央部においては、上下方向の動揺量を約半分にする程度の拘束しかできなかったことがわかる。なお、浮棧橋の長軸方向の変位の分布については計測していないので、浮棧橋の両端において、どの程度の上変位が生じていたかについては、明らかではない。しかしながら、ここで示した実験条件は浮棧橋を剛体としたモデルであり、しかも、波向が 90° であることから、浮体の上下方向運動に対するピッチの影響は小さいので浮棧橋の中央部と両端における上下変位はほぼ同じ値であると考えられる。

図-13(1)~(8)は、プレジャーボートの動揺6成分のうち、サージ、スウェイ、ヒープ、ロールについて波高2.5cmの規則波中および不規則波中の動揺を示している。同一図面に棧橋が固定であるとき（現実には先に示したように半拘束状態）と浮動であるときの実験結果を示している。

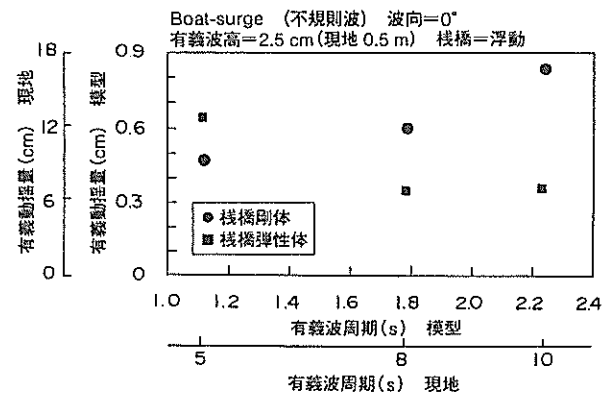
図-13(1)~(2)に示すようにプレジャーボートのサージの動揺量は、ここで示した条件においては波向がボートの側面から入射する 90° であることから、波高に対して0.2~0.6倍程度にとどまる。また、棧橋の固定条件がプレジャーボートのサージの動揺量に及ぼす影響はそれほど大きくない。図-13(3)~(4)に示すようにプレジャーボートのスウェイは、ここでは、波の作用がボートの側面方向からであるので、波高に対して0.5~2.8倍と大きくなる。また、棧橋が浮動であるときの方がプレジャーボートのスウェイの動揺量はやや大きくなっている。つぎに、図-13(5)~(6)に示すようにプレジャーボートのヒープの動揺量は波高とおおむね等しい。また、その動揺量は棧橋本体の拘束条件に対してあまり大きな影響がみられない。

図-13(7)~(8)に示すようにプレジャーボートのロールは、棧橋が固定であるときよりも浮動であるときに動揺振幅がやや大きい傾向がみられる。

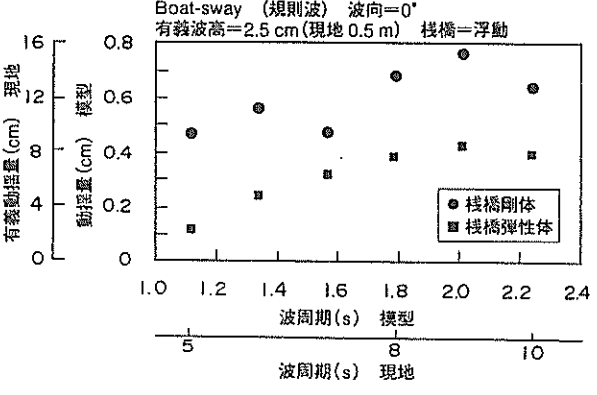
以上のことから、棧橋の固定条件は、プレジャーボートのヒープに対しては、あまり影響を及ぼさないが、スウェイおよびロールは、棧橋が浮動状態の方が相対的に動揺量が大きくなる傾向がみられた。このことから、浮棧橋とプレジャーボートのように浮体が並列して複数個存在することの影響は、とくに、スウェイおよびロールについて考慮すればよいと思われる。



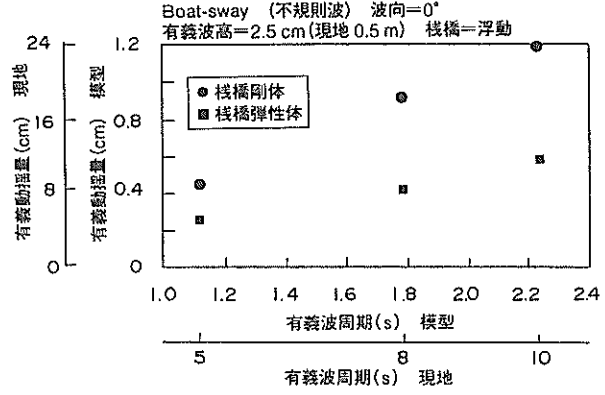
(1) サージ (規則波)



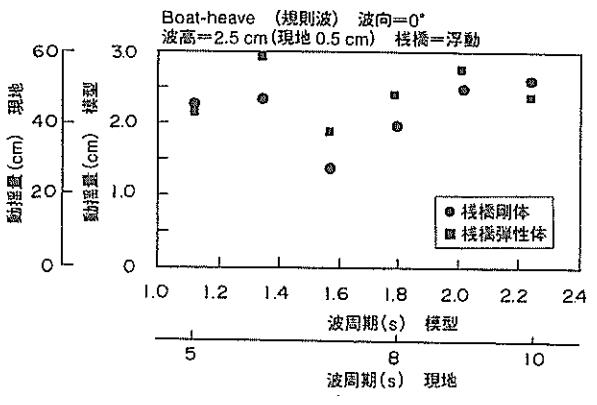
(2) サージ (不規則波)



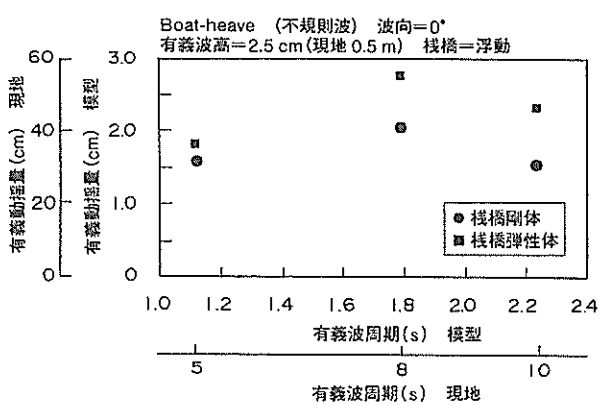
(3) スウェイ (規則波)



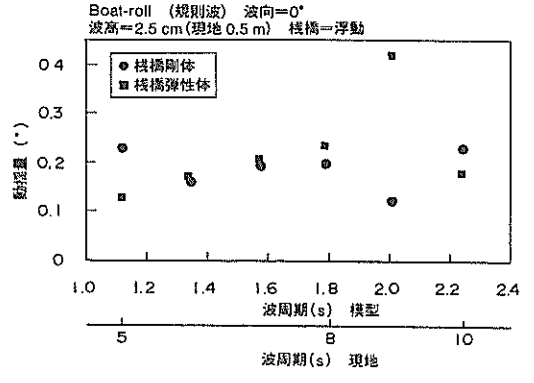
(4) スウェイ (不規則波)



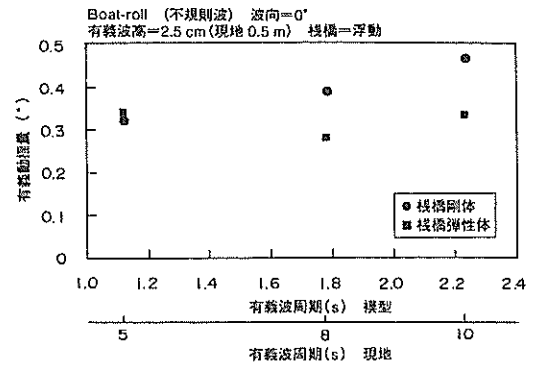
(5) ヒープ (規則波)



(6) ヒープ (不規則波)

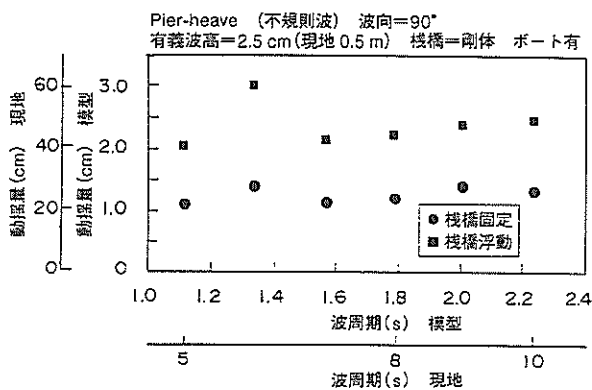


(7) ロール (規則波)

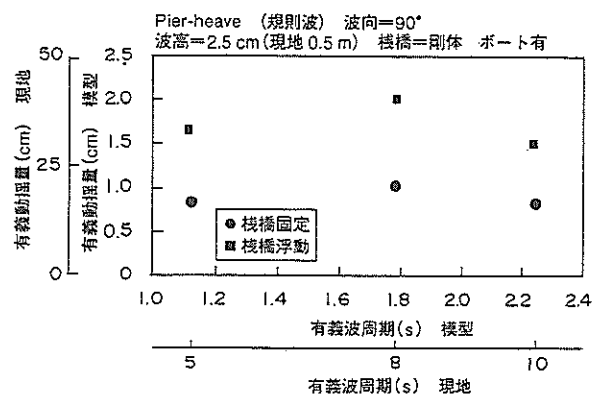


(8) ロール (不規則波)

図-11 プレジャーボートの動揺の栈橋剛性による影響 (栈橋：浮動, ボート：係留)



(1) ヒープ (規則波)



(2) ヒープ (不規則波)

図-12 棧橋の動揺の棧橋拘束条件による影響 (棧橋:剛体, ポート:係留)

(6) プレジャーボートの係留の有無の影響

ここでは、プレジャーボートの係留の有無が浮棧橋の動揺に及ぼす影響について検討する。図-14(1)~(12)は、浮棧橋の動揺6成分のうち、サージ、スウェイ、ヒープについて波向0° および90° のときの波高2.5cmの規則波中および不規則波中の動揺量を示している。同一図面にプレジャーボートが係留されているとき (ポート有) と係留されていないとき (ポート無) の実験結果を示している。図-14(1)~(4)に示すように浮棧橋のサージの動揺量は、波高に対して0.1~0.25倍程度であり、浮棧橋が係留ばねで拘束されているためあまり大きくない。プレジャーボートの係留の有無は、波向0° および90° の条件の双方とも浮棧橋のサージの動揺に対してあまり影響していない。図-14(5)~(8)に示すように浮棧橋のスウェイの動揺量についても、浮棧橋が係留ばねで拘束されているため波高に対して0.1~0.5倍とあまり大きくない。また全体的な傾向としては、プレジャーボートが係留されていないときの方がスウェイが大きい。しかしながら、規則波中の動揺特性を見ると、その傾向が一部逆転しているところもあり、全体としては、浮棧橋に波浪のみが作用する条件では、プレジャーボートの係留の有無は、浮棧橋の動揺に対しては顕著に影響していないと考えられる。ただし、風荷重が作用する条件については今回は水理模型実験を行っていないが、一般にプレジャーボートに作用する風圧力は浮棧橋のサージおよびスウェイの動揺および係留力に影響すると考えられるので、強風条件における検討ではプレジャーボートが係留されている影響を考慮しなければならない。図-14(9)~(12)に示すように、浮棧橋のヒープの動揺量は、波向0° および90° の双方ともプレジャーボートの係留の有無に対しては、あ

まり大きな相違はみられない。

(7) 単棧橋における水理模型実験結果のまとめ
以上示した単棧橋における水理模型実験の結果をとりまとめる。

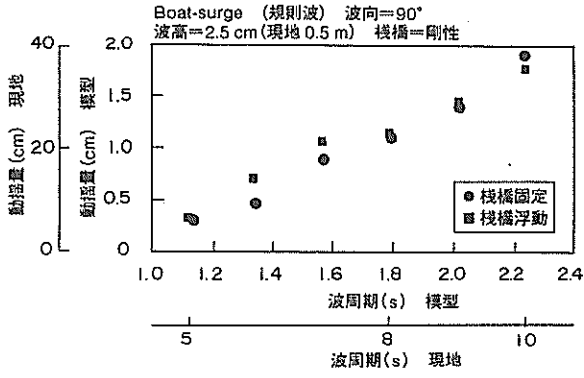
①プレジャーボートの動揺は波向90° (横波) において、スウェイおよびロールの動揺が顕著になる。したがって、プレジャーボートに入射する波が、このような条件の際には、ポートと浮棧橋間の緩衝材 (防舷材等) の設置に配慮することが必要となる。

②水理模型実験を実施した条件の範囲においては、波高と浮棧橋およびプレジャーボートの動揺量との間には、ほぼ比例関係が見られた。

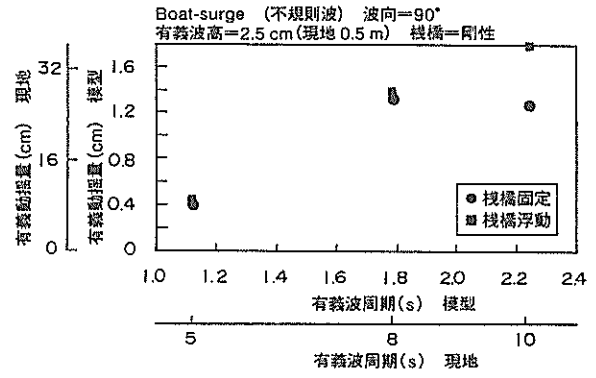
③プレジャーボートの動揺は、浮棧橋の曲げ剛性の影響を受けるが、サージ、スウェイおよびロールについては、浮棧橋が剛体である方が動揺量が大きく、ヒープについては、浮棧橋が弾性体である方が動揺量が大きい。

④棧橋の固定条件は、プレジャーボートのヒープに対しては、あまり影響を及ぼさないが、スウェイおよびロールは、棧橋が浮動状態の方が相対的に動揺量が大きくなる傾向がみられた。このことから、浮体が浮棧橋とプレジャーボートのように並列して複数存在することの影響は、とくに、スウェイおよびロールについて注目すればよいと思われる。

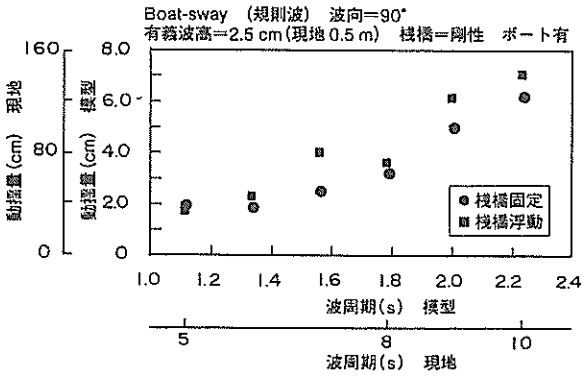
⑤単棧橋に波浪のみが作用する条件では、プレジャーボートの係留の有無は浮棧橋の動揺量に対しては、それほど大きな影響を与えない。



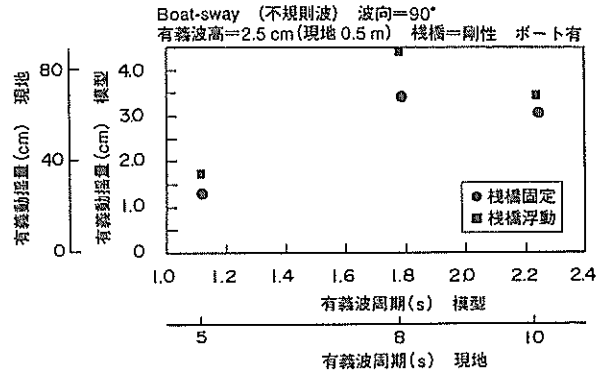
(1) サージ (規則波)



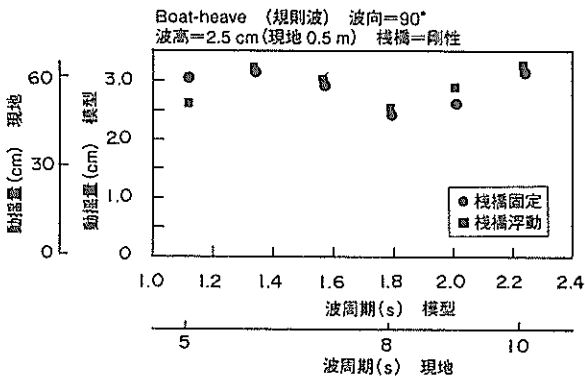
(2) サージ (不規則波)



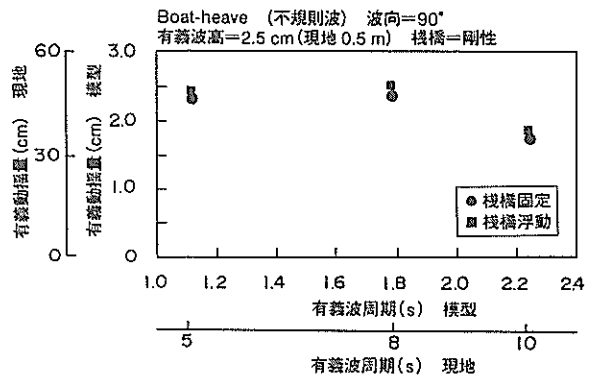
(3) スウェイ (規則波)



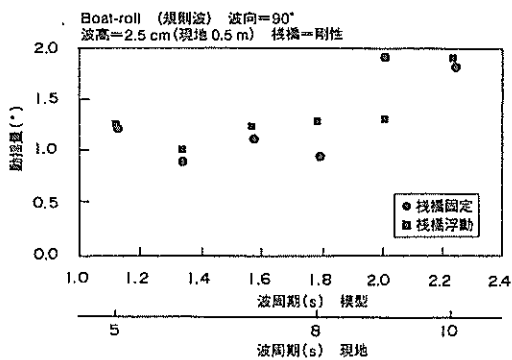
(4) スウェイ (不規則波)



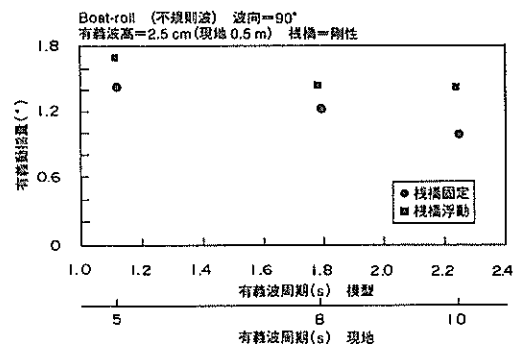
(5) ヒープ (規則波)



(6) ヒープ (不規則波)

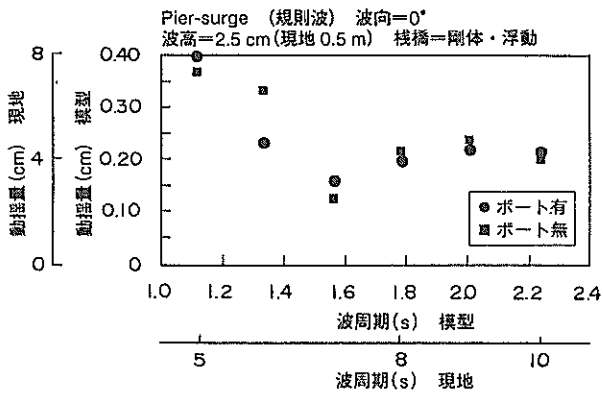


(7) ロール (規則波)

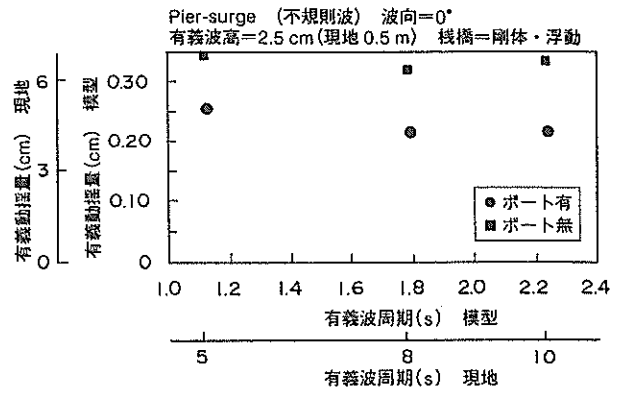


(8) ロール (不規則波)

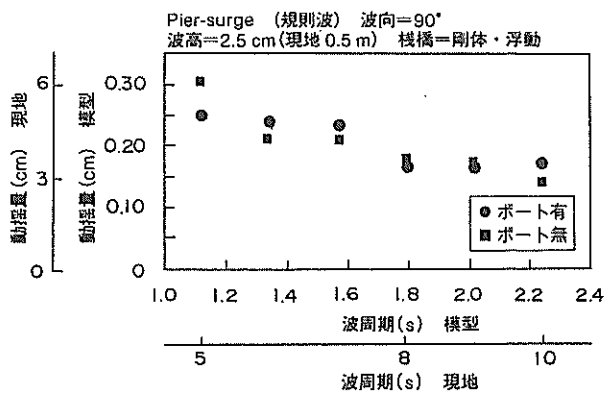
図-13 プレジャーボートの動揺の棧橋固定条件による影響 (棧橋:剛体, ポート:係留)



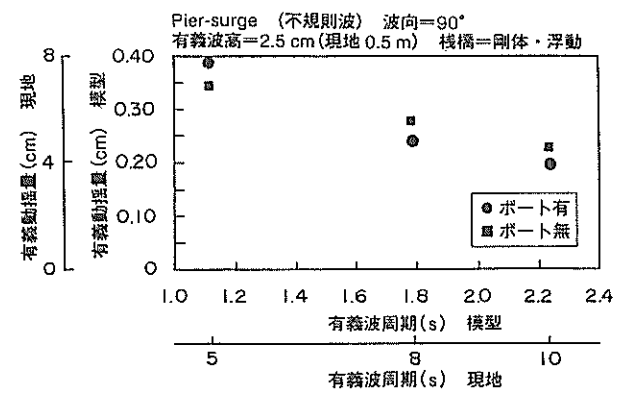
(1) サージ (規則波, 波向0°)



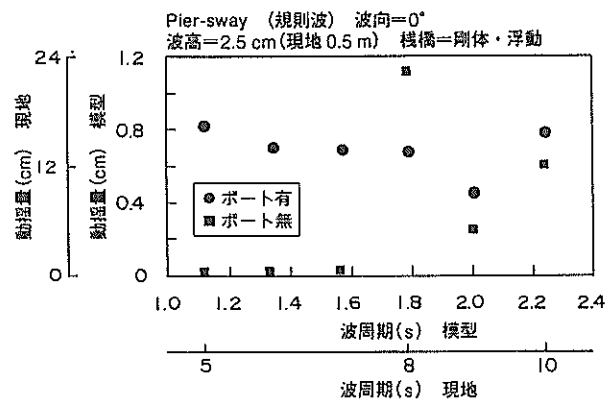
(2) サージ (不規則波, 波向0°)



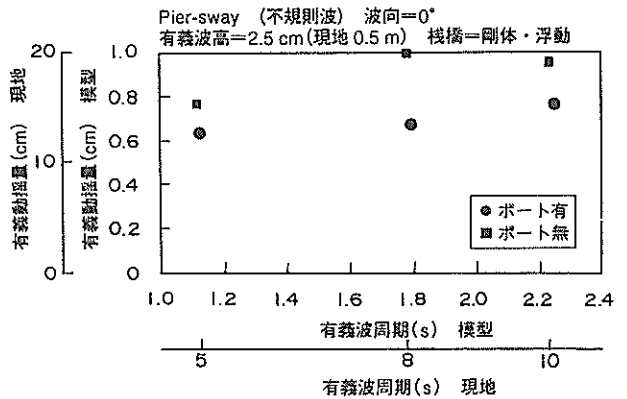
(3) サージ (規則波, 波向90°)



(4) サージ (不規則波, 波向90°)

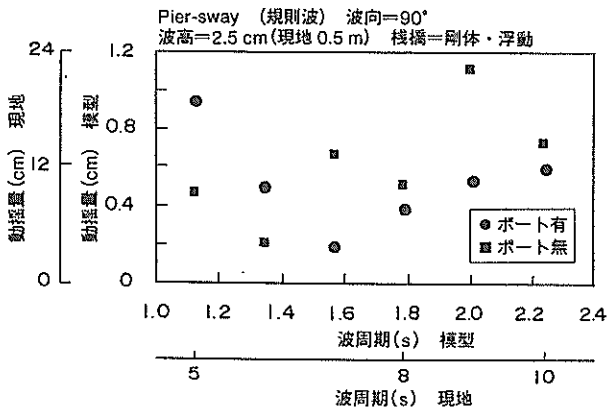


(5) スウェイ (規則波, 波向0°)

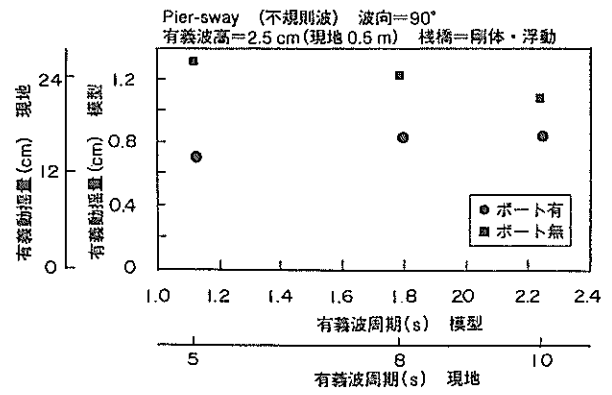


(6) スウェイ (不規則波, 波向0°)

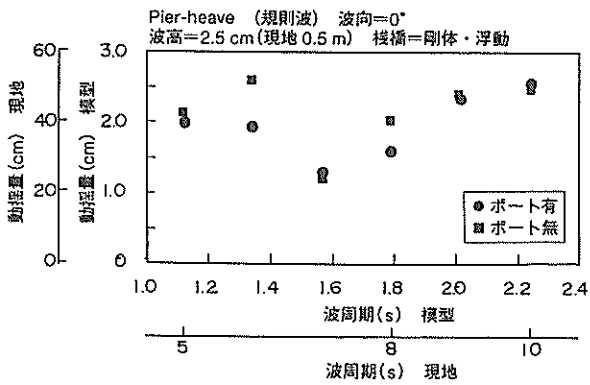
図-14① 栈橋の動揺のプレジャーボートの保留の有無による影響 (栈橋: 剛体)



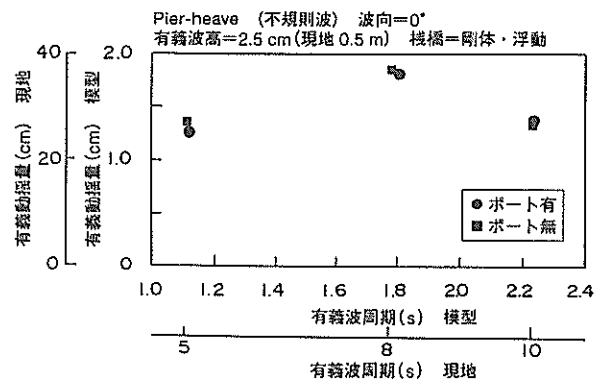
(7) スウェイ (規則波, 波向90°)



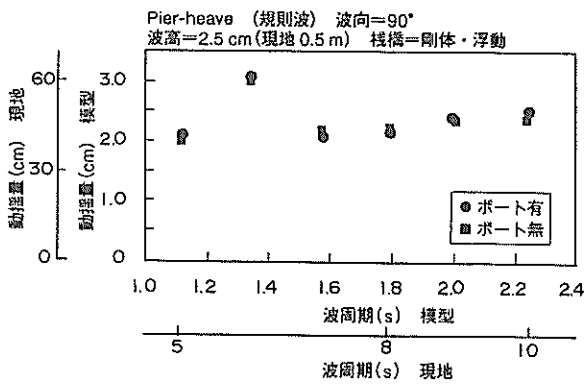
(8) スウェイ (不規則波, 波向90°)



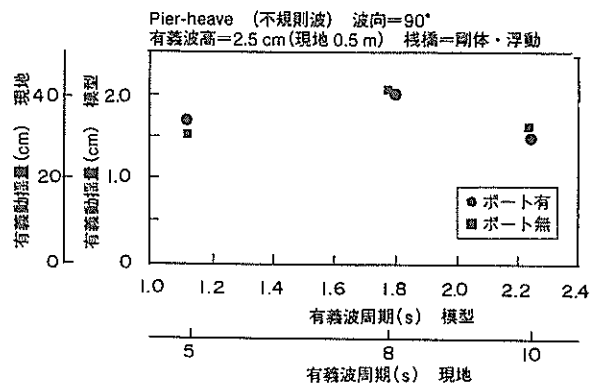
(9) ヒープ (規則波, 波向0°)



(10) ヒープ (不規則波, 波向0°)



(11) ヒープ (規則波, 波向90°)



(12) ヒープ (不規則波, 波向90°)

図-14② 栈橋の動揺のプレジャーボートの係留の有無による影響 (栈橋: 剛体)

3. 2 くし型栈橋およびプレジャーボートの動揺

(1) 水理模型実験の概要

ここでは、くし型栈橋について行った水理模型実験の結果に基づいて以下のパラメーターがくし型栈橋およびプレジャーボートの動揺に及ぼす影響について述べる。

- ・波向の影響
- ・波高の影響
- ・栈橋剛性の影響
- ・プレジャーボートの係留の有無の影響

(2) 波向の影響

まず、波向の影響について、くし型栈橋にプレジャーボートが係留されている状態における浮栈橋およびプレジャーボートの動揺量を示す。

図-15(1)～(6)は、くし型栈橋のサージ、スウェイ、ヒープの3成分について波高2.5cmの規則波中および不規則波中の動揺量を示している。同一図面に波向 0° 、 30° 、 90° の実験結果を示している。ただし、栈橋の剛性は”剛体”モデルである。

図-15(1)～(2)に示すようにくし型栈橋のサージの動揺量は、主栈橋の長軸方向から波が入射する波向 0° および 30° のときに大きく、波高に対して0.5～2.0倍である。また、波周期が長くなるにしたがってサージの動揺量が大きくなる傾向がみられる。図-15(3)～(4)に示すようにくし型栈橋のスウェイの動揺量は、波向が 30° および 90° のときに大きく、波高に対して0.6～2.0倍である。また、サージと同じく波周期が長くなるにしたがって動揺量が大きくなる傾向がみられる。つぎに図-15(5)～(6)に示すようにくし型栈橋のヒープの動揺量は、波向による差異が他の動揺成分に比べると少ない。これは、くし型栈橋が互いに直交する主栈橋と補助栈橋とから構成されていることから、波の方向によらずほぼ同程度の上下方向の波力を受けるからである。

図-16(1)～(6)は、プレジャーボートの動揺6成分のうち、サージ、スウェイ、ヒープについて波高2.5cmの規則波中および不規則波中の動揺量を示している。同一図面に波向 0° 、 30° 、 90° に対する実験結果を示している。ただし、波向は図-3に示したようにくし型栈橋の長軸方向を波向 0° と定義しているため、波向 0° は、プレジャーボートに対して横波となることに注意しなければならない。

図-16(1)～(2)に示すようにプレジャーボートのサージの動揺量は、ボートに対して前後方向の波向となる波向 90° のときの動揺量が大きく、波高に対して1.0～2.0倍である。また、横波中(波向 0°)においても波高に対して0.4倍程度の動揺振幅が生じているが、これは、単栈橋

のところでも説明したように、スウェイが大きくなることにより浮栈橋とプレジャーボートの間に作用する連結力が大きくなり、その影響を受けてサージの動揺が生じているためと考えられる。図-16(3)～(4)に示すようにプレジャーボートのスウェイの動揺量は、波向 0° では、波高に対して2.0～3.0倍であり、かなり大きくなっている。このように、波向がプレジャーボートに対して横波状態であり、かつ波周期が長いときには、スウェイの動揺量が大きくなることから、プレジャーボートと栈橋間の緩衝材(防舷材等)には十分配慮する必要がある。つぎに図-16(5)～(6)に示すようにプレジャーボートのヒープの動揺量は、サージおよびスウェイと比べると波向による相違は小さいことがわかる。

(3) 波高の影響

図-17(1)～(2)は、浮栈橋のヒープについて規則波中および不規則波中の動揺量を示している。なお、同一図面に波高1.5cmと2.5cmの実験結果を示している。ただし、浮栈橋の剛性は”弾性体”モデルである。また、ここで示した条件は波向 0° に対するものであり、プレジャーボートが栈橋に4隻係留されている。この図より浮栈橋の動揺量は、くし型栈橋についても、単栈橋のときと同様に、おおむね波高に比例していることがわかる。

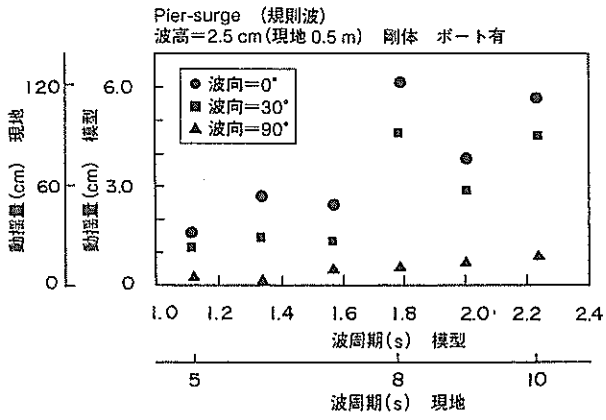
図-18(1)～(2)は、プレジャーボートのヒープについて規則波中および不規則波中の動揺量を示している。なお、同一図面に波高1.5cmと2.5cmの実験結果を示している。実験条件は、図-17と同一である。プレジャーボートの動揺量についても、おおむね波高に比例している。

(4) 栈橋剛性の影響

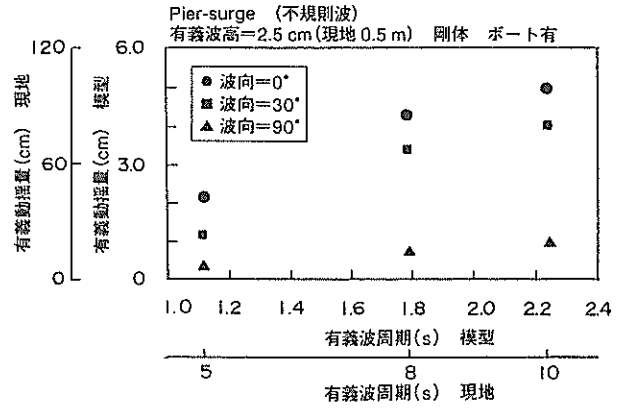
ここでは、栈橋剛性の影響について、くし型栈橋にプレジャーボートが係留されている状態におけるくし型栈橋およびプレジャーボートの動揺量を示す。

図-19(1)～(6)は、くし型栈橋のサージ、スウェイ、ヒープの3成分について波高2.5cmの規則波中および不規則波中の動揺量を示している。同一図面に浮栈橋が”剛体”であるときと”弾性体”であるときの実験結果を示している。ただし、ここで図示した波向は 0° である。

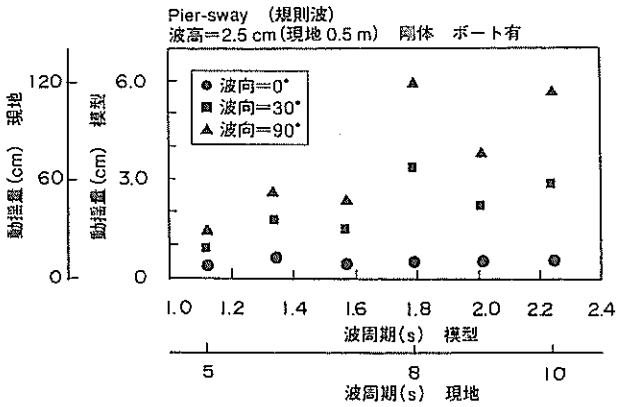
図-19(1)～(2)は、くし型栈橋のサージの動揺量について栈橋剛性の影響を示す。両者の動揺量の相違は他の動揺成分ほどには大きくないが、浮栈橋が剛体である方がサージの動揺量がやや大きい。図-19(3)～(4)は、くし型栈橋のスウェイの動揺量について栈橋剛性の影響を示す。浮栈橋のスウェイの動揺量は、波向が 0° であるため、波高に対して0.2～0.4倍であり、それほど大きくないが、サージと同様に浮栈橋が剛体であるときの方が動揺量が大きい。図-19(5)～(6)は、浮栈橋のヒープの動揺量につ



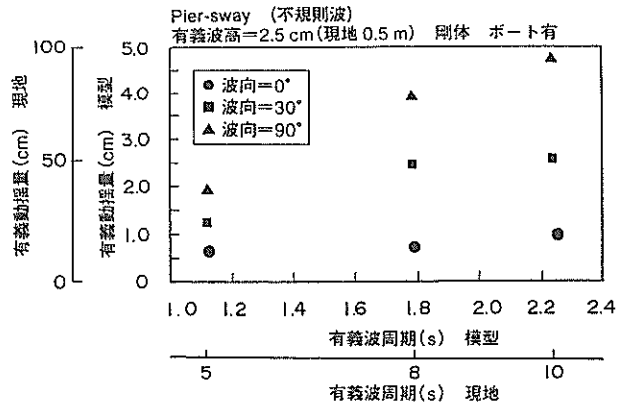
(1) サージ (規則波)



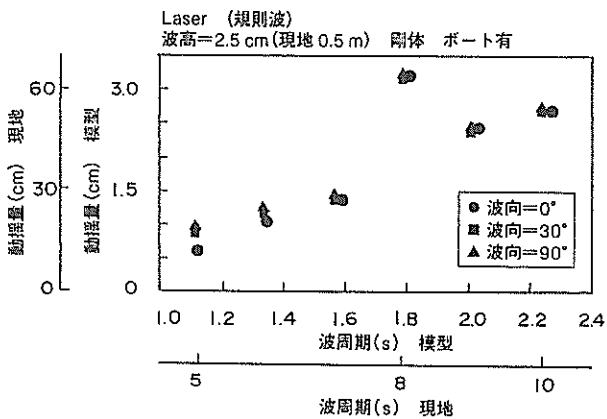
(2) サージ (不規則波)



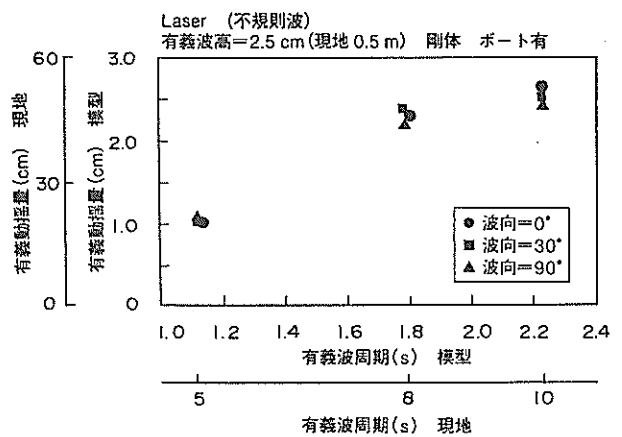
(3) スウェイ (規則波)



(4) スウェイ (不規則波)

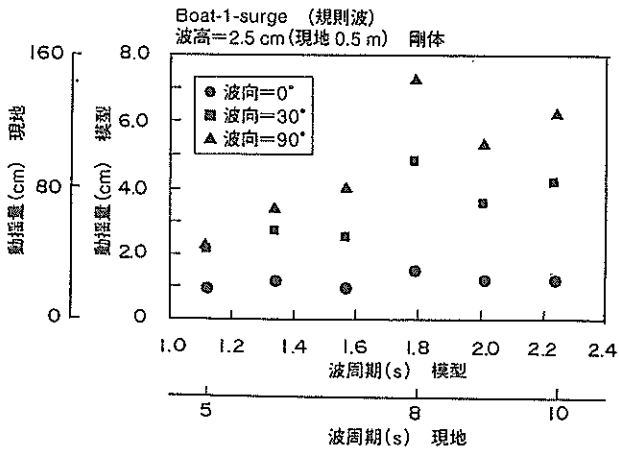


(5) ヒープ (規則波)

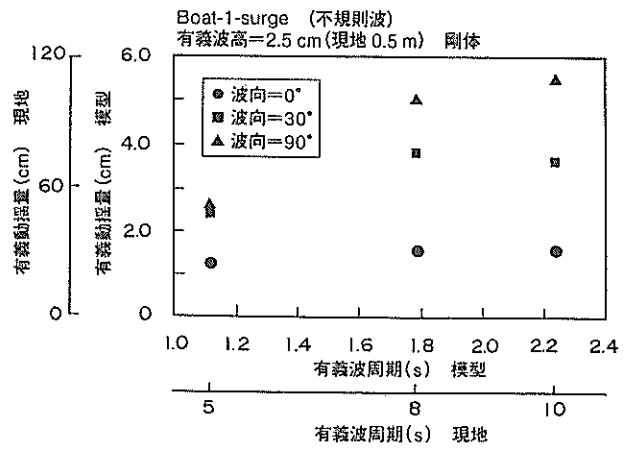


(6) ヒープ (不規則波)

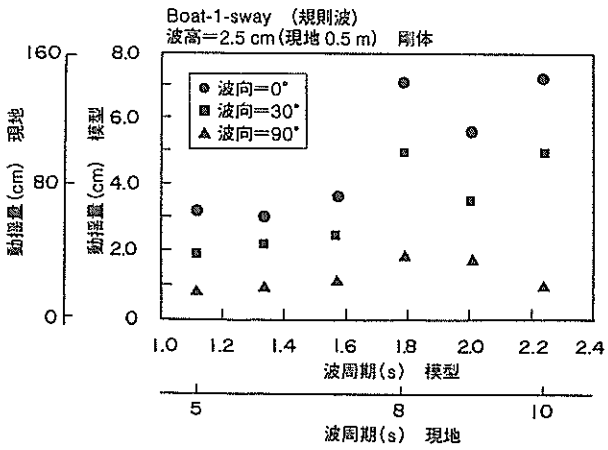
図-15 栈橋の動揺の波向による影響 (栈橋:剛体, ボート:係留)



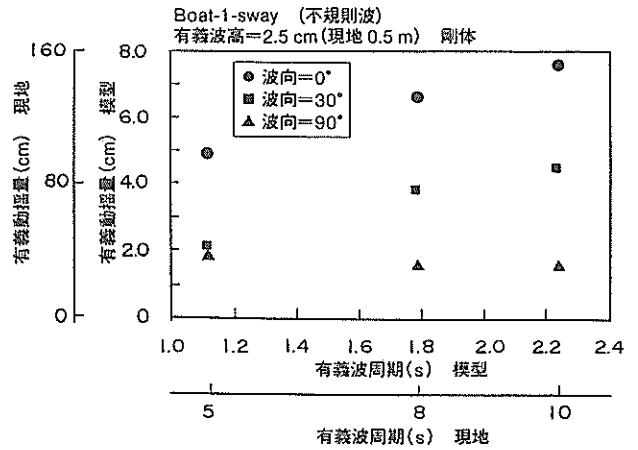
(1) サージ (規則波)



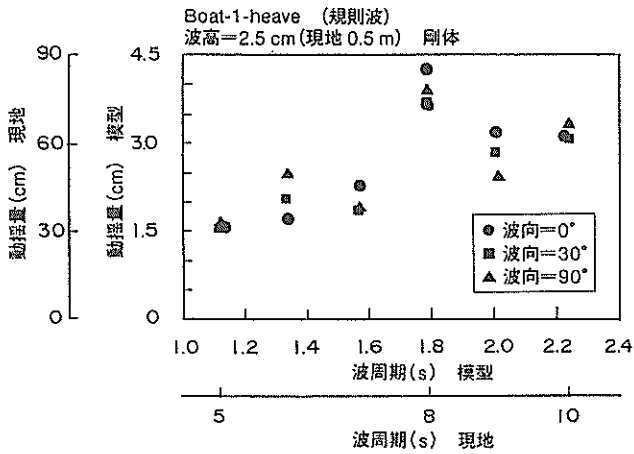
(2) サージ (不規則波)



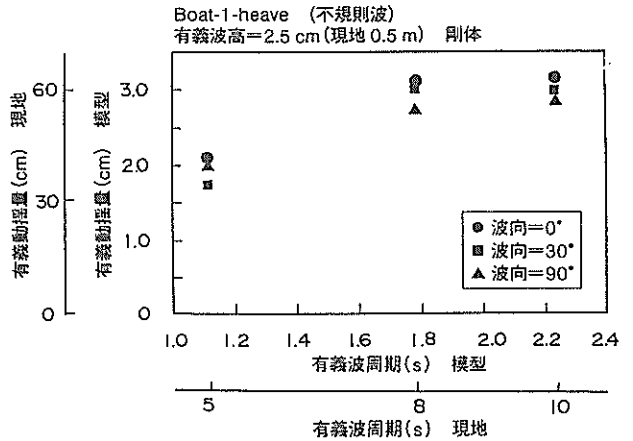
(3) スウェイ (規則波)



(4) スウェイ (不規則波)

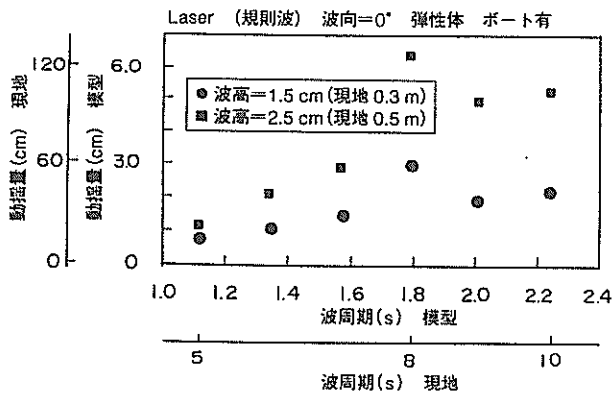


(5) ヒープ (規則波)

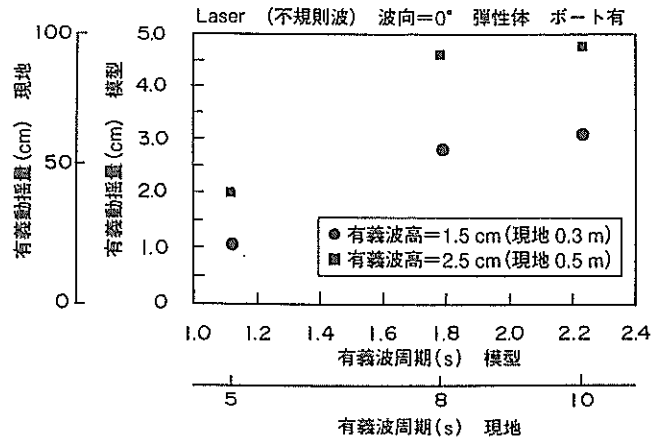


(6) ヒープ (不規則波)

図-16 プレジャーボートの動揺の波向による影響 (栈橋:剛体, 浮動, ボート:保留)

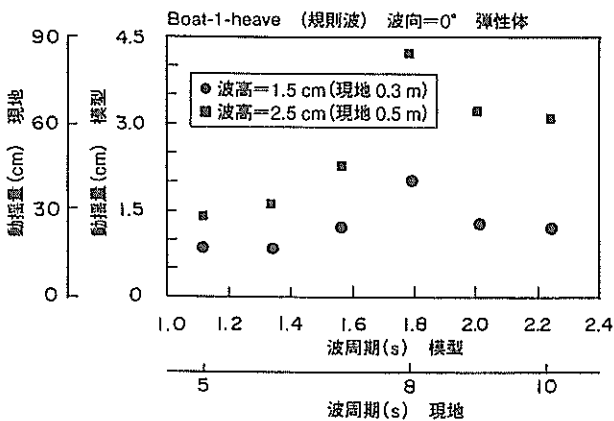


(1) ヒープ (規則波)

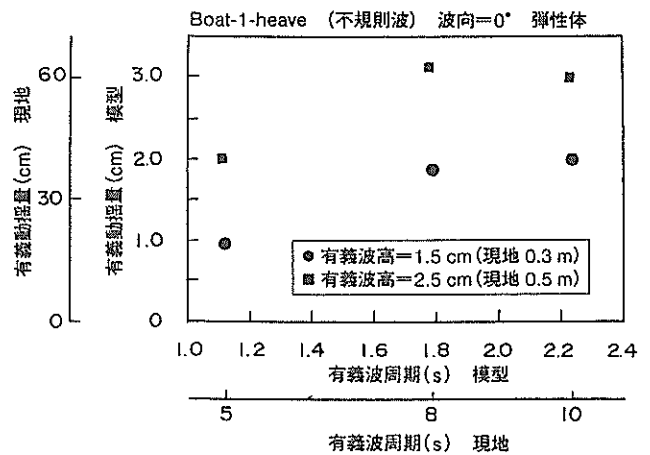


(2) ヒープ (不規則波)

図-17 浮栈橋の動揺の波高による影響 (栈橋：弾性体，ボート：係留)



(1) ヒープ (規則波)



(2) ヒープ (不規則波)

図-18 プレジャーボートの動揺の波高による影響 (栈橋：弾性体，ボート：係留)

いて栈橋剛性の影響を示す。ヒープについては浮栈橋の剛性の影響が動揺量に顕著に影響しており、浮栈橋が弾性体である方が動揺振幅が大きくなる。この傾向は、単栈橋のときと同様であるが、くし型栈橋の水理模型実験に用いた栈橋長 (172.0cm) は単栈橋のとき (75.0cm) のそれよりも長いので、浮栈橋の剛性の相違による動揺量の差異は単栈橋のときよりもさらに顕著になっている。

図-20(1)~(6)は、プレジャーボートの動揺6成分のうち、サージ、スウェイ、ヒープについて規則波中および不規則波中の動揺量を示している。同一図面に浮栈橋が剛体であるときと弾性体であるときの実験結果を示している。

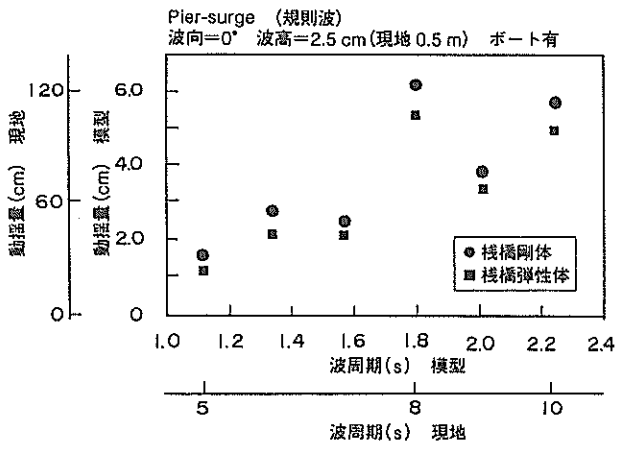
図-20(1)~(2)に示すようにプレジャーボートのサージの動揺量は、波高に対して0.2~0.6倍である。浮栈橋が剛体であるときの方がプレジャーボートのサージが大きい、この傾向は単栈橋と同様である。図-20(3)~(4)に示すようにプレジャーボートのスウェイの動揺量は、

この条件では船体に対して横波状態となるため波高に対して1.0~3.0倍と大きくなっている。また、浮栈橋が剛体であるときの方がプレジャーボートのスウェイの動揺量が大きくなる傾向にあるが、この傾向はサージと同様で、かつ単栈橋のときと同じ傾向になっている。つぎに図-20(5)~(6)に示すようにプレジャーボートのヒープは、波高に対して0.8~1.2倍である。また、この図よりプレジャーボートのヒープは、栈橋本体の剛性の影響をあまり受けていないことがわかる。

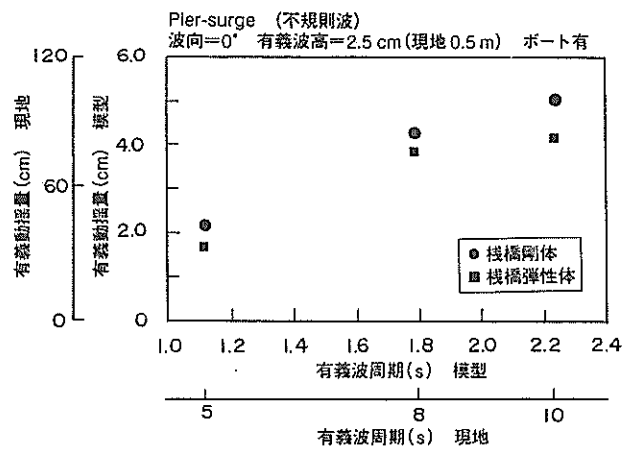
(5) プレジャーボートの係留の有無の影響

ここでは、プレジャーボートの係留の有無が浮栈橋の動揺に及ぼす影響について検討する。ただし、ここでは浮栈橋が“剛体”であるときの実験結果を示している。

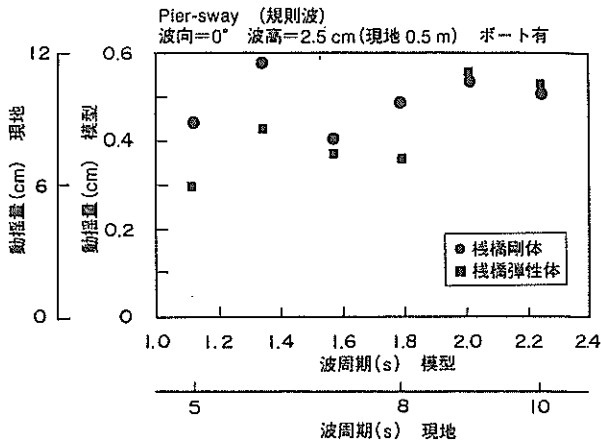
図-21(1)~(6)は、くし型栈橋の動揺6成分のうち、サージ、スウェイ、ヒープについて波高2.5cmの規則波中および不規則波中の動揺量を示している。ただし、ここで図示した波向は0°である。



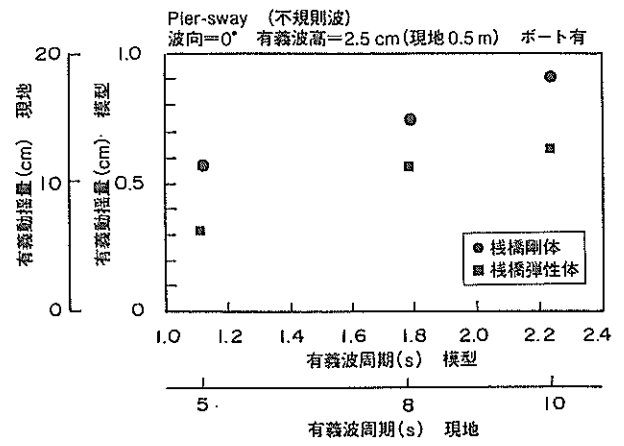
(1) サージ (規則波)



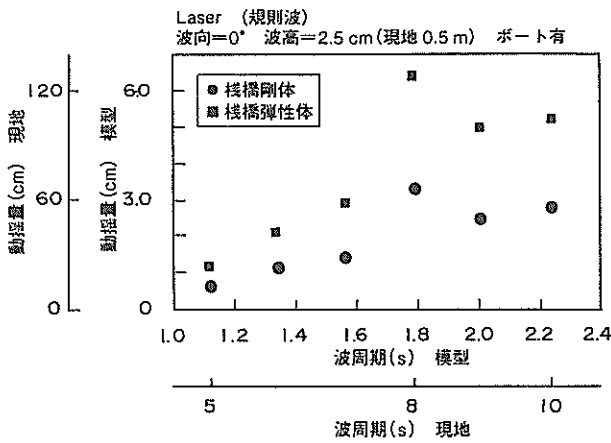
(2) サージ (不規則波)



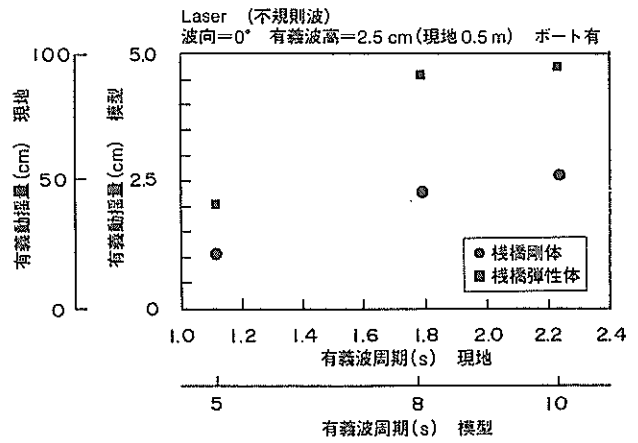
(3) スウェイ (規則波)



(4) スウェイ (不規則波)

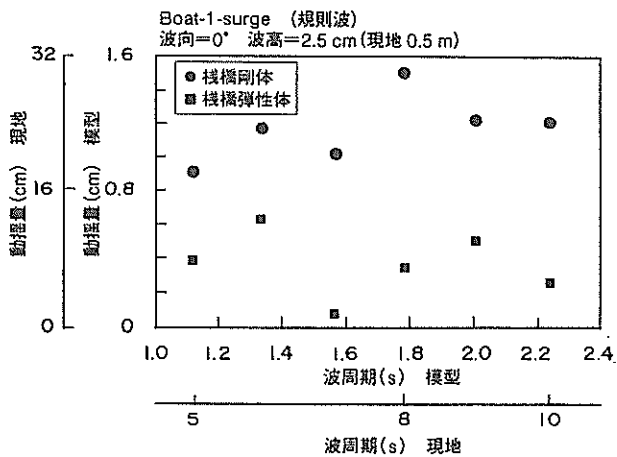


(5) ヒープ (規則波)

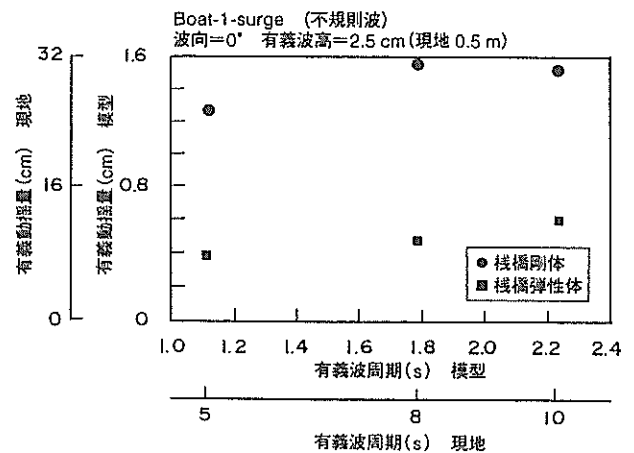


(6) ヒープ (不規則波)

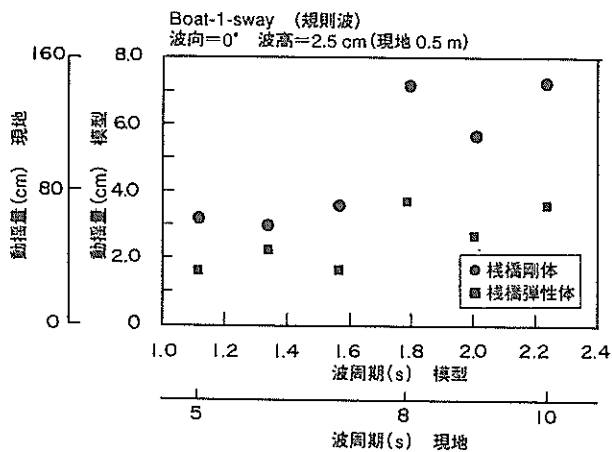
図一十九 浮棧橋の動揺の棧橋剛性による影響 (ボート: 保留)



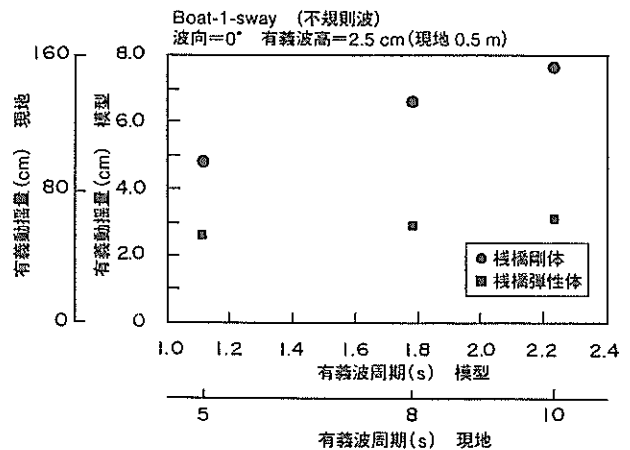
(1) サージ (規則波)



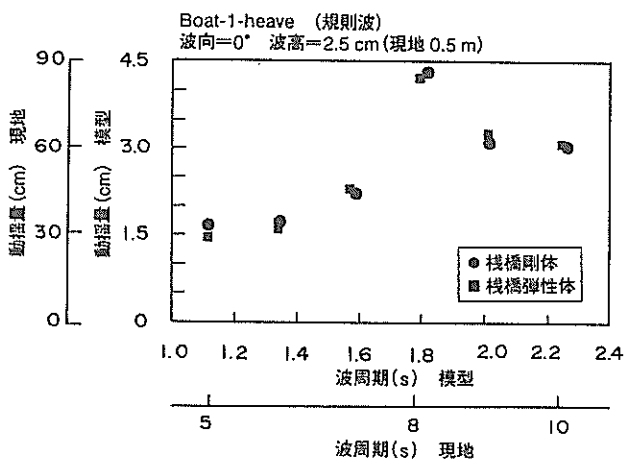
(2) サージ (不規則波)



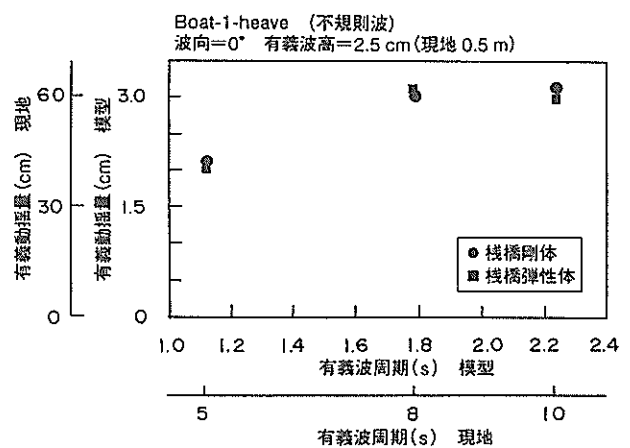
(3) スウェイ (規則波)



(4) スウェイ (不規則波)

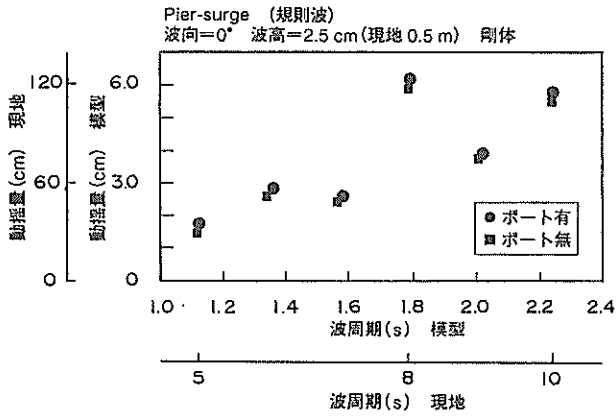


(5) ヒープ (規則波)

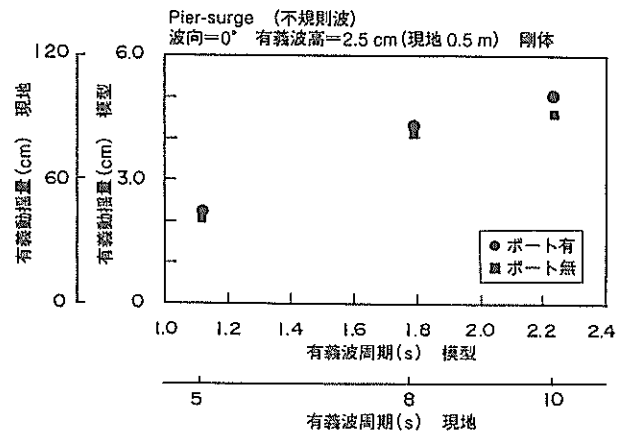


(6) ヒープ (不規則波)

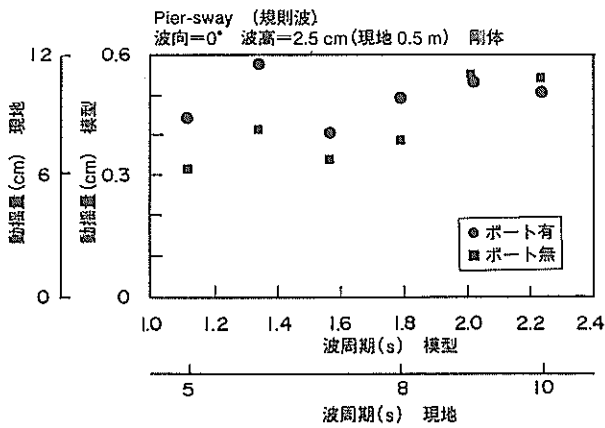
図-20 プレジャーボートの動揺の栈橋剛性による影響 (ボート:係留)



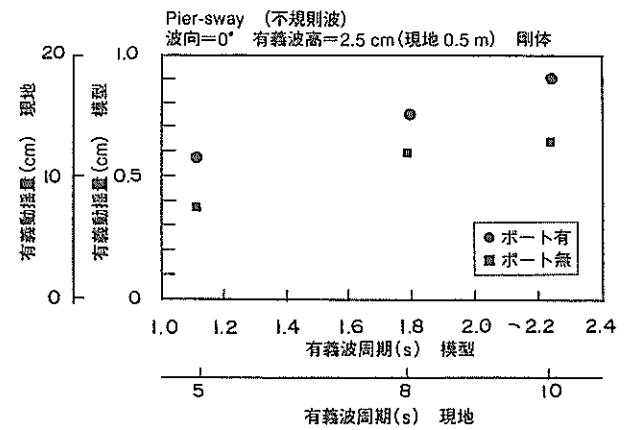
(1) サージ (規則波, 波向 0°)



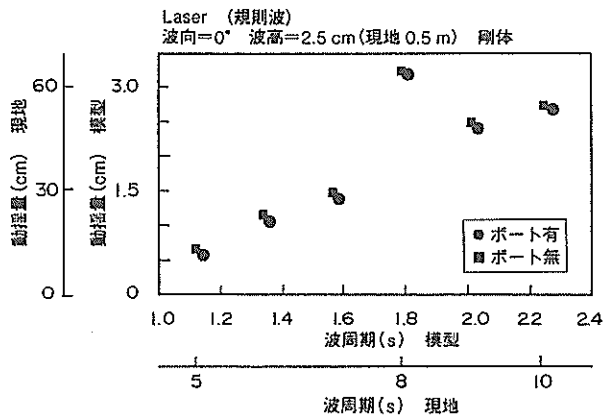
(2) サージ (不規則波, 波向 0°)



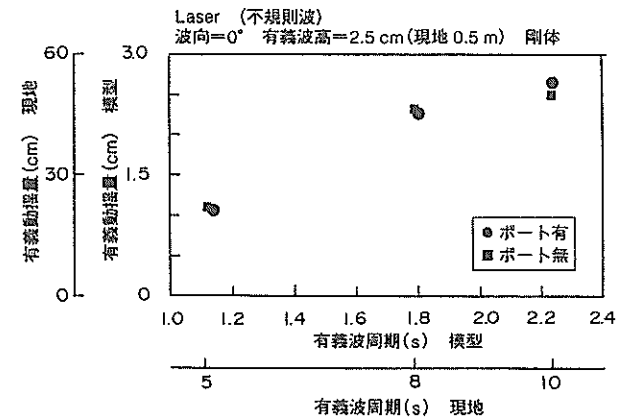
(3) スウェイ (規則波, 波向 0°)



(4) スウェイ (不規則波, 波向 0°)



(5) ヒープ (規則波, 波向 0°)



(6) ヒープ (不規則波, 波向 0°)

図-21 浮栈橋のプジャーボート保留の有無による影響 (栈橋: 剛体)

図-21(1)~(2)に示すように、くし型栈橋のサージの動揺量は、波高に対して0.8~2.0倍である。また、この図よりプレジャーボートの係留の有無は、くし型栈橋のサージの動揺量にはあまり影響を及ぼしていないことがわかる。図-21(3)~(4)に示すように、くし型栈橋のスウェイの動揺量は、波高に対して0.2~0.4倍である。ここで示した条件については、波向が0°であるため、浮栈橋のスウェイの動揺量はサージに比べるとかなり小さい。また、動揺量が小さいため絶対値の差そのものは小さいが、プレジャーボートが係留されているときの方が浮栈橋の動揺がやや大きいことがわかる。つぎに図-21(5)~(6)に示すようにくし型栈橋のヒープの動揺振幅は、波周期が長くなるにしたがって波高とおおむね等しくなる。また、プレジャーボートの係留の有無は、浮栈橋のヒープの動揺量に対してほとんど影響を及ぼしていないことがわかる。

(6) くし型栈橋における水理模型実験結果のまとめ (動揺量に関するもの)

以上に示したくし型栈橋における水理模型実験の結果をとりまとめる。

①プレジャーボートの動揺は波向0° (プレジャーボートに対して横波状態)において、スウェイおよびロールの動揺が顕著になる。したがって、プレジャーボートに入射する波が、このような条件となる場合には、ボートと栈橋間の緩衝材 (防舷材等) の設置に配慮することが必要となる。

②水理模型実験を実施した条件の範囲においては、くし型栈橋においても、波高と浮栈橋およびプレジャーボートの動揺量との間には、ほぼ比例関係が見られた。

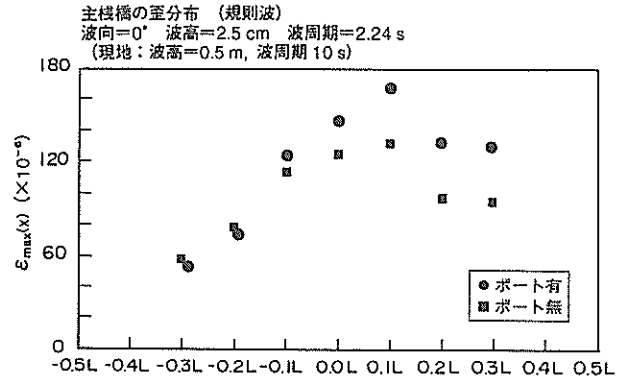
③プレジャーボートの動揺は、浮栈橋の剛性の影響を受けるが、サージ、スウェイについては、浮栈橋が剛体である方が動揺が大きく、ヒープについては、浮栈橋の剛性の影響はあまり受けない。

④くし型栈橋に波浪のみが作用する条件では、プレジャーボートの係留の有無は、浮栈橋の動揺量に対しては、それほど大きな影響を与えない。

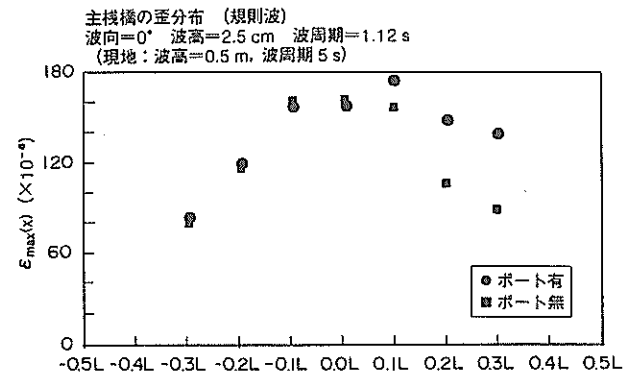
3. 3 くし型栈橋の曲げひずみ

(1) 主栈橋の曲げひずみ

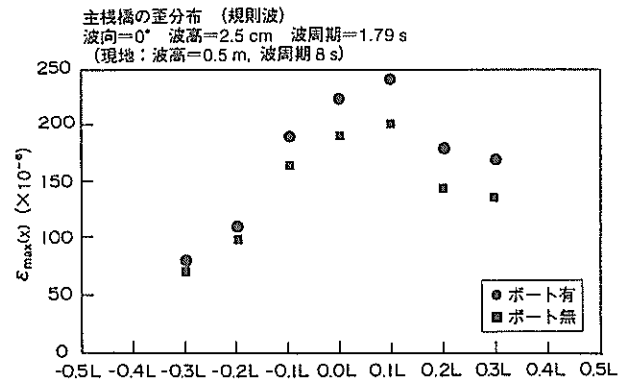
図-22(1)~(3)は、主栈橋の曲げひずみの軸方向分布を示したものである。これらの図は規則波に対するものであり、波周期1.12, 1.78, 2.24 s (現地換算5, 8, 10 s), 波高2.5cm(現地換算0.5m), 波向0°, すなわち主栈橋の長軸方向から波が入射する条件である。同一図面にプレジャーボートが係留されている状態と係留されていない状態の両者の曲げひずみをプロットしている。図の横軸



(1) 波周期1.12s



(2) 波周期1.78s



(3) 波周期2.24s

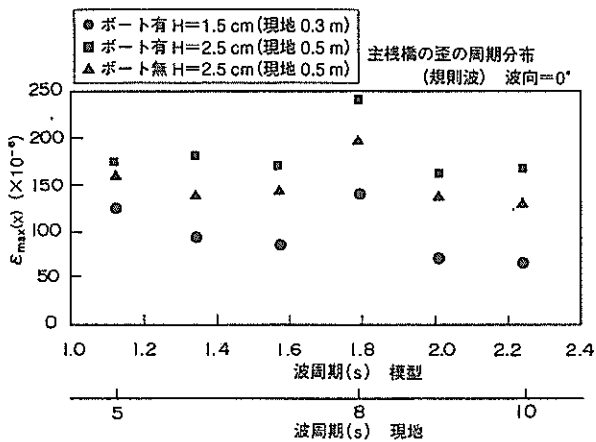
図-22 主栈橋の曲げひずみの軸方向分布

は、主栈橋の長さで無次元化しており、波上側の端部が+0.5L、波下側の端部が-0.5Lである。図の縦軸は、各点の曲げひずみの最大値 $\epsilon_{max}(x)$ を示したものであり、同一時刻における主栈橋の長軸方向の曲げひずみ分布を示したものではない。曲げひずみは主栈橋の長軸方向の合計7点で計測されているが、浮栈橋の端部については、図-2に示すように係留用の矩形の穴があるために曲げひずみは計測されていない。なお、補助栈橋は、±0.2Lの位置にある。波上側と波下側の曲げひずみの分布をみる

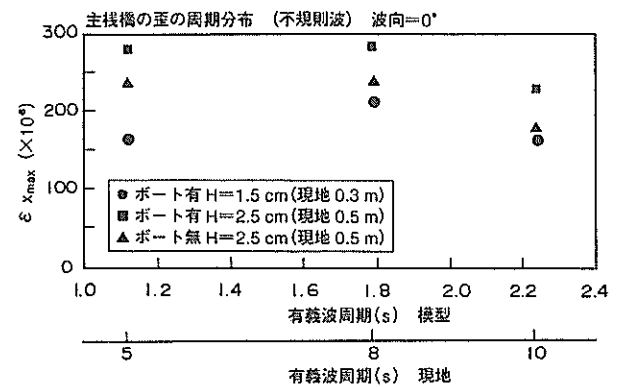
と波上側の曲げひずみが大きいことがわかる。また、プレジャーボートの係留の有無による曲げひずみの差異は、波上側で大きく、プレジャーボートが係留されている状態においては係留されていない場合に対して最大で30%~40%程度、曲げひずみが大きくなることもある。

図-23(1)~(2)は主栈橋の曲げひずみの周期特性を示したものである。図-23(1)に示す主栈橋の曲げひずみは波周期は1.12~2.24 s(現地換算5~10 s)、波高は1.5 cmまたは2.5 cm(現地換算0.3 mまたは0.5 m)の規則波に対するものであり、波向は主栈橋の長軸方向から波が入射する方向の0°である。図の縦軸は、各波周期における曲げひずみの最大値 $\varepsilon_{x_{max}}$ である。 $\varepsilon_{x_{max}}$ は各波周期について図-21(1)~(3)に示した $\varepsilon_{max}(x)$ の分布の中から、 $\pm 0.5L$ の範囲の中での最大値をとっている。図-22に示したように曲げひずみの最大値は、 $\pm 0.1L$ 付近であらわれているので、各波周期についてこの付近の値が図-23にプロットされていると考えて良い。規則波中では、図に示すように波周期1.78 s(現地換算8 s)付近で曲げひずみが大きく

なっているが、その他の波周期では、おおむね曲げひずみは等しい。波高2.5 cmについてプレジャーボートの係留有(■)と係留無し(▲)とを比較すると、いずれの波周期においてもプレジャーボートの係留有の方が曲げひずみが大きい。図-24(1)~(2)は、プレジャーボートの係留の有無による浮栈橋のヒープの動揺量を比較したものである。この図に示すように弾性体モデルにおいてもプレジャーボートの係留の有無がヒープに及ぼす影響は小さいことがわかる。なお、剛体モデルにおいても、前出の図-21(5)~(6)に示したようにプレジャーボートの係留の有無がヒープに対して影響を及ぼしていない。このようにプレジャーボートの係留の有無は浮栈橋のヒープに対しては影響を及ぼしていないが、栈橋が弾性体である場合には、プレジャーボートの係留の有無の影響を曲げひずみの評価において考慮する必要があることがわかる。なお、図-23(1)において、波高2.5 cmに対する曲げひずみと波高1.5 cmに対する曲げひずみの比が波高の比よりも大きくなっているが、この原因は定かではない。これに対し

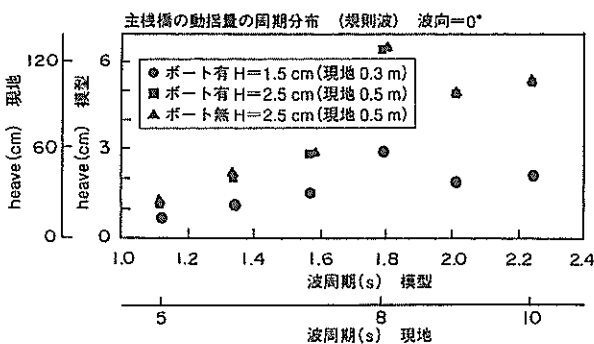


(1) 規則波 (波向0°)

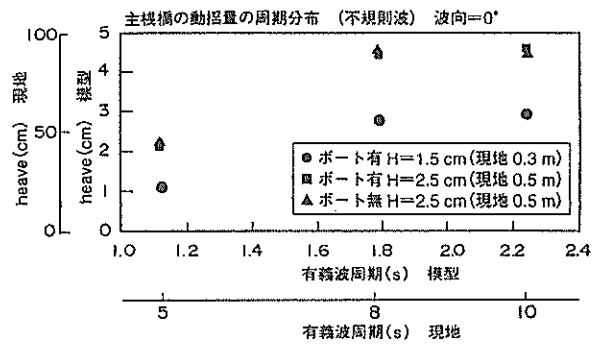


(2) 不規則波 (波向0°)

図-23 主栈橋の曲げひずみの周期特性



(1) ヒープ (規則波)



(2) ヒープ (不規則波)

図-24 主栈橋のヒープの動揺量 (栈橋:弾性体)

て不規則波中では図-23(2)に示すように、曲げひずみの大きさは、おおむね波高に比例していることがわかる。

(2) 補助栈橋の曲げひずみ

図-25(1)～(3)は、補助栈橋の曲げひずみの軸方向分布を示したものである。これらの図は、規則波に対するものであり、波浪条件は波周期1.12, 1.78, 2.24 s(現地換算5, 8, 10 s), 波高2.5cm(現地換算0.5m), 波向90°, すなわち補助栈橋の長軸方向から波が入射する条件である。なお、これらの図に示す条件においては、プレジャーボートが係留されていない。図の横軸は、補助栈橋の長さ

L' で無次元しており波上側の端部が $+0.5L'$, 波下側の端部が $-0.5L'$ である。図の縦軸は補助栈橋の各点の曲げひずみの最大値 $\varepsilon_{max}(y)$ を示したものである。補助栈橋の曲げひずみは、合計5点で計測されており、補助栈橋の両端部においては、当然ながら曲げひずみは小さい。補助栈橋の曲げひずみは、栈橋中央もしくは、やや波上側に寄った点で最大値を示す。補助栈橋の曲げひずみのオーダーは、図-22(1)～(3)に示した主栈橋よりも小さいが、これは、補助栈橋の栈橋長 ($L' = 155\text{cm}$) が主栈橋の栈橋長より ($L = 172\text{cm}$) よりも短いためである。

図-26(1)～(2)は補助栈橋の曲げひずみ, ε_{max} の周期特性を示したものである。これらの図は波周期1.12～2.24 s(現地換算5 s～10 s), 波高2.5cm(現地換算0.5m), 波向90° の条件の規則波または不規則波に対する値を示す。規則波中では、波周期1.12 s, 1.78 s(現地換算5 s, 8 s)において曲げひずみが大きく、一方、不規則波中では、波周期1.12 sにおいて曲げひずみが大きい。水理模型実験を行った水深条件において波周期1.12 sにおける波長 λ は約1.8mであるので、補助栈橋長 L' との比 λ/L' は約0.8である。単栈橋においては、既述の研究より垂直曲げモーメントは $\lambda/L = 1.0$ のときに最大となることが知られているので、補助栈橋において曲げひずみが最大となる波周期1.12sの条件は、若干異なるものの上記の条件におおむね合致していることがわかる。

(3) 主栈橋の曲げひずみの波向による影響

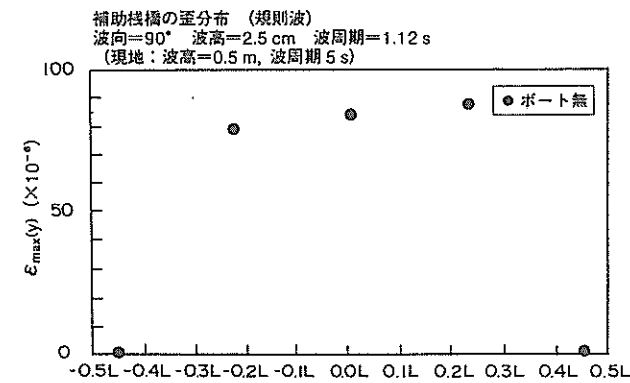
図-27(1)～(2)は、主栈橋の曲げひずみの波向による影響を示したものである。図の横軸は波周期、縦軸は最大曲げひずみ ε_{max} である。図中には波向0°, 30°, 90° に対する数値をプロットしている。主栈橋の曲げひずみは、主栈橋の長軸方向から波が入射するとき、すなわち波向0° の条件においてもっとも大きくなる。また波向30° の条件では、波向0° に対する数値の60～70%までに低減する。また、波向90° については、主栈橋に直角に波が入射する条件であるが、くし型栈橋においては、補助栈橋が存在する影響によって主栈橋にも曲げひずみが生じたものである。しかしながら、この値は、波向0° に対する値の半分以下である。

(4) くし型栈橋の曲げひずみに関するまとめ

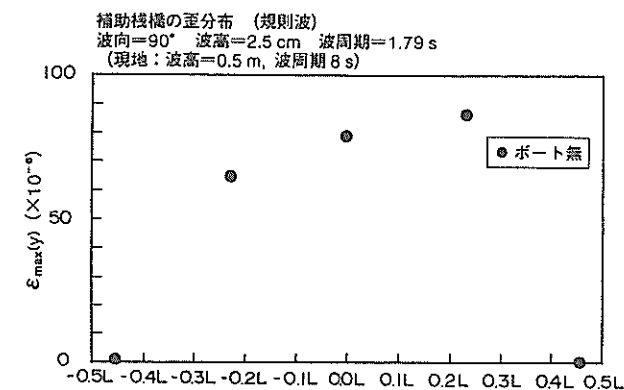
以上に示したくし型栈橋の波浪中の曲げひずみについてまとめを行う。

①主栈橋の曲げひずみは、波上側の値が波下側よりも大きい。またプレジャーボートの係留の有無の影響は波上側において顕著である。

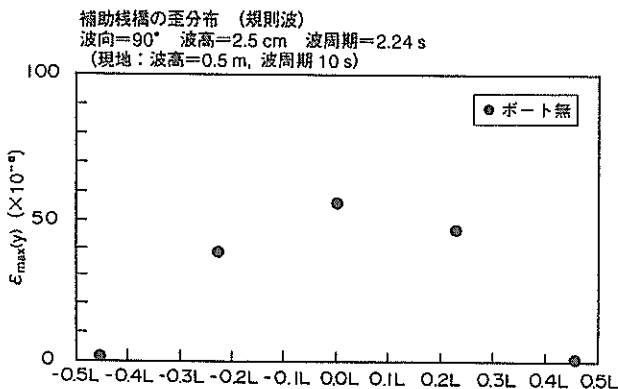
②補助栈橋の曲げひずみは、主栈橋と同様に波上側の値が波下側よりも大きい。ただし、曲げひずみの絶対値



(1) 波周期1.12s

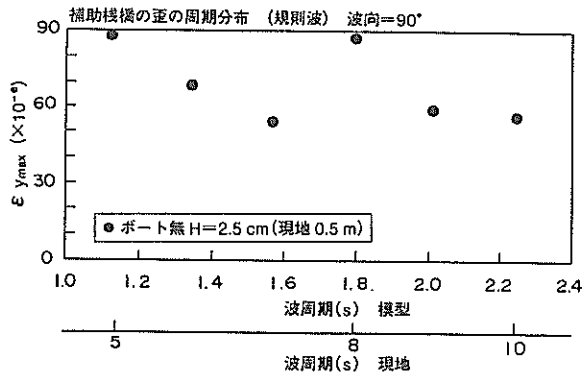


(2) 波周期1.78s

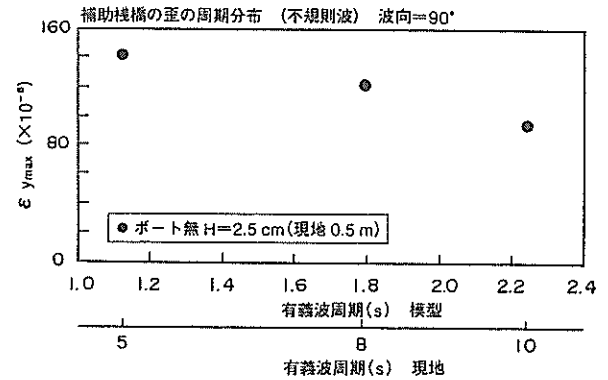


(3) 波周期2.24s

図-25 補助栈橋の曲げひずみの軸方向分布

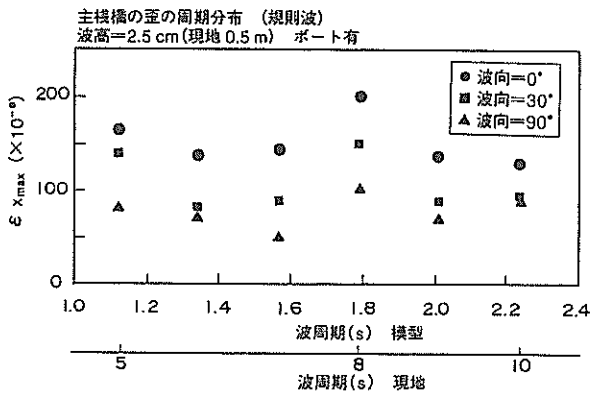


(1) 規則波 (波向90°)

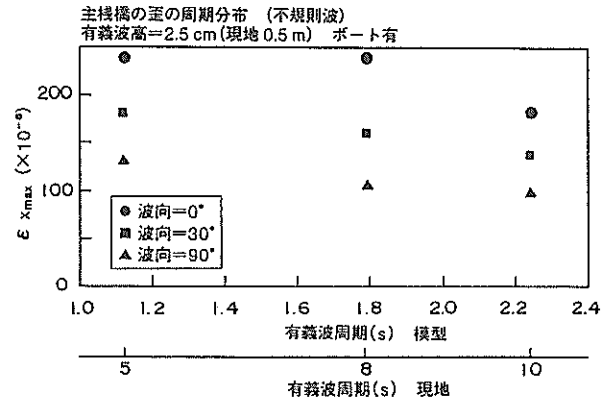


(2) 不規則波 (波向90°)

図-26 補助栈橋の曲げひずみの周期特性



(1) 規則波



(2) 不規則波

図-27 主栈橋の曲げひずみの波向による影響 (栈橋：弾性体)

は補助栈橋の方が小さい。

③主栈橋の曲げひずみは、主栈橋の長軸方向から波が入射する条件 (波向0°) において最も大きい。

4. 数値計算結果と水理模型実験結果との比較

4.1 概説

単栈橋およびくし型栈橋に対して実施した水理模型実験の結果、以下のことが明らかになった。

複数浮体の連成運動について

①単栈橋、くし型栈橋の双方とも、波浪のみが作用する条件においては、プレジャーボートの係留の有無は浮栈橋の動揺量自体にはそれほど大きな影響を与えない。ただし、風が作用する条件については、本研究では、水理模型実験を行っていないが、プレジャーボートに作用する風圧力は浮栈橋の設計荷重に大きな影響を与えると思われるので、別途検討が必要である。

②単栈橋においては、栈橋の固定条件を変えた実験を実施した。この結果、栈橋の固定条件 (栈橋の固定の有無) は、プレジャーボートのヒープに対してはあまり影

響を及ぼさないが、スウェイおよびロールについては、栈橋が浮動状態の方が動揺量が大きくなる傾向がみられた。このことから、浮栈橋とプレジャーボートのように複数の浮体が並列して存在するときの影響は、動揺成分のうち、とくにスウェイおよびロールについて注目すればよいことがわかった。

③プレジャーボートの動揺はボートに対して横波状態となる場合において、スウェイおよびロールの動揺が顕著になる。したがって、プレジャーボートに入射する波が、横波条件のときには、ボートと浮栈橋間の緩衝材 (防舷材等) の設置に配慮することが必要となる。

栈橋の剛性の影響について

④プレジャーボートの動揺は、浮栈橋の剛性の影響を受けるが、単栈橋およびくし型栈橋における水理模型実験結果より、サージ、スウェイ、ロールについては、浮栈橋が剛体である方が動揺量が大きいことがわかった。ヒープについては、単栈橋では弾性体の方が動揺量がやや大きかったが、くし型栈橋では剛性の影響は小さかったことから、浮栈橋の弾性影響は水理模型実験の範囲においては、全体として少ないと言える。以上のことから、

浮棧橋自体の剛性は十分大であるとし、浮棧橋を剛体としてモデル化しても、プレジャーボートの動揺については、弾性影響を考慮したときよりやや大きな数値が得られるものと考えられる。

以上の結果をふまえて、4. 2で示す複数浮体の動揺解析手法による計算結果と水理模型実験結果とを4. 3および4. 4において比較する。

4. 2 数値計算手法

(1) 波力および流体力の評価

a) 概説

ここでは、浮体の動揺解析に用いられている波力およびラディエーション流体力の解析法について述べる。浮体に作用する波力の解析においては、通常、浮体が流体中で固定されて動揺しないとしたときに入射波 (Incident Wave) によって作用する波力、浮体が存在することによって発生する散乱波 (Diffraction Wave) によって作用する波力、および浮体が静水中において強制的に動揺を加えられたときに発生する発散波 (Radiation Wave) によって作用する波力について解析がなされる。前二者による波力は固定浮体に作用する波力、あるいは、単に波力または波強制力と呼ばれ、発散波による波力は、ラディエーション流体力と呼ばれる。ラディエーション流体力は、加速度に比例する成分と、速度に比例する成分とに分離することができ、前者による力は付加質量力、後者による力は造波減衰力に相当する。浮体の動揺解析においては、入射波による波力と散乱波による波力を外力項として、発散波による力を付加質量、造波減衰力として取り扱い運動方程式に取り入れる。

波力およびラディエーション流体力の解析法としては、これまで様々な手法が提案されている。ここでは、それらの主要なものについて、以下に概説する¹⁾。

b) 固有関数展開法

固有関数展開法は、浮体の境界形状に適合した座標系とそこから導かれる種々の特殊関数により解を得るものである。この手法は、対象とする浮体の形状に対する適した座標系がある場合には、厳密解が得られる。しかしながら、そのような座標系が設定できない場合には適用できないので、限定された条件においてのみ有効な解析法である。この解析手法の例としては、合田、高山らによる楕円体柱浮体の波力解析の例があげられる²⁾。

c) グリーン関数法(特異点分布法)

グリーン関数を用いてポテンシャルに関する境界値問題を積分方程式に変換して解く方法をグリーン関数法と呼ぶ。この手法は対象構造物が任意の形状の場合にも適

用できるので、汎用的な解析が可能である。グリーン関数は、ある1点に単位わき出しを置いたときの別の1点での影響を表すものであるが、その解法としては、直接法と間接法とがある。

間接法では、浮体表面に分布させて設けた要素内のわき出し強さと、グリーン関数との積を浮体表面上で積分することにより任意点における流場の速度ポテンシャルを表現し、所定の境界条件から未知条件であるわき出し強さを求める方法である。未知定数が求まれば、速度ポテンシャルから物体表面の圧力を計算し、波力およびラディエーション流体力を求めることができる。浮体表面のわき出しの強さはグリーン関数を用いて表現するが、グリーン関数の未知定数は基礎方程式と境界条件(自由表面条件、海底条件、物体表面の条件、放射条件)とから導かれる。この方法は、造船工学の分野では、通常、特異点分布法^{3)~4)}と呼ばれており、任意形状の浮体に対して適用できるために、船体運動の解析、セミサブ型の海洋構造物の波浪応答解析等において活用されている。

直接法では、グリーン関数とグリーンの公式を用いて、直接未知ポテンシャルに関する積分方程式を導き、これを離散化して数値的に解く。実用上は、直接法の方が優れているとされているが、間接法の方が古くから用いられていることもあって、現在では、両者が混在して用いられている。

d) 領域分割法(ポテンシャル接続法)

領域分割法は、水深が一定な2つの流体域が接するとき、各流体域における流体運動の速度ポテンシャルを、上面(水面)と下面(水底)の境界条件を満足する水面からの深さ z に関する固有関数により、未定定数を係数とする無限級数に展開し、隣接する領域のポテンシャルと流速の連続条件から、数値的に未定定数を決める方法である。領域分割法による解析の例としては、井島らによる箱型浮体に対する解析⁵⁾が有名である。

e) グリーン公式に基づく解析法

グリーン公式による方法では、グリーン関数法のように、水面境界条件やラディエーション条件を満足すべきグリーン関数をあらかじめ求めておく必要が無いので、その適用はやや容易である。また、グリーン公式による速度ポテンシャルの表示は、境界の形状には無関係に得られるものであるから、任意断面の柱体の場合にも速度ポテンシャルの表示が可能となる。しかしながら、構造物を囲む流体域全ての境界面上に面要素を取ることが必要であり、要素分割が浮体の没水表面上の要素のみで済むグリーン関数法に比べると計算時間は長くなる。

f) 有限要素法

有限要素法は、解析領域が非均質であったり、材料特性が非線形挙動を示す場合に有効な方法であり、連続体（構造物、地盤）などの解析に汎用的に用いられている。浮体に適用する場合には複雑な形状の浮体に適用できるという利点がある。有限要素法を用いる場合には、無限遠における境界条件の処理が重要である。この処理方法としては、構造物周辺を有限要素法で、構造物からある程度離れた仮想境界から外側を他の方法で定式化し、両者を仮想境界上で接続する方法が有効である。グリーン関数法と同様に任意形状の浮体に適用できるが、グリーン関数法では浮体表面のみを要素分割すればよいのに対して、有限要素法では、浮体周辺の流体も要素分割する必要があり、ややモデル化において煩雑でかつ計算時間がかかる欠点を有する。有限要素法を浮体の動揺解析に用いた事例としては、中空の六角形浮体に適用した事例がある⁶⁾。

g) ストリップ法（断面分割法）

ストリップ法は、二次元物体に作用する波力およびラディエーション流体力を三次元物体のものとして拡張する方法を示すものである。b)～f)に示した解析手法の分類に対する考え方とは異なる。船舶のように細長い物体では、二次元断面に対する波力を浮体の長軸方向に積分することにより、近似的に三次元物体の波力を求めることができる。この方法は、大幅に計算時間の短縮につながるため、今日ほど電子計算機の性能が良くなかった時代には、極めて実用的な方法であった。造船工学の分野では、この方法による船舶の動揺解析手法がいくつかの改良を重ね発展してきた。この手法は、港湾における船舶の係留時の動揺解析にも適用され⁷⁾、今日まで実用的解析手法として港湾の係留施設の設計および係留船舶の動揺を考慮した稼働率の評価などにおいて、よく用いられている。また、この手法を箱型浮体の動揺解析に適用した際の知見では、浮体の長さ L と幅 B の比が、 $L/B > 4.0$ であれば、直接、三次元的手法によって求めた波力およびラディエーション流体力と、まず二次元断面に対して領域分割法を適用して二次元的に流体力を求め、ストリップ法の考え方で三次元に拡張して求めたものとの相違は小さいことが知られている⁸⁾。また、この手法は箱形浮体の断面力の計算手法^{9)～11)}として従来の浮体の動揺を考慮しない手法¹²⁾にかわる計算手法としても利用されている。

h) マリーナの浮棧橋およびプレジャーボートの解析に用いる波力、流体力の計算法

マリーナの浮棧橋およびプレジャーボートの動揺解析には、上記の方法のうち適したものをいれればよい。マ

リーナの浮棧橋の形状はその多くが、くし（櫛）型をしており、プレジャーボートも単純な箱形でない特殊な形状をしていることを考えれば、任意の形状の浮体に適用できる手法を採用することが望ましい。各解析手法には、一長一短があるが、グリーン関数法（特異点分布法）が最も汎用的であると考えられる。そこで、(2)では、これを用いた浮体の動揺解析法について提示する。なお、くし型浮体の断面力の算定法については、三次元特異点分布法に基づく計算方法がすでに提案されている^{13) 14)}。

(2) 棧橋および複数のボートの相互干渉効果を考慮した動揺解析手法

a) 概要

従来の浮体の動揺解析手法は、浮体単体の運動を取り扱っており、複数の浮体が連結されて係留されている場合の動揺解析には適用できなかった。ここでは、マリーナの棧橋とプレジャーボートのように複数の浮体が係留・連結された構造物の動揺解析手法について述べる。この解析手法では、浮体間の相互作用を考慮して、三次元特異点分布法により求めた波力、流体力係数を用いて複数の浮体各々における重心点の動揺力、係留力、連結力、風等の荷重の時刻歴変化を求める機能を有する。なお、ここで係留力とは図-28に示すように浮体が杭あるいは係留索等の係留装置で係留されているときに働く力で、反力は固定点（固定棧橋あるいは地盤など）との相対変位によって働く。また、連結力とは浮体間を連結する係留装置（係留索あるいはフェンダー等）に作用する

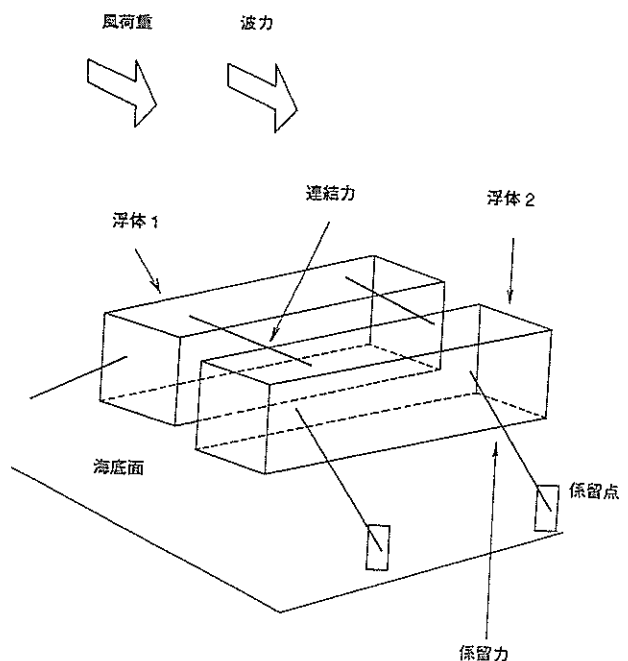


図-28 係留力と連結力

力である。連結力は浮体相互間の相対変位によって生ずる。複数浮体の動揺解析法としては、これまで2~3の解析例が提示されている^{15)~17)}。ここでは、斉藤¹⁸⁾による2浮体の流体力の相互干渉効果の評価法を多浮体の相互干渉問題に拡張し、汎用的なプログラム化を図っている。

b) 複数浮体に作用する波力およびラディエーション流体力

イ) 手法の概要

三次元特異点分布法は、流体中の物体表面を要素分割し、Green関数を用いて要素内のわき出しを計算することにより流場の速度ポテンシャルを求める方法である。この速度ポテンシャルから物体表面の圧力を計算し、ラディエーション流体力および波力を求める。浮体は複数個存在するため、それらの浮体の中のある2浮体のみに着目し、動揺の相互作用関係を用いてその2浮体間のラディエーション流体力および波力の相互干渉効果を求める。このとき、他の浮体は静止したものとして取り扱い、それぞれの効果を重ね合わせることにより、複数浮体間の流体力学的相互作用を考慮したラディエーション流体力および波力を求める。

ロ) 速度ポテンシャル

波浪中において動揺する複数の浮体まわりの速度ポテンシャル $\Phi(x, y, z, t)$ は、式(1)で表される。

$$\Phi(x, y, z, t) =$$

$$\left[\frac{g \zeta_0}{\omega} \phi_0(x, y, z) + \phi_d(x, y, z) \right] + \sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^N \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^6 \frac{g X_{rj sk}^*}{\omega} \phi_{rj sk}(x, y, z) e^{-i\omega t} \quad (1)$$

ここに、 g : 重力加速度、 ζ_0 : 入射波振幅、 t : 時間、 i : 虚数単位、 r : 浮体の番号、 s : 浮体の番号、 j : 浮体の動揺成分、 k : 浮体の動揺成分 (j, k ; 1: サージ, 2: スウエイ, 3: ヒープ, 4: ロール, 5: ピッチ, 6: ヨウ)、 ϕ_0 : 入射波による速度ポテンシャル、 ϕ_d : 散乱波による速度ポテンシャル、 $\phi_{rj sk}$: r 番めの浮体の j 動揺成分による s 番めの浮体の k 動揺成分に対する発散波による速度ポテンシャル、 $X_{rj sk}^*$: r 番めの浮体の j 動揺成分の動揺振幅である。

ハ) 基礎方程式および境界条件

基礎方程式、境界条件は式(2)~(6)で与えられる。ただし Ω は流体領域をあらわす。

①ラプラス方程式

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

②自由表面の条件

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\Phi \Omega^2}{g} = 0 \quad (3)$$

③水底の条件

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

④物体表面の条件

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial n} = V_i^r \quad (\text{on } S V_r) \quad (5)$$

⑤放射条件

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial R} - i k_0 \Phi \right) = 0 \quad (6)$$

ここで、 V_i^r ($r=1, 2, \dots, N$) は N 個存在する各浮体の表面における流速である。また、 $i=1 \sim 7$ でモードを表わし、 n は浮体表面の単位法線ベクトルである。

以上の境界条件のもとに、それぞれの基礎方程式を Diffraction problem, Radiation problem として解く。すなわち、Diffraction problem では、浮体を固定状態として入射波による流場と散乱波による流場を求める。一方、Radiation problem では、静水中において、任意の浮体に対して任意のモードの単位振幅の強制動揺を与え、その条件に対する発散波による流場を求める。

c) 運動方程式、係留および連結による拘束力の評価

浮体に作用する波力およびラディエーション流体力の計算においては、浮体の動揺は微小であると仮定して解を求める。したがって、全体座標系と物体座標系は一致していると考えられる。

浮体の運動方程式は式(7)で与えられる。

$$\begin{aligned} & [M_k] \{ \dot{\mathbf{x}}_k \} + [C_k] \{ \dot{\mathbf{x}}_k \} + \\ & [C^*{}_k] \{ \dot{\mathbf{x}}_k | \dot{\mathbf{x}}_k | \} + [K_k] \{ \mathbf{x}_k \} \\ & = \{ \mathbf{F}_k(t) \} \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、：

- $[M_k]$: 質量マトリクス
- $[C_k]$: 造波減衰力マトリクス
- $[C^*_k]$: 粘性減衰力マトリクス
- $[K_k]$: 静水圧的復元力マトリクス
- $\{\dot{\mathbf{x}}_k\}$: 加速度ベクトル
- $\{\mathbf{x}_k\}$: 速度ベクトル
- $\{\dot{\mathbf{x}}_k | \ddot{\mathbf{x}}_k\}$: 速度の自乗ベクトル
- $\{\mathbf{x}_k\}$: 変位ベクトル
- $\{\mathbf{F}_k(t)\}$: 外力ベクトル (波力+風荷重+流れによる力+係留力+連結力)

k : k 番めの浮体であることを示す添字である。

ここに、それぞれの浮体に作用する外力ベクトル $\{\mathbf{F}_k(t)\}$ は式(8)で得られる。

$$\begin{aligned} \{\mathbf{F}_k(t)\} &= \{\mathbf{F}_{Ak}(t)\} + \{\mathbf{F}_{Bk}(t)\} \\ &+ \{\mathbf{F}_{Ck}(t)\} + \{\mathbf{F}_{Dk}(t)\} \\ &+ \{\mathbf{F}_{Ek}(t)\} \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、

- $\{\mathbf{F}_{Ak}(t)\}$: k 番めの浮体に作用する波力ベクトル
- $\{\mathbf{F}_{Bk}(t)\}$: k 番めの浮体に作用する風荷重ベクトル
- $\{\mathbf{F}_{Ck}(t)\}$: k 番めの浮体に作用する流れによる力によるベクトル
- $\{\mathbf{F}_{Dk}(t)\}$: k 番めの浮体に作用する係留力ベクトル
- $\{\mathbf{F}_{Ek}(t)\}$: k 番めの浮体に作用する連結力ベクトル

である。

式(7)による運動方程式および式(8)による外力ベクトルは、複数浮体の動揺解析手法においては、各浮体ごとに設定される。すなわち、各時間ステップごとにすべての浮体に対する運動方程式を解き、得られた各浮体の変位、速度を用いて次の時間ステップにおける各浮体それぞれに対する運動方程式を解くこととする。なお、連結力ベクトルは各浮体間において、作用・反作用力として働くことに注意しなければならない。

d) 動揺解析のフローチャート

以上の基礎理論に基づいて、動揺解析のフローチャー

トを簡単に紹介する。図-29は、解析のフロー図を示したものである。解析においては、それぞれの浮体の形状データを読み込む。これらのデータは浮体ごとに作成され、データファイルとして入力される。次いで、これら各浮体の相互干渉効果を考慮し、三次元特異点分布法により規則波に対する流体力および波力が計算され、周期・波向別に数値テーブルが作成される。また、各浮体の形状データ（投影面積、風抗力係数）および平均風速値から各浮体に作用する風荷重の時系列が作成される。さらに、各浮体の係留データおよび浮体相互間の連結データが入力される。これらのデータ入力および規則波に対する流体力・波力計算が済んだ後に、時間領域で個々の浮体に対する運動方程式の数値積分が実施され、各浮体の動揺量、係留力、連結力の時刻歴が求められる。図-30は、計算プログラムにおける計算の流れを図示したものである。



図-29 解析のフロー図

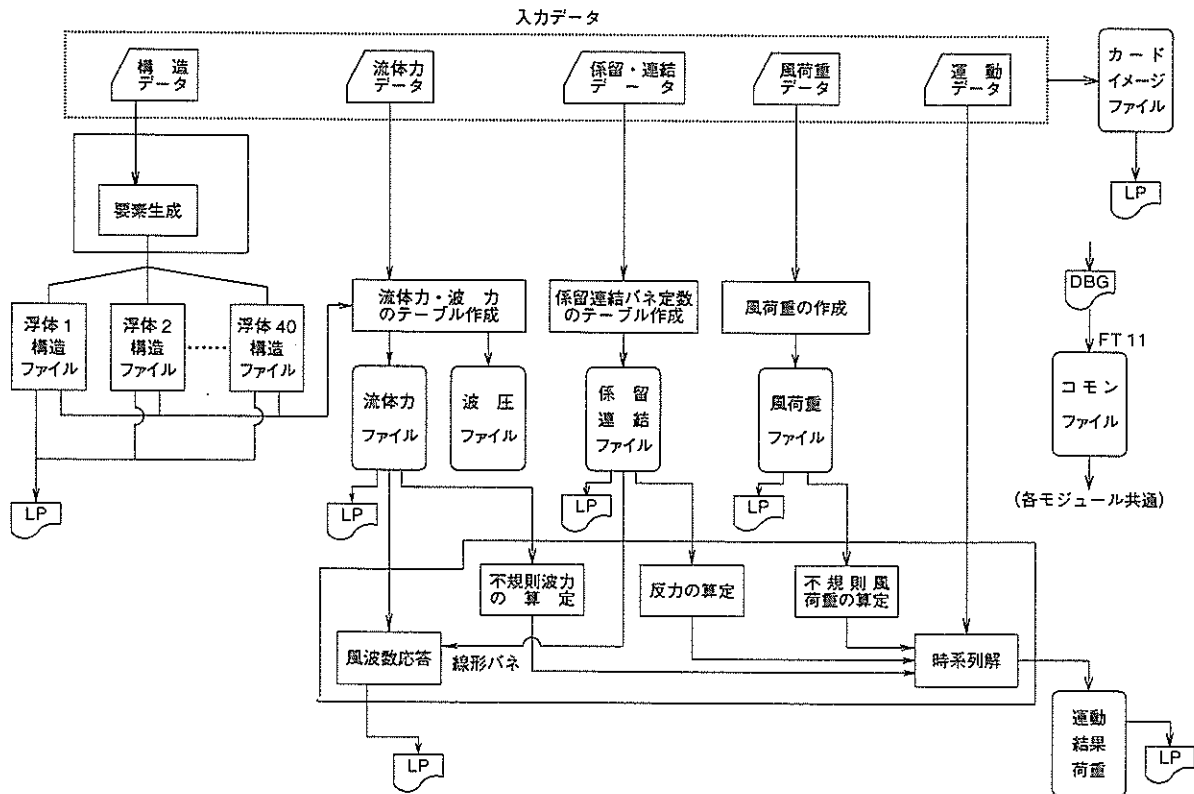


図-30 複数浮体の動揺解析におけるデータの流れ図

4. 3 単栈橋とプレジャーボートの流体力および動揺

単栈橋にプレジャーボートが1隻係留されている場合について解析例を示す。なお、以下の図は現地における諸元に基づいて表記している。

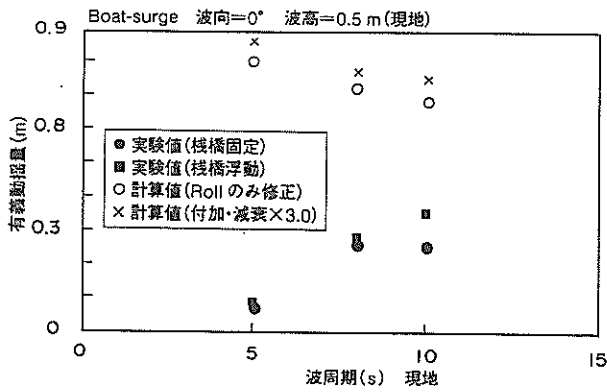
(1) 従来手法を用いた解析（固定単栈橋にプレジャーボートが1隻係留されている場合の動揺解析）

固定単栈橋にプレジャーボートが1隻係留されている場合について動揺解析例を示す。すなわち、この場合浮体間の相互干渉効果は考慮していない。なお、以下の図については計算結果を現地換算値で示している。

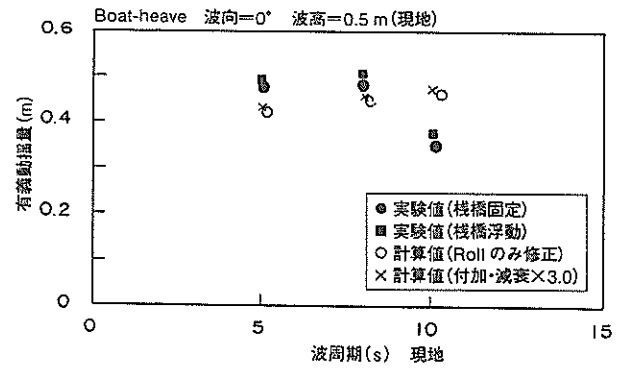
図-31(1)~(6)は、単栈橋にプレジャーボートが1隻係留されている状態について、有義波周期 5s, 8s, 10sの不規則波中のプレジャーボートの動揺量（有義振幅）を示したものである。ここで示した波向は 0° および 90° であり、有義波高は0.5mである。ただし、波向 0° では、この波向における卓越動揺成分であるサージ、ヒープ、ピッチを、波向 90° では、同じくスウェイ、ヒープ、ロールを示している。なお、実験値は栈橋が“剛体”であるときのものを示している。また、実験値は栈橋の固定条件が“栈橋固定”と、“栈橋浮動”について、その双方を示しており、栈橋固定については●で、栈橋浮動については■で示している。計算については、栈橋固定状

態で実施しているが、流体力係数のうち、ロールの減衰定数を自由振動実験の結果に基づいて修正しており、これを図中では、○；計算値（Rollのみ修正）と表記している。また、浅喫水状態の場合には、理論計算で得られた流体力係数が実際の数値よりも過小に評価されることがあることから、サージ、スウェイについては付加質量係数、減衰係数を補正している。動揺計算の際の流体力係数の補正係数は、それぞれ、流体力解析そのもので得られる付加質量係数および減衰係数の計算値を3倍しているが、これらは、図中では、×；計算値（付加、減衰 $\times 3.0$ ）と表記している。なお、以下の図中の数値はいずれも現地スケールであり、模型実験値については現地換算して示している。

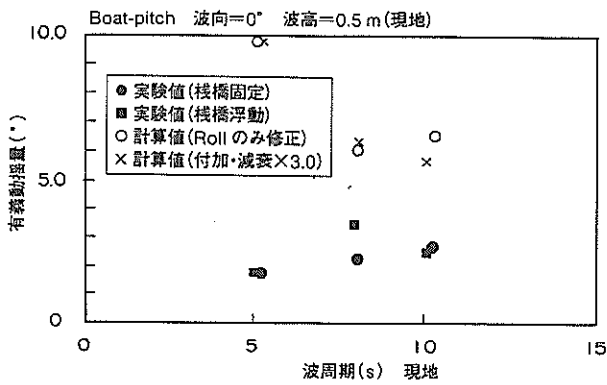
図-31(1)はプレジャーボートの動揺量のうち、波向 0° のときのサージを示している。計算値と実験値の相違が大きい。これは、動揺計算における係留ばねのばね定数のモデル化が水理模型実験の際の状態を精緻に再現できていない可能性があること、水理模型実験では加速度計を用いて動揺量を計測しているため、波の周期よりも長い周期成分（長周期動揺成分）については適切に動揺量が計測されていない可能性があること等が実験値と計算値との相違の原因として考えられる。



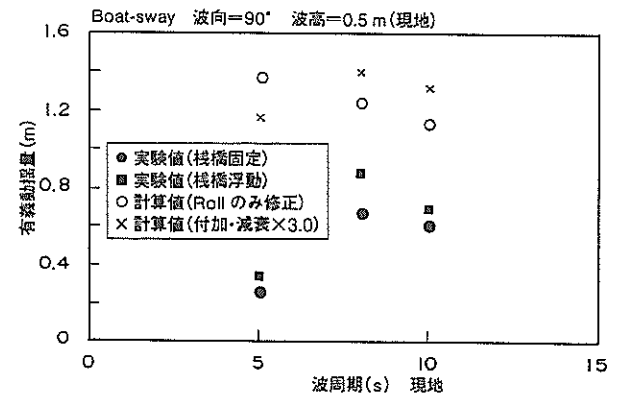
(1) サージ, 波向0°



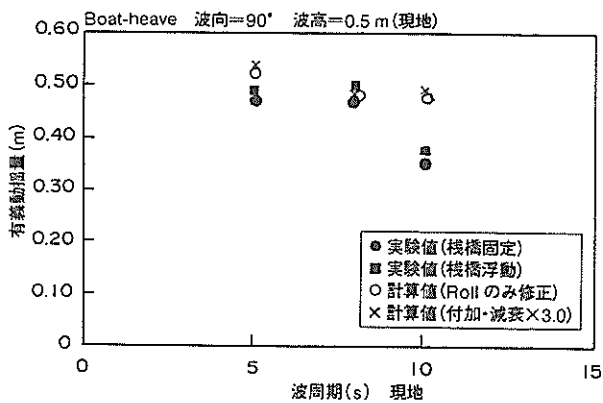
(2) ヒープ, 波向0°



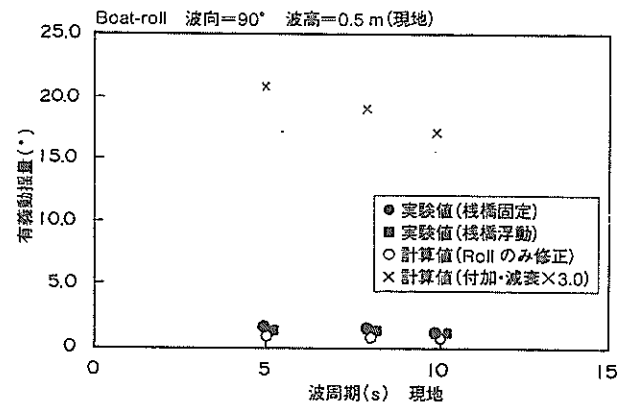
(3) ピッチ, 波向0°



(4) スウェイ, 波向90°



(5) ヒープ, 波向90°



(6) ロール, 波向90°

図-31 プレジャーボートの動揺量

図-31(2)は、プレジャーボートの動揺量のうち、波向0°のときのヒープを示している。波周期10sにおいては計算値の方が大きく、一方、波周期5sにおいては実験値の方が大きいという傾向があるものの、計算値と実験値はおおむね一致していると考えられる。前記のサージについては、計算値と実験値との間にかなりの相違があったものの、ヒープについては、動揺量が係留系の変位復元

力特性の影響をほとんど受けないため、計算値と実験値との一致の度合いが高い。なお、この図を見る限り実験値において桟橋固定と桟橋浮動における動揺量の相違は小さく、ここで動揺計算を桟橋固定として実施していることが計算結果に及ぼす影響は小さいと考えられる。

図-31(3)は、プレジャーボートの動揺量のうち、波向0°のときのピッチを示している。計算値は、実験値に比べ

てかなり大きい。ピッチについても、ロールと同様に自由振動実験を実施したが、減衰定数および復元モーメント係数が大きいため、自由振動波形はすぐに減衰し、実験結果から減衰定数を求めることが困難であった。しかしながら、図に示すような実験値と計算値との相違を考慮すると、動揺計算においては、流体力解析の結果得られる減衰定数の計算値に対して適切に数値を補正をすることが必要であると思われる。

図-31(4)は、プレジャーボートの動揺量のうち、波向 90° のときのスウェイを示している。波向 0° のときのサージと同じく、計算値と実験値との相違が大きい。これは、先にも述べたように動揺計算におけるばね定数のモデル化が水理模型実験の際の状況を精緻に再現できていない可能性があること、水理模型実験では加速度計を用いて動揺量を計測しているため、波周期よりも長い周期成分（長周期動揺成分）については適切に動揺量が計測されていない可能性があること等が相違の原因として考えられる。

図-31(5)は、プレジャーボートの動揺量のうち、波向 90° のときのヒープを示している。波向 0° のときと同じく、波周期10sにおいては計算値の方が大きく、一方、波周期5sにおいては実験値の方が大きいという傾向があるものの、計算値と実験値はおおむね一致していると考えられる。なお、この図についても、実験値において栈橋固定と栈橋浮動における動揺量の相違は小さく、動揺計算を栈橋固定状態として実施したことの影響は小さいと考えられる。

図-31(6)は、プレジャーボートの動揺量のうち、波向 90° のときのロールを示している。計算値においてロールの減衰定数として流体力解析の結果そのものの数値を用いているときの計算値（図中で \times ）は、実験値に比べてかなり大きいことがわかる。これに対して、ロールについて自由振動実験で得られた減衰定数を用いた計算値（ \circ ）は、実験値の栈橋固定（ \bullet ）または栈橋浮動（ \blacksquare ）とおおむね一致していることがわかる。このことからプレジャーボートのロールの動揺振幅を精度良く推定するためには、運動方程式中の減衰定数を自由振動実験により得られる数値等によって適切に修正して計算することが重要であることがわかる。

(2) 複数浮体の動揺解析プログラムを用いた解析

a) 解析モデル

図-32は、単栈橋にプレジャーボートが一隻係留しているときの解析モデルを示している。全体座標系の原点は、単栈橋とプレジャーボートの中間の位置にとり、両浮体の長軸方向に X 軸を、これと直交する方向に Y 軸を

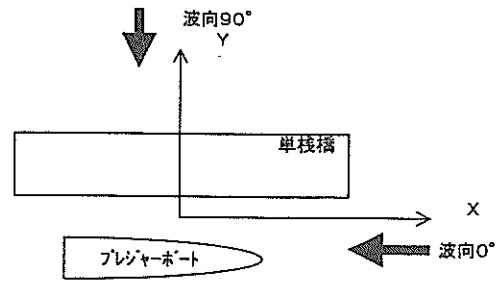


図-32 単栈橋の解析モデル

とっている。波力の計算は波向 0° および波向 90° に対して行っており、波向 0° では、サージ方向の波力 F_x 、ヒープ方向の波力 F_z 、ピッチ運動に対する波力モーメント M_y が卓越する。一方、波向 90° では、スウェイ方向の波力 F_y 、ヒープ方向の波力 F_z 、ロール運動に対する波力モーメント M_x が卓越する。

b) 波力および流体力係数

イ) 波力

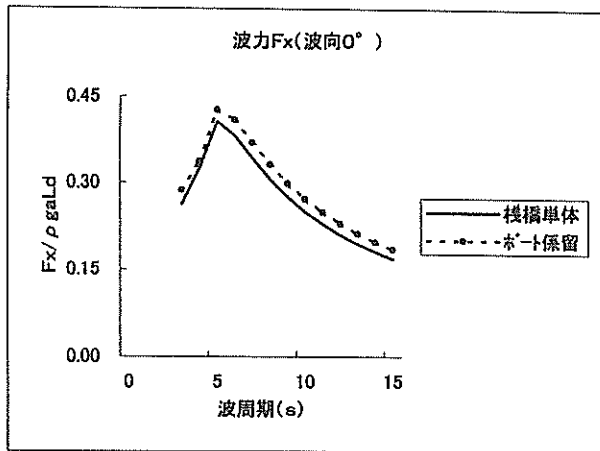
図-33(1)～(3)に波向 0° における単栈橋の波力、図-33(4)～(6)に同じ波向のプレジャーボートの波力を示す。表示している波力は、この波向に対する卓越成分であるサージ方向の波力 F_x 、ヒープ方向の波力 F_z 、ピッチ運動に対する波力モーメント M_y であり、それぞれ、 $\rho g a L d$ または $\rho g a L B d$ で除して無次元化している。ここで、 ρ ：流体密度、 g ：重力加速度、 a ：波振幅、 L ：浮体長さ、 B ：浮体幅、 d ：喫水である。なお、単栈橋に対する図面では、 $L=15.0\text{m}$ 、 $B=3.6\text{m}$ 、 $d=0.8\text{m}$ で、プレジャーボートでは、 $L=12.0\text{m}$ 、 $B=4.1\text{m}$ 、 $d=1.1\text{m}$ でそれぞれ無次元化している。

図-33(1)～(3)に示す単栈橋の波力の図面においては、2本の線が表示されており、実線は単栈橋が単独で存在するときの波力を、点線は単栈橋にプレジャーボートが係留しているときの単栈橋の波力を示す。一方、図-33(4)～(6)に示すプレジャーボートの波力の図面においては、実線はプレジャーボートが単独で存在するときの波力を、点線はプレジャーボートが単栈橋に係留しているときのプレジャーボートに作用する波力を示す。すなわち、実線は相互干渉効果を考慮しないときの、点線は単栈橋とプレジャーボートとの相互干渉効果を考慮したときの波力を示している。これらの図より、単栈橋にプレジャーボートが係留している状態において波向 0° 、すなわち単栈橋とプレジャーボートの長軸方向から波が作用する状態においては、浮体が並列して存在することによる流体力学的相互干渉効果は波力に対してはその影響が小さいことがわかる。

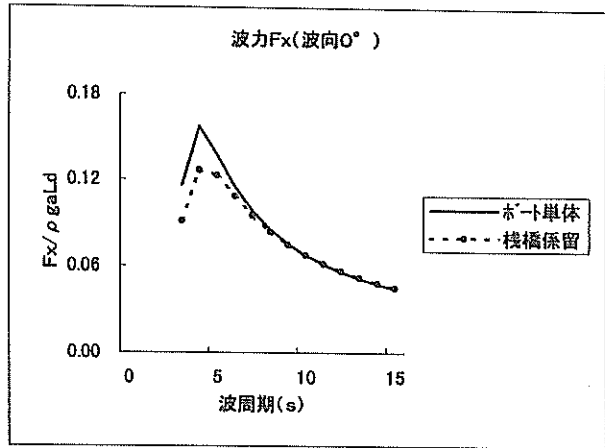
つぎに、図-34(1)～(3)は、波向 90° における単栈橋の

単 棧 橋 ・ 波 力

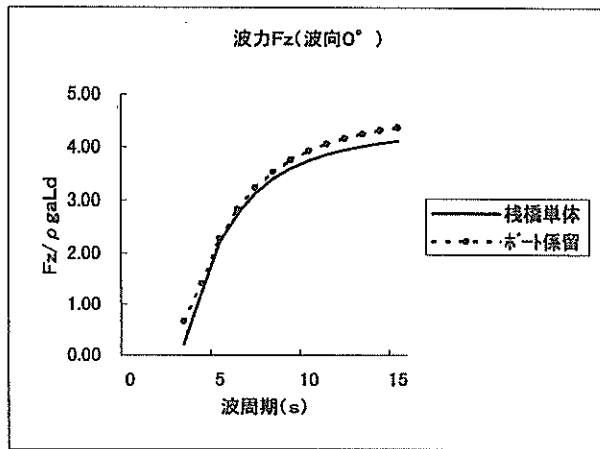
プレジャーボート・波力



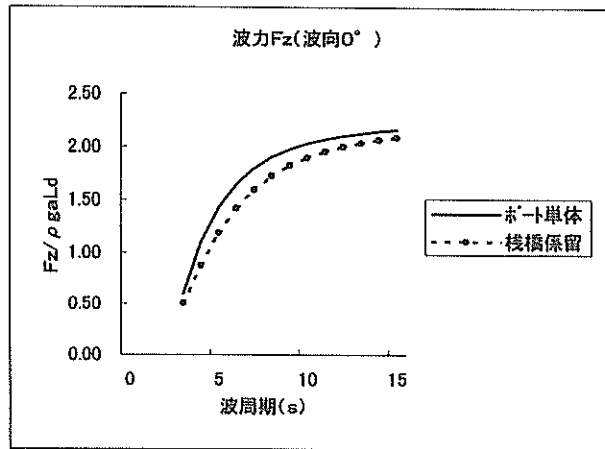
(1) F_x 波向 0°



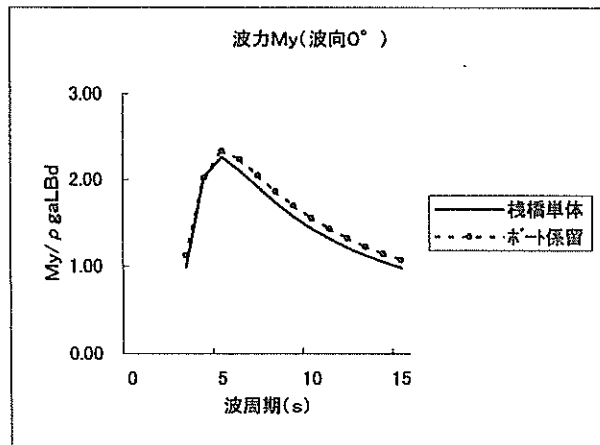
(4) F_x 波向 0°



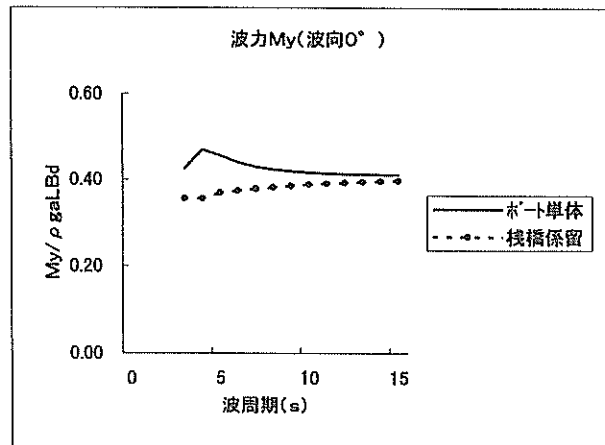
(2) F_z 波向 0°



(5) F_z 波向 0°



(3) M_y 波向 0°

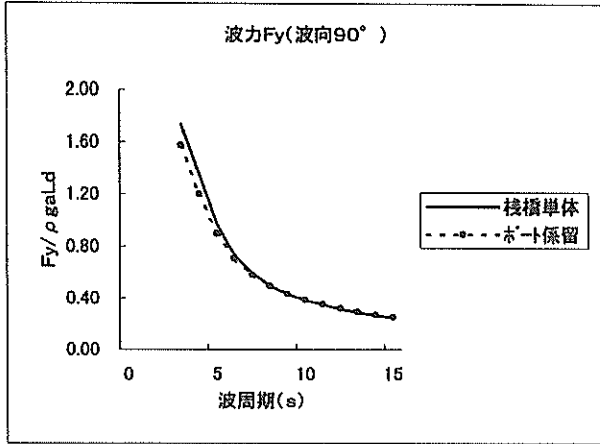


(6) M_y 波向 0°

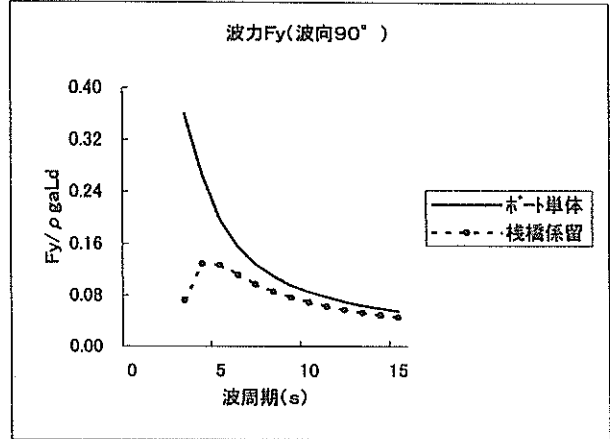
図-33 単棧橋およびプレジャーボートの波力

単 棧 橋 ・ 波 力

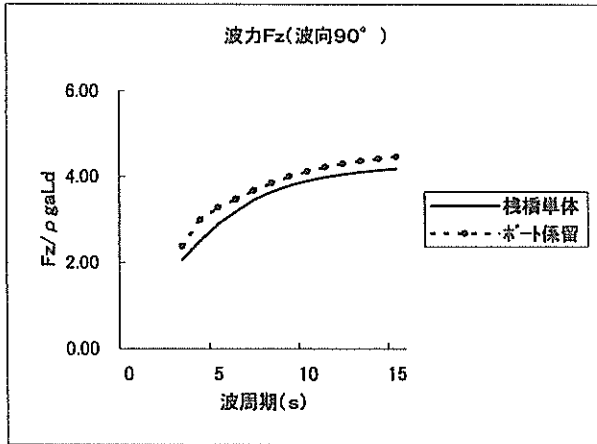
プレジャーボート・波力



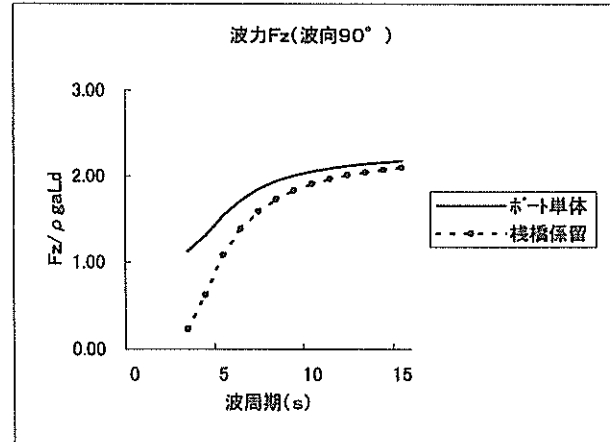
(1) F_y 波向 90°



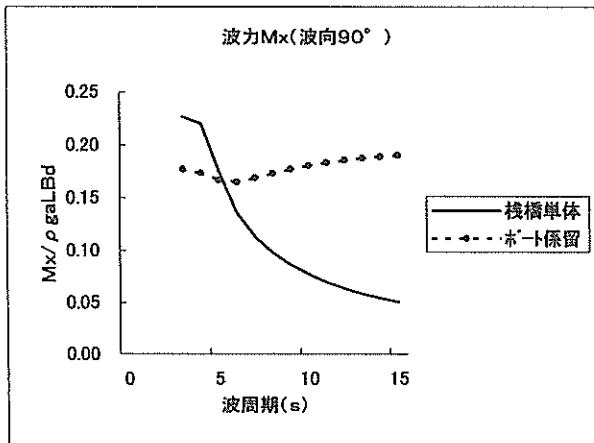
(4) F_y 波向 90°



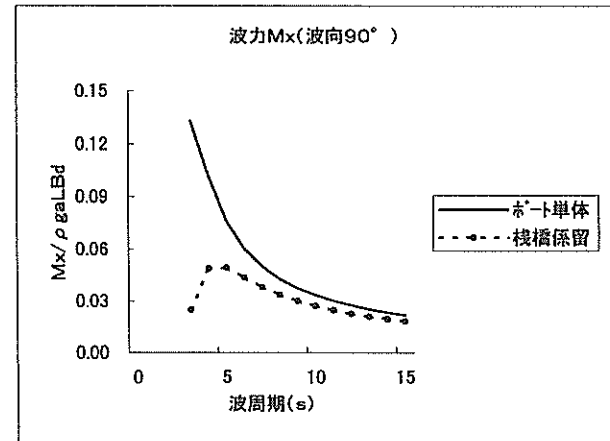
(2) F_z 波向 90°



(5) F_z 波向 90°



(3) M_x 波向 90°



(6) M_x 波向 90°

図-34 単棧橋およびプレジャーボートの波力

波力、図-34(4)~(6)は同じ波向のプレジャーボートの波力を示す。表示した波力は、この波向に対する卓越成分であるスウェイ方向の波力 F_y 、ヒープ方向の波力 F_z 、ロール方向の波力モーメント M_x である。それぞれ、実線は単栈橋またはプレジャーボートが単独に作用するときの波力を示している。また、点線は単栈橋とプレジャーボートの流体力学的相互干渉効果を考慮したときの波力を示している。この計算の場合、図-32に示すように単栈橋が波上側、プレジャーボートが波下側に係留されているため、プレジャーボートに作用する波力は、いずれの成分についても単栈橋に係留されているときに小さくなる。また、波力の低減は、浮栈橋に対する波の透過率が小さい短周期側で大きく、波周期が長くなるにつれて、波が単栈橋をほぼ完全に透過する状態となる(透過率が1.0に近づく)ので、波力はプレジャーボートが単独に存在するときの値に近づく。一方、単栈橋の波力は、プレジャーボートが係留されている状態においても F_y 、 F_z については単栈橋が単独に存在するときと変わらないが、 M_x は大きく変化している。これは、単栈橋とプレジャーボートの相互間に生ずる流体力学的相互干渉によるロールに伴って発生する波の影響と考えられる。

ロ) 単栈橋の流体力

図-35(1)~(6)は、単栈橋の付加質量係数を示す。ただし、図中の値は、単栈橋の質量 $M=44.5\text{ t}$ 、および慣性モーメント $I_x=70.7\text{ t m}^2$ 、 $I_y=785\text{ t m}^2$ 、 $I_z=785\text{ t m}^2$ で除している。いずれも、実線は単栈橋が単独に存在するとき、点線はプレジャーボートが係留されており、その流体力学的相互干渉効果を考慮したときの値である。プレジャーボートが係留されているときの単栈橋の付加質量係数は、単栈橋が単独に存在するときよりも大きくなる傾向にあることがわかり、特にロール運動に対する M_{44} において変化が著しいことがわかる。

図-36(1)~(6)は、単栈橋の減衰係数を示す。ただし、減衰係数の値を単栈橋の質量、または慣性モーメントに $\sqrt{g/L}$ (ここで、 g :重力加速度、 L :浮体長)を乗じた値で除して無次元表記をしている。ロールの減衰係数 C_{44} を除いてプレジャーボートの係留の有無が減衰係数に及ぼす影響は少ないことがわかる。

ハ) プレジャーボートの流体力

図-37(1)~(6)は、プレジャーボートの付加質量係数を示す。ただし、プレジャーボートの質量 $M=11.6\text{ t}$ および慣性モーメント $I_x=20.3\text{ t m}^2$ 、 $I_y=90.6\text{ t m}^2$ 、 $I_z=90.6\text{ t m}^2$ で除して表記している。単栈橋と同じくプレジャーボートの付加質量係数は、流体力学的相互干渉効果を考慮したときに10~20%程度増大する。ただし、サー

ジに関する付加質量係数 M_{11} の変化が小さいことから、浮体の前後動に伴う流体力学的相互干渉効果の影響は小さいことがわかる。

図-38(1)~(6)はプレジャーボートの減衰係数を示す。なお、無次元化の表記は、図-36(1)~(6)のときと同様である。スウェイおよびロールに関する減衰係数 C_{22} 、 C_{44} は周期5 s未満の領域において流体力学的相互干渉効果の影響により小さくなる。このことは、この周期帯において単栈橋とプレジャーボートの流体力学的相互干渉効果によってプレジャーボートの動揺がボートが単独に存在するときと比べて大きくなる可能性を示唆している。

シ) 単栈橋およびプレジャーボートの動揺量

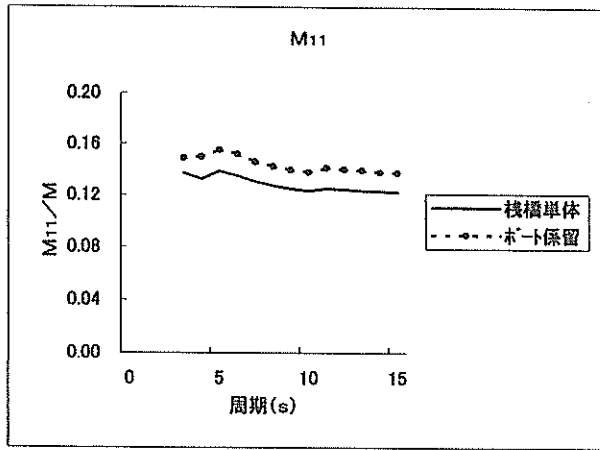
イ) プレジャーボート非係留時の単栈橋の動揺

図-39(1)~(3)は、プレジャーボートが係留されていない単栈橋に波向 0° で規則波が入射するときのサージ、ヒープ、ピッチの動揺量を示す。図-39(1)は、サージの動揺振幅を示すが、図の縦軸はサージの両振幅 $2X$ を波高 H で除して無次元化して表記している。動揺量は短周期側で大きく、長周期側で小さくなる傾向は実験値と計算値で同一であるが、短周期側では、計算値は実験値よりも大きな傾向がみられる。また、波周期7 sにおいて実験値は計算値よりも小さくなっているが、ヒープ、ピッチにおいても同様に実験値は計算値よりも小さくなっていることから、模型を設置した状態における模型と水槽壁面等の中で生じた反射波の影響などにより水理模型実験において設定された波高に誤差があったものと思われる。

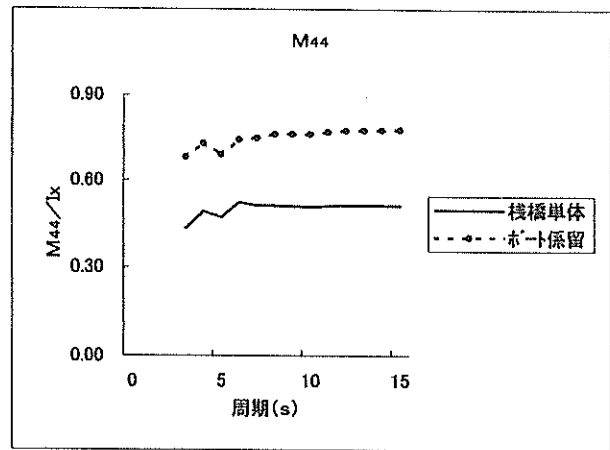
つぎに、図-39(2)は、ヒープの動揺振幅を示すが、図の縦軸はヒープの動揺両振幅 $2Y$ を波高 H で除して無次元化表記している。計算値と実験値は、おおむね一致する傾向がみられるが、波周期7 sにおいては、実験値は計算値よりもかなり小さくなっているが、この原因はサージのところで示したものと同一と考えられる。

また、図-39(3)は、ピッチの動揺振幅を示すが、ピッチの動揺両振幅 2θ に浮体長さの半分 $L/2$ を乗じて得られるピッチによる浮体端部での上下動の両振幅 θL を波高 H で除して無次元化している。ピッチの動揺量が短周期側で大きく、かつ長周期側では小さくなる傾向は計算値と実験値についておおむね一致しているが、全体として、やや実験値が計算値よりも大きい傾向がみられる。また、波周期7 sにおける相違はサージ、ヒープと同様に大きい。水理模型実験では、ポンツーンに係留用の空隙が存在するが、計算ではこの空隙を無視して完全な箱形浮体として計算したこと、水理模型実験では、直接ピッチの回転角を計測せず、浮体の鉛直加速度を浮体の波上側、波下側位置で計測した値を積分し、上下変位を求

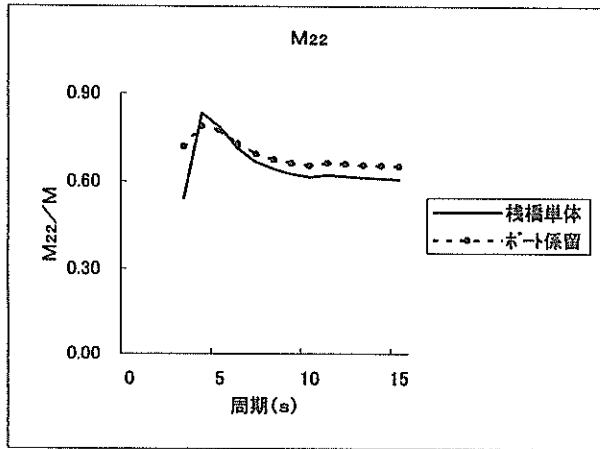
単棧橋・流体力（付加質量）



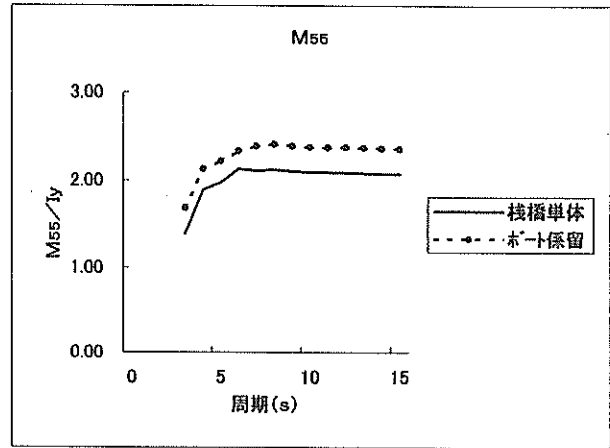
(1) サージ



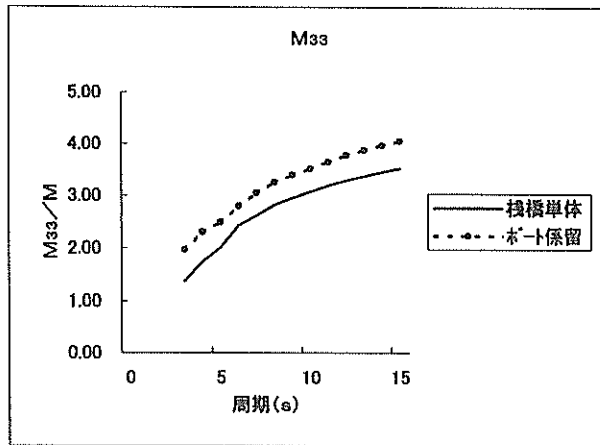
(4) ロール



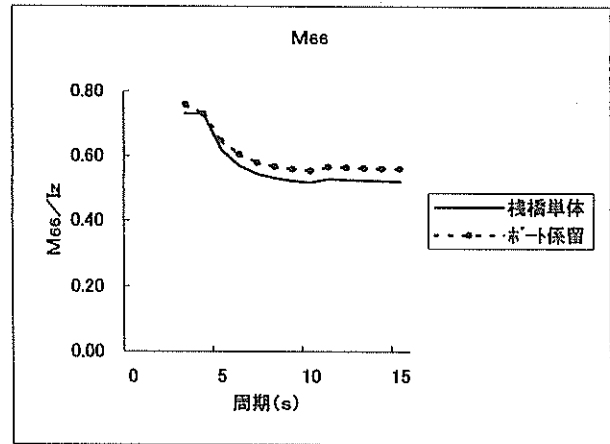
(2) スウェイ



(5) ピッチ



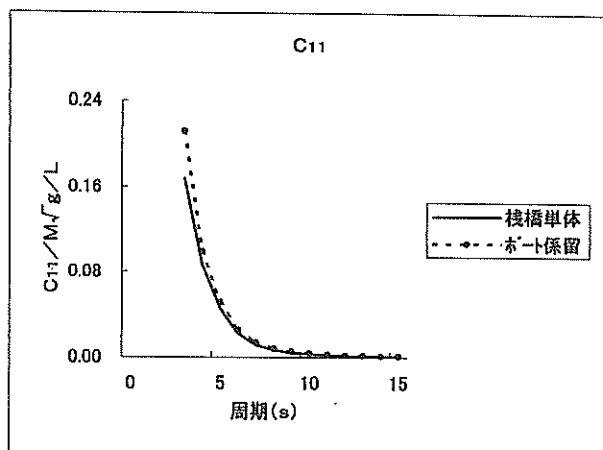
(3) ヒーブ



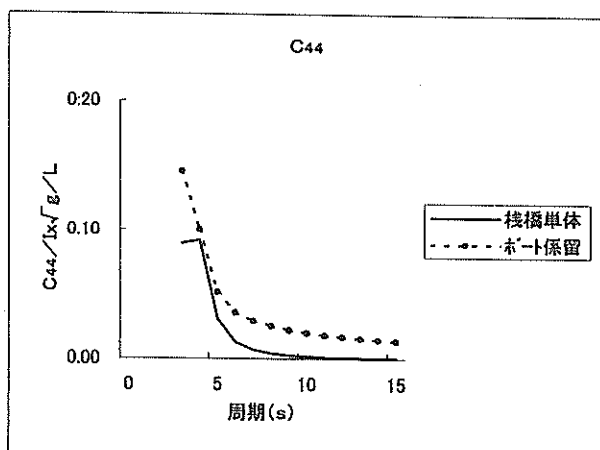
(6) ヨウ

図-35 単棧橋の付加質量係数

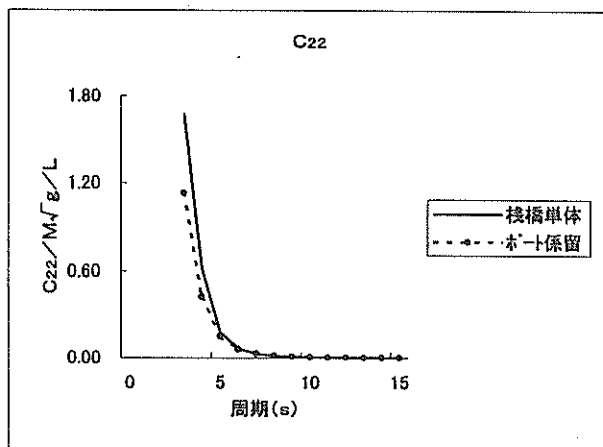
単棧橋・流体力（減衰係数）



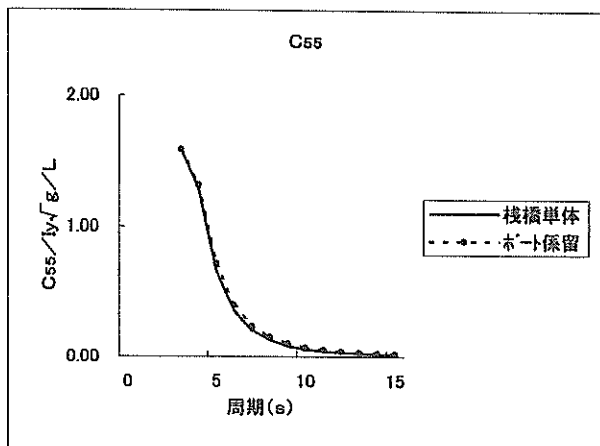
(1) サージ



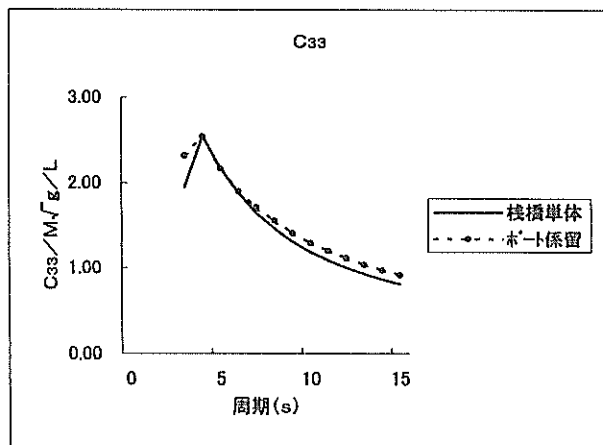
(4) ロール



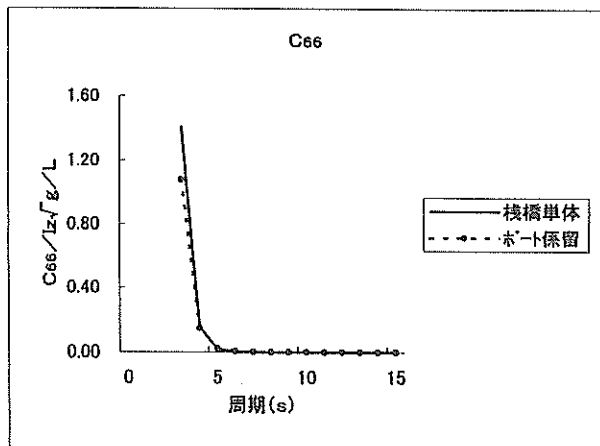
(2) スウェイ



(5) ピッチ



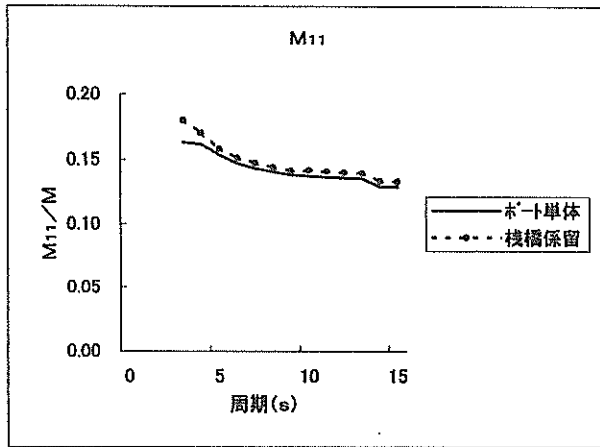
(3) ヒープ



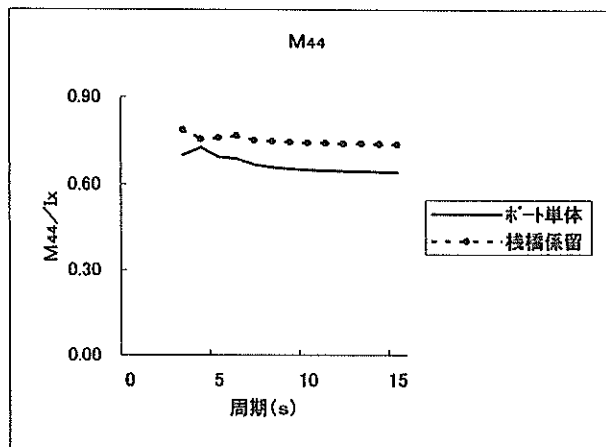
(6) ヨウ

図-36 単棧橋の減衰係数

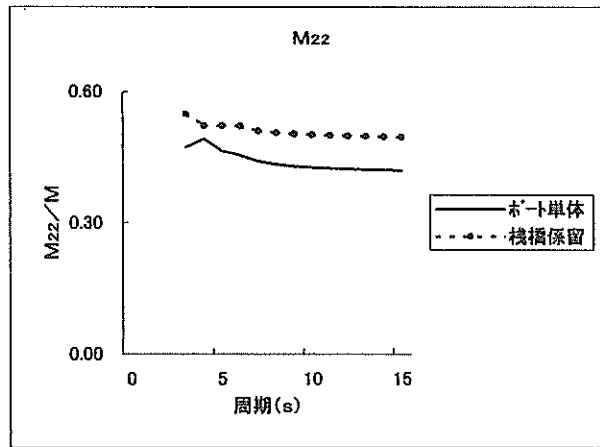
プレジャーボート・流体力（付加質量）



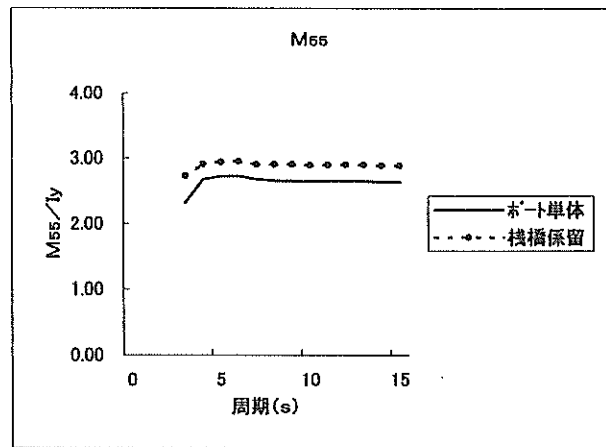
(1) サージ



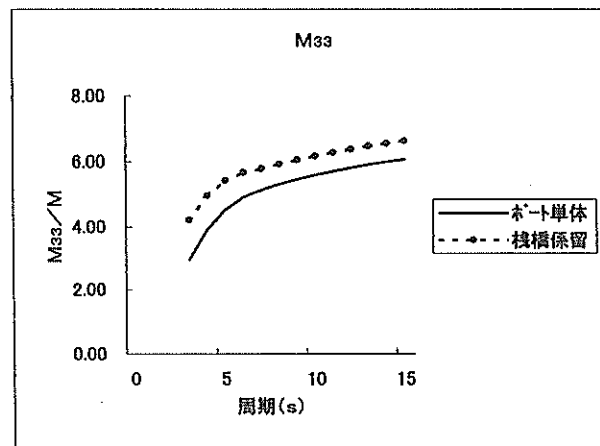
(4) ロール



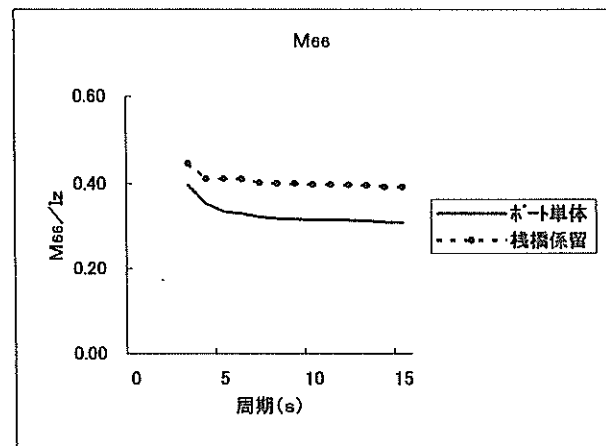
(2) スウェイ



(5) ピッチ



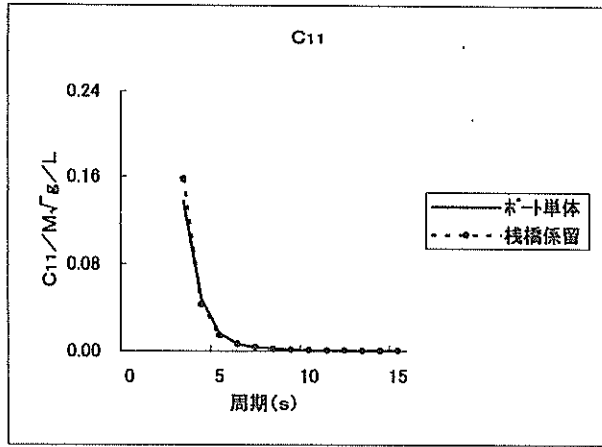
(3) ヒープ



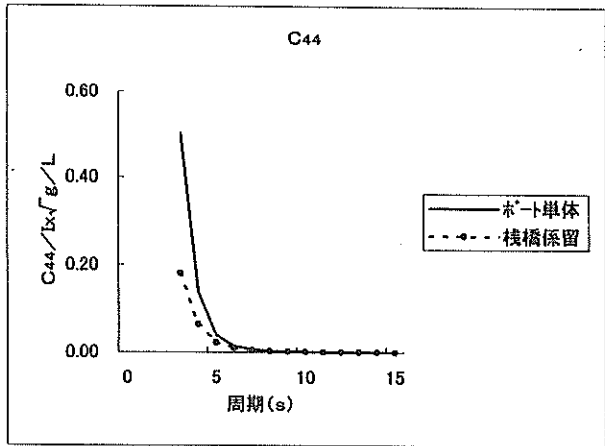
(6) ヨウ

図-37 プレジャーボートの付加質量係数

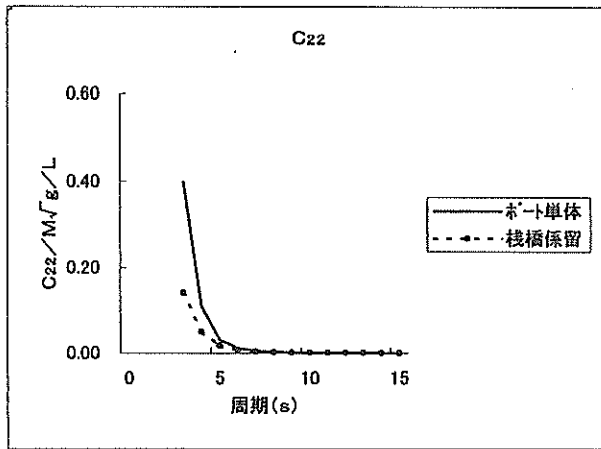
プレジャーボート・流体力（減衰係数）



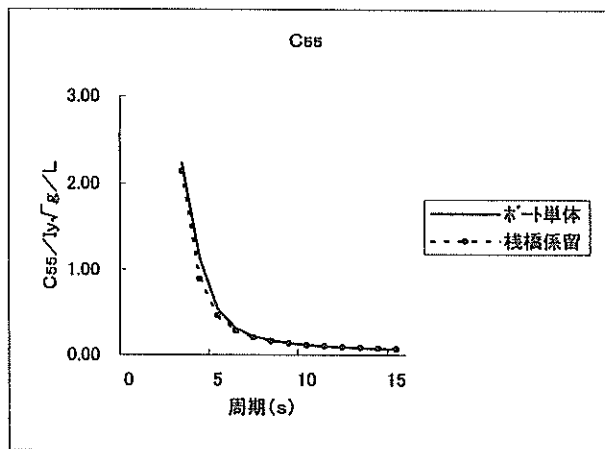
(1) サージ



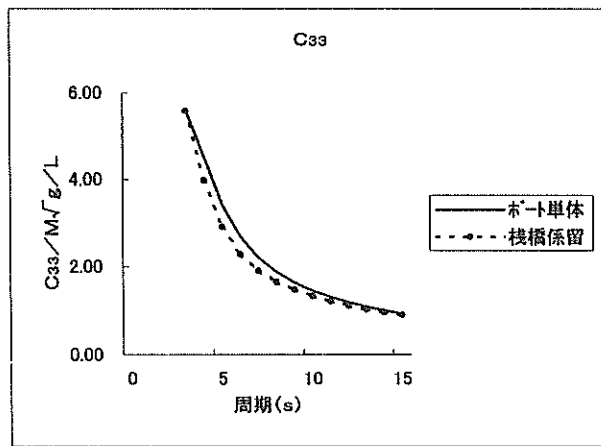
(4) ロール



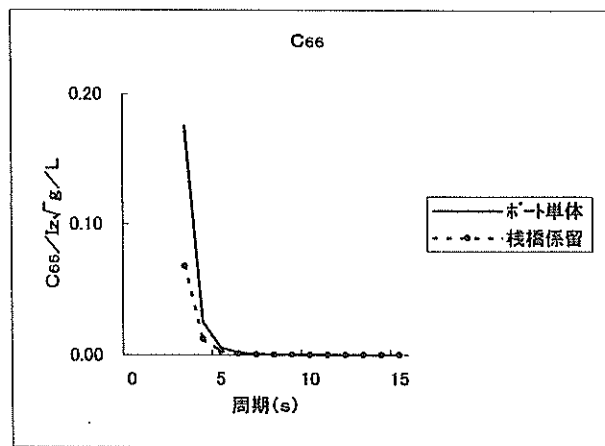
(2) スウェイ



(5) ピッチ

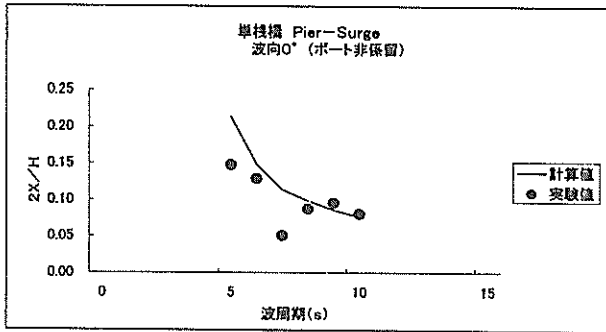


(3) ヒープ

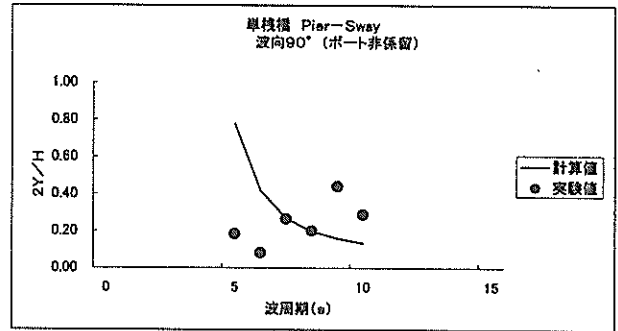


(6) ヨウ

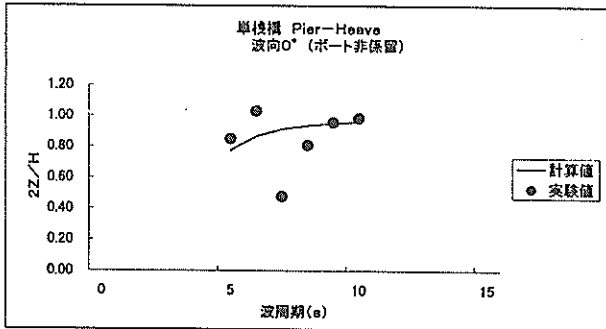
図-38 プレジャーボートの減衰係数



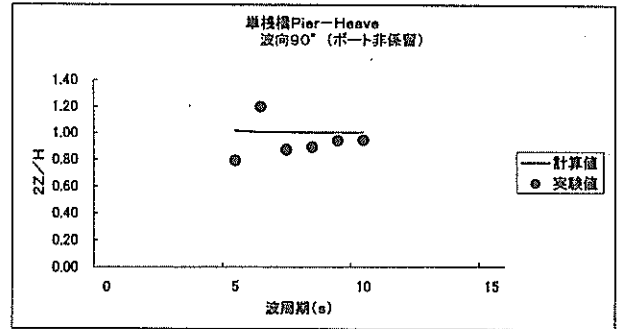
(1) サージ, 波向0°



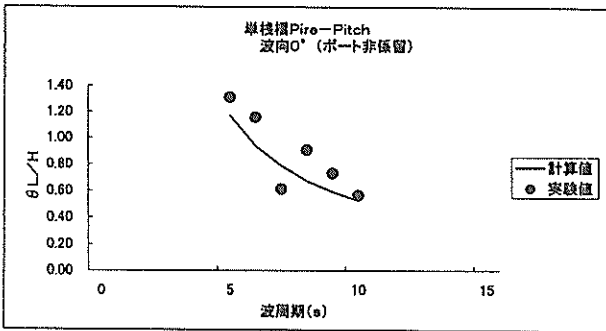
(1) スウェイ, 波向90°



(2) ヒープ, 波向0°



(2) ヒープ, 波向90°



(3) ピッチ, 波向0°

図-40 単栈橋の動揺量

図-39 単栈橋の動揺量

め、さらにこれよりピッチの角度を求めたことが相違の原因と考えられる。しかしながら、これらの事情を勘案すると計算値は実験値とおおむね一致していると考えられる。

図-40 (1)~(2)はプレジャーボートが係留されていない単栈橋に波向90°で規則波が入射するときのスウェイ、ヒープの動揺量を示す。波向90°ではロールも卓越するが、実験値が得られていないので示していない。まず、図-40 (1)はスウェイの動揺振幅を示すが、図の縦軸は、スウェイの両振幅 $2Y$ を波高 H で除して無次元化して表記している。計算値では短周期側で動揺量が大きく、長周期側で動揺量が小さくなる傾向にあるが、実験値では、必ずしもその傾向が現れておらず、とくに短周期側での計算値と実験値の差異が大きい。この原因は定かではな

いが、計算では浮体を拘束するばねを線形ばねとしてモデル化しているが、実際に水理模型実験に用いた係留ばねには若干の非線形性があったため、動揺特性に相違が生じたものと考えられる。

つぎに、図-40(2)はヒープの動揺振幅を示すが、図の縦軸はヒープの両振幅 $2Z$ を波高 H で除して無次元化して表記している。計算値では、波周期によらず $2Z/H$ はおおむね 1.0 であるのに対して、実験値では、波周期 6.0 s において計算値よりも約 20% 大きくなっており、波周期による周波数特性の変化が生じているが、全体としては、計算値と実験値はおおむね一致していると考えられる。

ロ) プレジャーボート係留時の単栈橋およびプレジャーボートの動揺

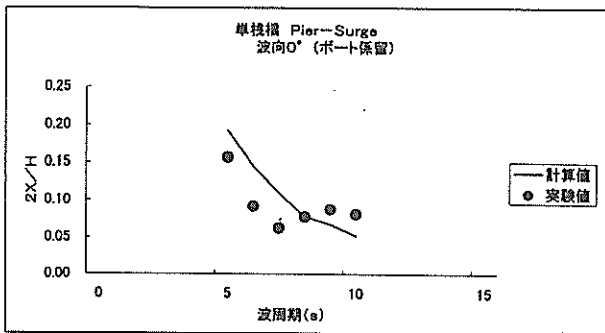
図-41(1)~(3)は、波向0°から規則波が入射する際のプレジャーボート係留時の単栈橋の動揺量を示す。縦軸の無次元化は、図-39と同様である。

まず、図-41(1)は単栈橋のサージの動揺振幅を示すが、計算値は短周期側で大きく、長周期側で小さくなる傾向にある。実験値もこれに似た性状を示すが、短周期側では、計算値よりもかなり小さくなる。波周期 6~7 s において実験値は、計算値よりもかなり小さくなっているが、この傾向は、ヒープ、ピッチにおいても同様に生じている。入射波の検定の際の入反射波分離計算の結果では、

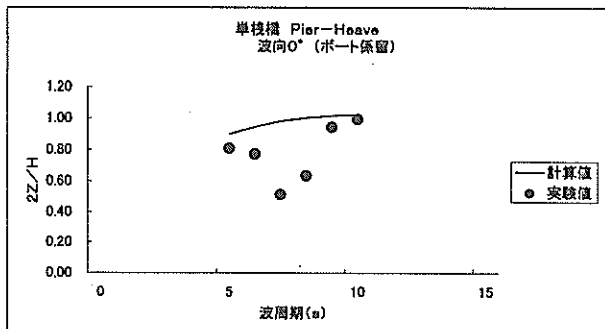
水槽内での壁面からの反射波の影響が少なくなかったことから、これらの周期においては実験波の波高の設定にやや問題があったものと考えられる。

つぎに、図-41(2)は単栈橋のヒープの動揺振幅を示すが、計算値においては、周期が長くなるにつれて、応答倍率 $2Z/H$ が1.0に近づく傾向にある。実験値においても、おおむね同様な傾向がみられるが、波周期7s, 8sにおいては、実験値は計算値よりもかなり小さくなっているが、サージのところで示したように水槽内の反射波の影響などで実験波の波高の設定値にやや問題があったものと考えられる。

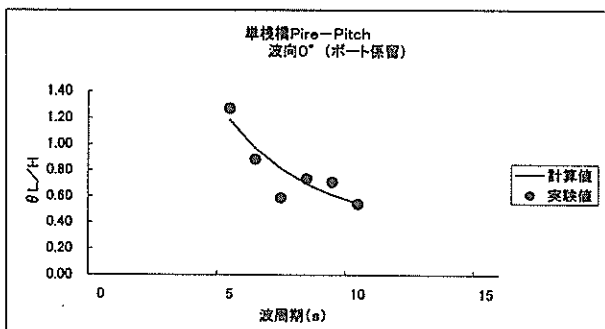
また、図-41(3)は単栈橋のピッチの動揺振幅を示す。



(1) サージ, 波向0°



(2) ヒープ, 波向0°



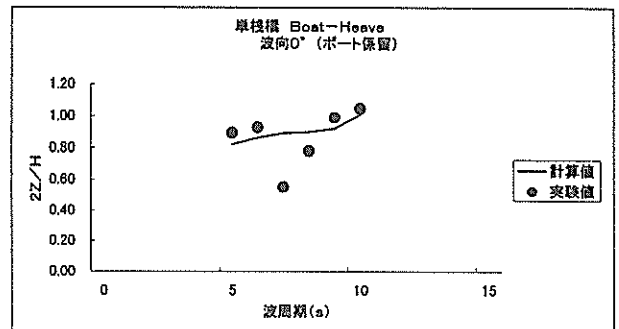
(3) ピッチ, 波向0°

図-41 単栈橋の動揺量

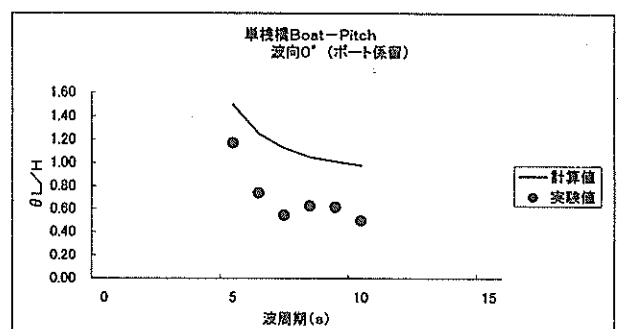
動揺振幅は計算値と実験値のいずれについても短周期側で大きく、長周期側で小さくなる傾向がみられる。波周期7sにおいては、実験値が計算値よりも小さくなる傾向は、サージおよびスウェイと同様であるが、その他の周期においては、実験値と計算値はおおむね一致している。

図-42(1)~(2)は、波向0°から規則波が入射する際のプレジャーボートの動揺量を示す。まず、図-42(1)は、プレジャーボートのヒープの動揺振幅を示すが、計算値、実験値とも波周期が長くなるにつれて $2Z/H$ は1.0に近づく傾向にある。ただし、波周期7s, 8sにおいては、単栈橋のヒープの動揺量と同様に実験値は計算値よりも小さく、先にも述べたように、これらの周期において水理模型実験における波高の設定にやや問題があったものと考えられる。これらの波周期を除くと計算値は実験値にほぼ等しい。

つぎに、図-42(2)は、プレジャーボートのピッチの動揺振幅を示すが、計算値、実験値ともに短周期波側で動揺振幅が大きく、長周期波側で小さくなる傾向にある。ただし、動揺振幅の実験値は計算値の約1/2である。この傾向は、前出の図-31(3)に示した栈橋を固定状態とした数値計算においても同様の傾向が示されていたことから



(1) ヒープ, 波向0°



(2) ピッチ, 波向0°

図-42 プレジャーボートの動揺量

流体力係数のうちの減衰定数を修正する必要があるものと思われる。

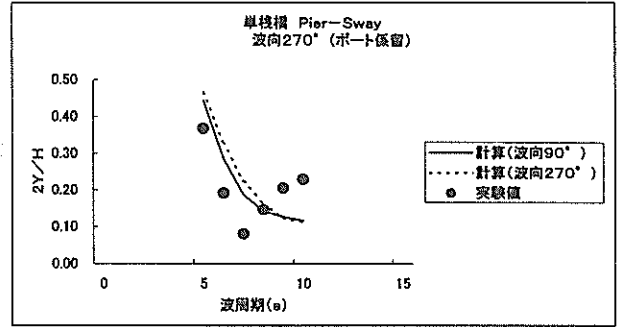
図-43(1)～(2)は、単棧橋にプレジャーボートが係留されており、波向が 90° および 270° の規則波が作用するときの単棧橋のスウェイ、ヒープの動揺振幅を示す。計算の際の座標系は図-32に示したとおりであるので、波向が 90° のときは、単棧橋がプレジャーボートに対して波上側、波向が 270° のときはプレジャーボートが単棧橋に対して波上側となる。

まず、図-43(1)は単棧橋のスウェイの動揺振幅を示す。図中において、実線は波向 90° 、点線は波向 270° の計算値を示すが、両者の相違は小さいことがわかる。また、●は、波向 270° に対する実験値を示すが、計算値は、振幅は実験値とおおむね等しいものの、周波数特性はやや異なる傾向を示している。この傾向はプレジャーボートが非係留時の単棧橋のスウェイ動揺振幅を示した図-40(1)と同様である。つぎに、図-43(2)は単棧橋のヒープを示す。計算値では、とくに短周期側において波向 90° の値が波向 270° の値よりも大きく、単棧橋がプレジャーボートの波上側に位置することの影響があらわれている。一方、実験値は、波周期6sを除いて計算値よりも全体的にやや小さい傾向にあるといえるが、全般的には、計算値は実験値とおおむね一致しているといえる。

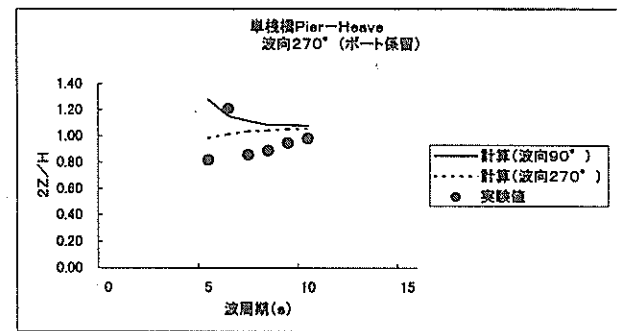
図-44(1)～(2)は、単棧橋にプレジャーボートが係留されており、波向が 90° および 270° の規則波が作用するときのプレジャーボートのヒープ、ロールの動揺両振幅を示す。

まず、図-44(1)はプレジャーボートのヒープの動揺両振幅を示す。計算値においては、波上側から波が入射する 270° においてプレジャーボートの動揺振幅が大きくなっており、この傾向は短周期側で著しい。単棧橋では波向 270° の方が計算値の動揺振幅が小さくなっていったことから、単棧橋、プレジャーボートのいずれについても波下側に位置する浮体の動揺振幅が小さくなっていることがわかる。一方、実験値については、波周期6s、7s、9s、10sにおいて $2Z/H$ が1.2～1.3となっており、単棧橋からの反射波の影響があるものと思われる。反射波の影響が実験と計算において異なっている原因としては、水槽の壁面での消波が完全でなかったことによる壁面からの反射波との干渉が考えられる。つぎに、図-44(2)は、プレジャーボートのロールの動揺両振幅を示すが、計算値については、短周期側では波向 90° のときが大きく、ヒープの周波数特性と異なっている。一方、長周期波側では、 90° と 270° との波向による動揺振幅の相違が大きくない。一方、実験値は、これらの計算値の

いずれと比較しても小さく、前出の図-31(6)において、ロールの非線形粘性減衰係数の影響について指摘してい

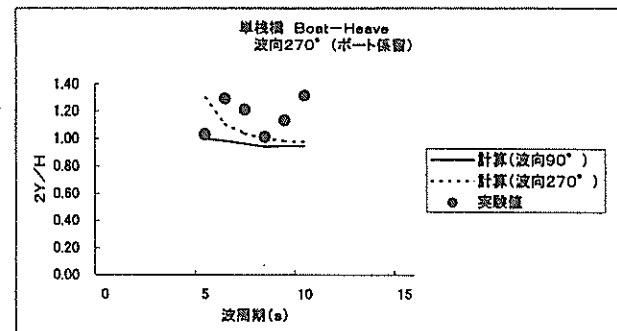


(1) スウェイ, 波向 90°

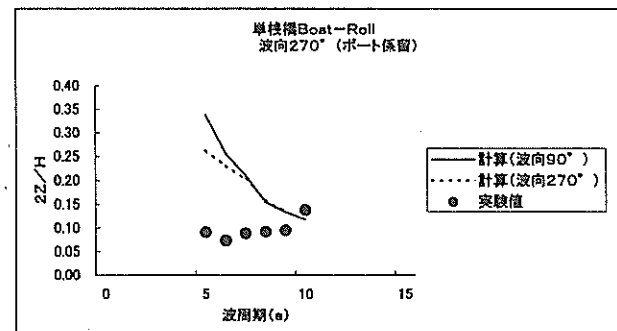


(2) ヒープ, 波向 270°

図-43 単棧橋の動揺量



(1) ヒープ, 波向 270°



(2) ロール, 波向 270°

図-44 プレジャーボートの動揺量

るが、複数浮体の解析モデルでは、ロールの減衰定数を修正せずに計算値そのものを用いて動揺計算したことが実験値と計算値との相違の主たる原因と思われる。

4. 4 くし型栈橋とプレジャーボートの流体力および動揺

(1) 解析モデル

図-45 はくし形浮体にプレジャーボートが4隻係留しているときの解析モデルを示す。X軸はくし型栈橋の長軸方向に、また、Y軸は、これと直交方向にとっている。波力の計算は、波向 0° および波向 90° に対して行っており、波向 0° では、主栈橋に対してはサージ方向の波力 F_x 、ヒープ方向の波力 F_z 、ピッチ運動に対する波力モーメント M_y が卓越する。ただし、プレジャーボートについては、この波向では、スウェイ、ヒープ、ロールが卓越するが、くし型栈橋と力の方向を合わせるため、ここではそれぞれ、波力について栈橋と同様に F_x 、 F_z 、 M_y と表記する。一方、波向 90° では、主栈橋に対しては、スウェイ方向の波力 F_y 、ヒープ方向の波力 F_z 、ロール運動に対する波力モーメント M_x が卓越する。ただし、プレジャーボートに対しては、この波向では、サージ、ヒープ、ピッチが卓越するが、ここでは波力について栈橋と同様に F_y 、 F_z 、 M_x と表記する。

(2) 波力および流体力係数

a) くし型栈橋の波力

図-46(1)~(3)はくし型栈橋に波向 0° で波が入射するときの波力を示す。表示している波力は、サージ方向の波力 F_x 、ヒープ方向の波力 F_z 、ピッチ運動に対する波力モーメント M_y であり、それぞれ主栈橋の諸元を用いて図-33および図-34と同様に無次元化して表記している。

ここでは、 $L=34.4\text{m}$ 、 $B=4.0\text{m}$ 、 $d=0.8\text{m}$ を用いて無次元化している。図中の実線はくし型栈橋が単独に存在するとき、点線はプレジャーボートが存在するときのくし型栈橋の波力である。波向 0° における波力では、プレジャーボートの係留の有無による変化が小さいことがわかる。ただし、ヒープ方向の波力 F_z の短周期側では、プレジャーボートの係留の影響がやや生じている。図-46(4)~(6)は、くし型栈橋に波向 90° で波が入射するときの波力を示す。図示した波力はスウェイ方向の波力 F_y 、ヒープ方向の波力 F_z 、ロール運動に対する波力モーメント M_x であり、無次元化の表記は、図-46(1)~(3)と同様である。この場合にもプレジャーボートの係留の有無による波力の変化はあまり大きくないが、スウェイ方向の波力 F_y の短周期側、ロール運動に対する波力モーメント M_x の波周期5s~10sの領域でプレジャーボート係留時の波力が非係留時よりも若干低減している。

b) くし型栈橋の流体力

図-47(1)~(6)は、くし型栈橋の付加質量係数を示す。ただし、くし型栈橋の質量 $M=266\text{t}$ 、および慣性モーメント、 $I_x=1.34 \times 10^4\text{t m}^2$ 、 $I_y=1.79 \times 10^4\text{t m}^2$ 、 $I_z=3.08\text{t m}^2$ で除している。いずれも実線が単栈橋が単独で存在するときの値を、点線がプレジャーボートが係留されているときの値を示す。 M_{33} を除いて、くし型栈橋の付加質量係数はプレジャーボートの係留の有無にかかわらずほぼ等しい。ただし、短周期側では、流体力学的相互干渉効果の影響が生じている。ヒープの付加質量係数 M_{33} は他の動揺成分と異なる傾向を示していて、プレジャーボートが係留しているときの付加質量係数がやや大きくなっている。

図-48(1)~(6)は、くし型栈橋の減衰係数を示す。プレ

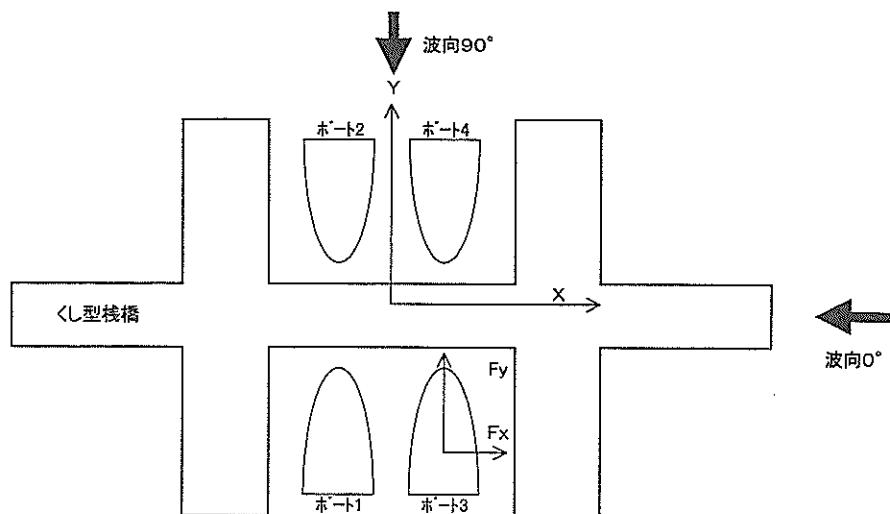
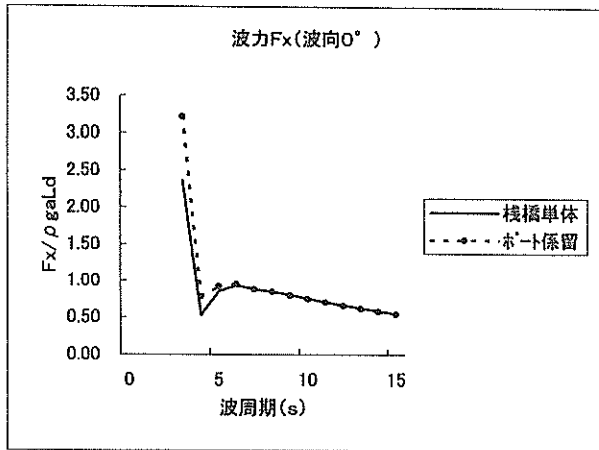
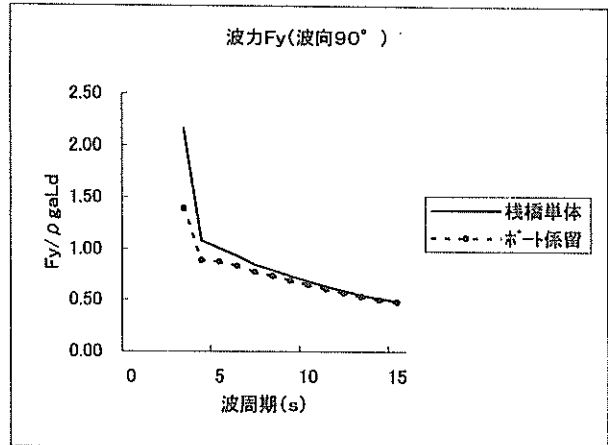


図-45 くし型栈橋の解析モデル

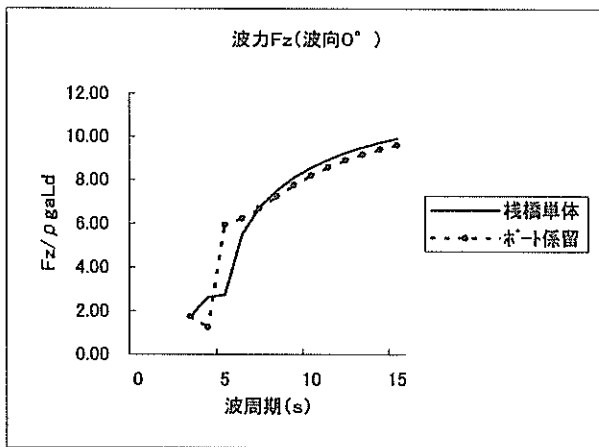
くし型 棧橋・波力



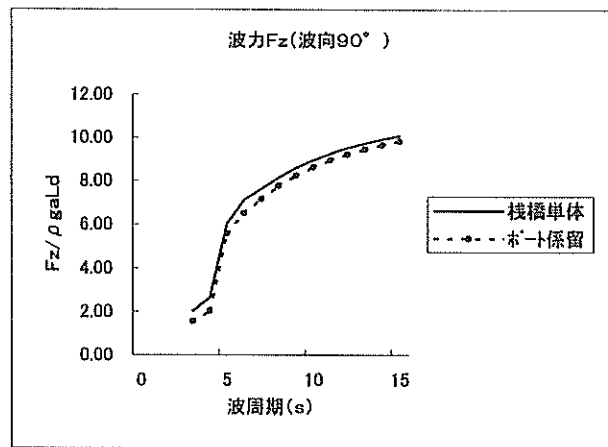
(1) F_x 波向 0°



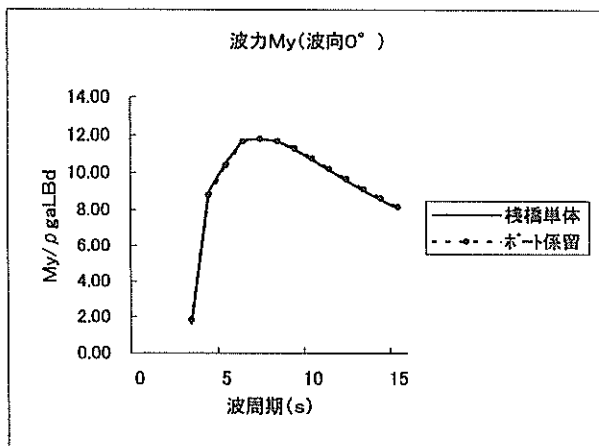
(4) F_y 波向 90°



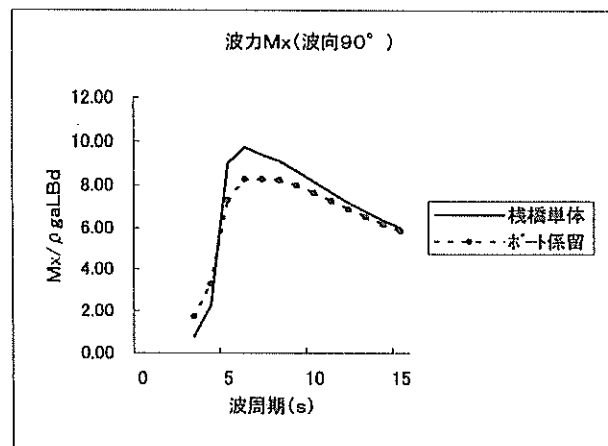
(2) F_z 波向 0°



(5) F_z 波向 90°



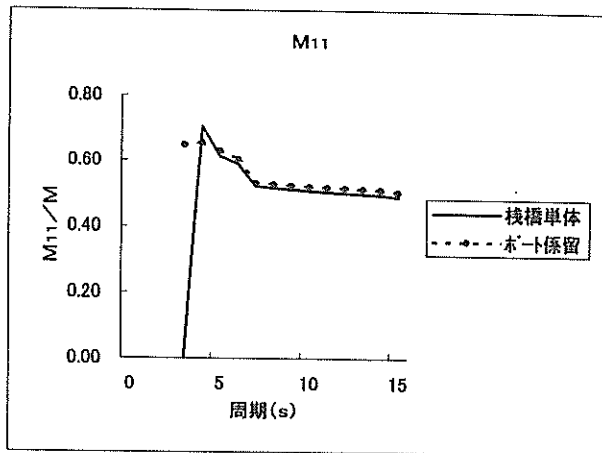
(3) M_y 波向 0°



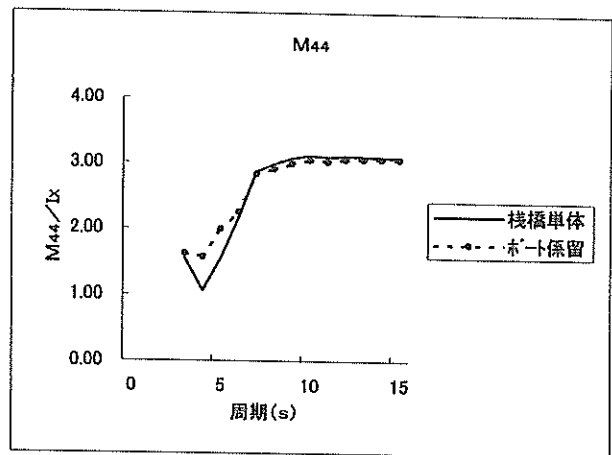
(6) M_x 波向 90°

図-46 くし型棧橋の波力

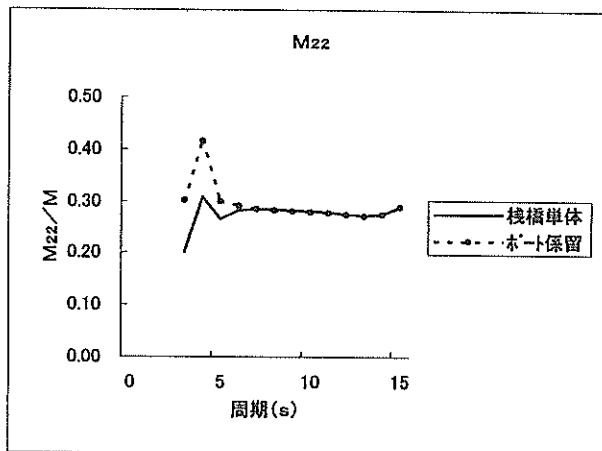
くし型棧橋・流体力(付加質量)



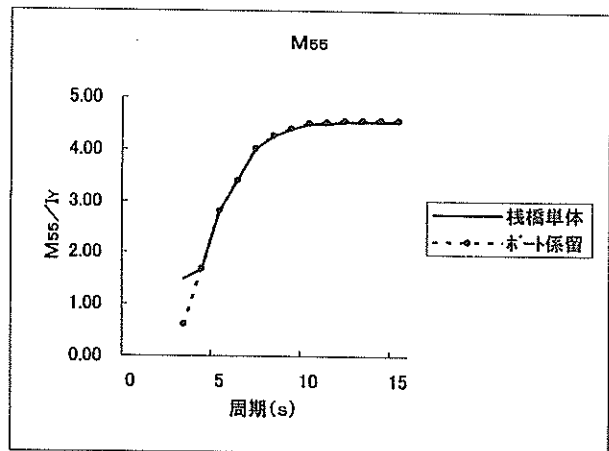
(1) サージ



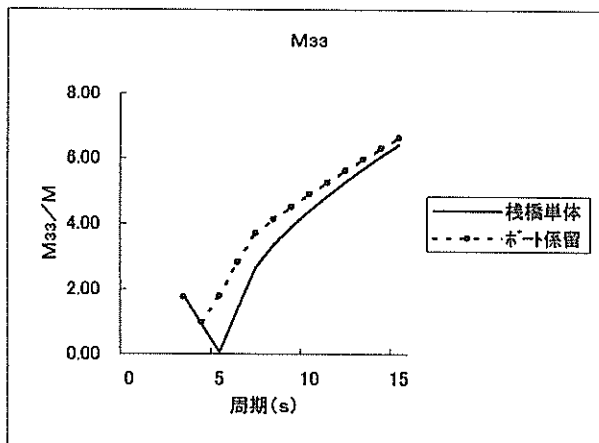
(4) ロール



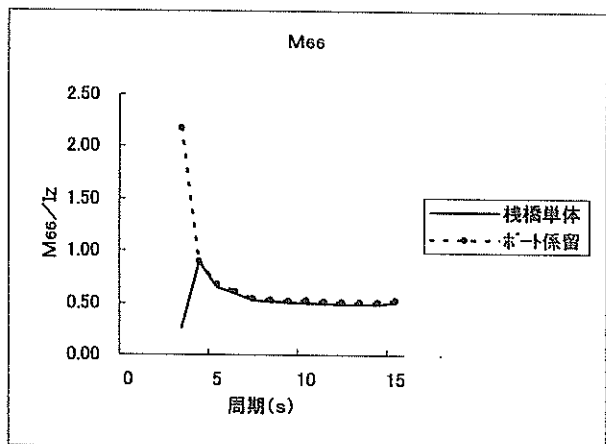
(2) スウェイ



(5) ピッチ



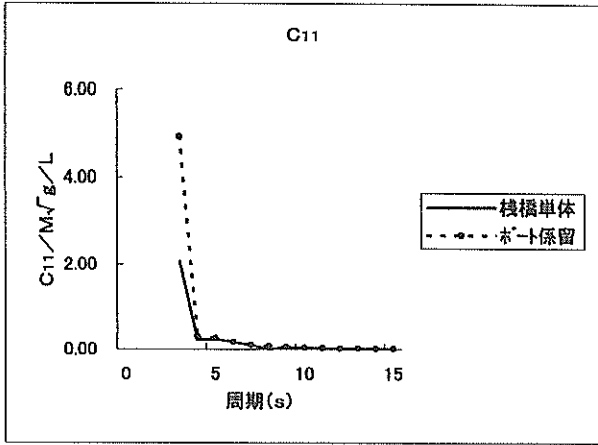
(3) ヒープ



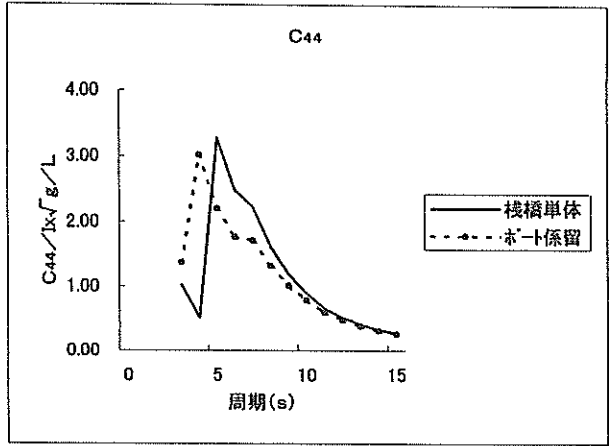
(6) ヨウ

図-47 くし型棧橋の付加質量係数

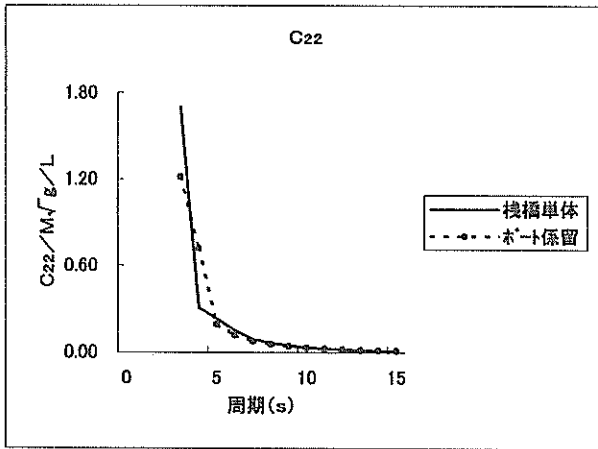
くし型棧橋・流体力（減衰係数）



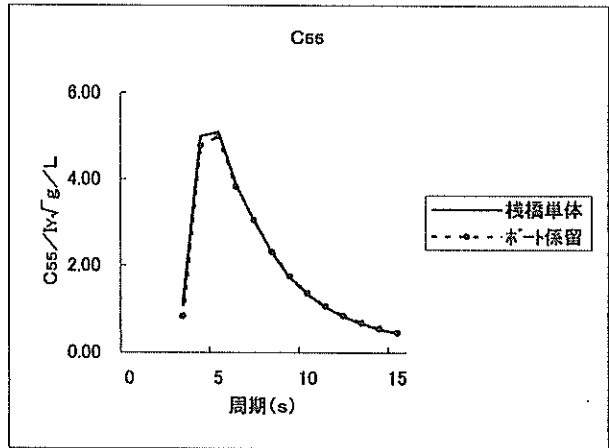
(1) サージ



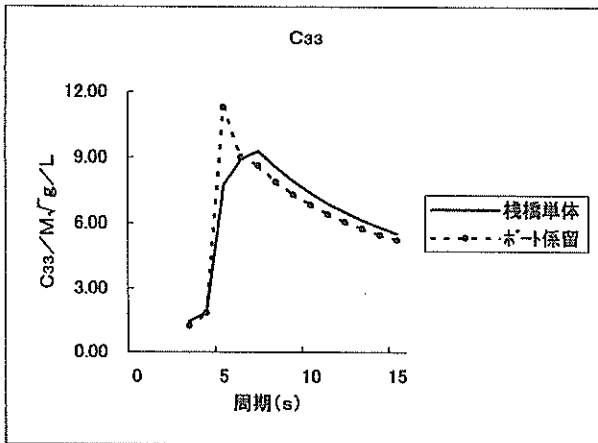
(4) ロール



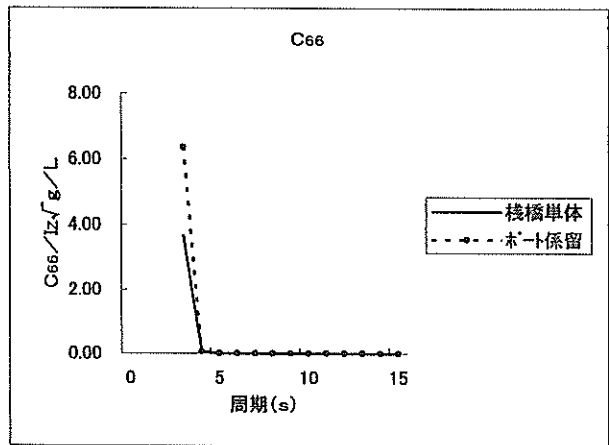
(2) スウェイ



(5) ピッチ



(3) ヒープ



(6) ヨウ

図-48 くし型棧橋の減衰係数

ジャーボートの係留の有無の影響はロールの減衰係数 C_{rr} において周波数特性が異なる状態となっており、プレジャーボートが係留することによって減衰係数の値のピークを示す周期が短周期側に移動する。これに対して、他の動揺成分では、プレジャーボートの係留による減衰係数の変化は少ない。ただし、 C_{11} の周期3s、 C_{33} の周期5s、 C_{55} の周期3sではプレジャーボートの係留時に減衰係数の増加がみられる。

c) くし型栈橋に係留されたプレジャーボートの波力

図-49(1)~(6)は、くし型栈橋に係留されたプレジャーボートの波力を示す。まず、図-49(1)~(3)は、波向 0° の場合の波力を示すが、 F_x 、 M_y は、プレジャーボートがくし型栈橋に係留されている場合には、ボートが単独に存在する場合に比べて波力および波力モーメントが小さくなるのがわかる。栈橋に対して波上側と波下側のプレジャーボートに作用する波力は波周期4s以下で若干の相違があるものの、4s以上の周期においてはほとんど差がないことがわかる。くし型栈橋に係留されているときのヒープ方向の波力 F_z は、プレジャーボートが単独に存在する場合に比べて差が生じており、長周期側では、プレジャーボートが単独に存在するときに比べて波力が低減し、しかも波上側のプレジャーボートより、波下側のほうが波力が小さくなるのがわかる。ただし、波周期5s前後の周期においてはプレジャーボートがくし型栈橋に係留されているときのほうが波力が大きくなっており、この周期帯において、くし型栈橋とプレジャーボートの流体力の相互干渉効果が大きいことがわかる。

つぎに、図-49(4)~(6)は波向 90° の場合の波力を示す。まず F_y は波周期6s以下の領域において波上側の波力が波下側よりも大きく、さらに、波周期4s以下ではプレジャーボートが単独で存在するときの波力を上回る。これは、主栈橋による反射波がプレジャーボートに作用するためである。一方、短周期の波に対しては波下側のプレジャーボートは主栈橋によって波が遮蔽されることから波力が著しく低減している。しかしながら、波周期10s以上になると波はくし型栈橋をほとんど透過する状態となることから波上側および波下側のプレジャーボートに作用する波力はプレジャーボートが単独で存在するときの値にほぼ等しくなる。つぎに、波下側のプレジャーボートのヒープ方向の波力 F_z は、どの周期においても波上側のプレジャーボートに作用する波力、プレジャーボート単体時の波力よりも大きく、波が栈橋で遮蔽されることの影響が顕著に生じている。波力モーメント M_x は、波周期6s以上においてプレジャーボートが単独に存在するときの値よりも小さくなる。また、逆に波周期

6s以下では、波上側のほうが波下側のプレジャーボートに作用する波力モーメントよりも大きい、波周期6s以上では波下側の方がやや大きくなっている。

d) くし型栈橋に係留されたプレジャーボートの流体力

図-50(1)~(6)は、くし型栈橋に係留されたプレジャーボートの付加質量係数を示す、この図は、図-45に示したくし型栈橋係留時のプレジャーボートの付加質量係数をくし型栈橋に係留していないときの数値と比較したものである。無次元などの表記は、図-37と同様である。

図-37と図-50とを比べて、プレジャーボートの付加質量係数に関する栈橋との流体力学的相互干渉効果は、単栈橋に係留されているときと、くし型栈橋に係留されているときとで幾つかの相違がみられる。ここでは、それらの相違等について以下にまとめる。

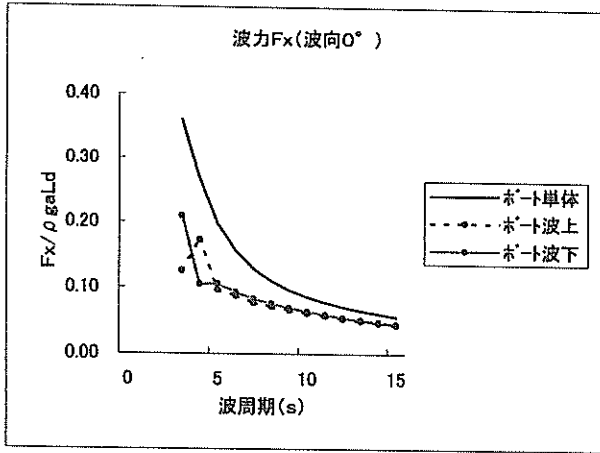
- ①サージの付加質量係数に与える流体力学的相互干渉効果は、単栈橋に係留されているとき、くし型栈橋に係留されているときのいずれについても非常に小さい。
- ②スウェイの付加質量係数に与える流体力学的相互干渉効果は、単栈橋係留時のときの方が大きい。ただし、くし型栈橋係留時の波周期3sにおいては流体力学的相互干渉効果が著しく大きくなる。
- ③ヒープの付加質量係数は、単栈橋係留時とくし型栈橋係留時において、おおむね同様の増加傾向を示すが、くし型栈橋係留時の波周期3sにおける係数値の増大の仕方が著しい。
- ④ロールの付加慣性モーメント係数は、単体で存在するプレジャーボートに対する値に比べると、単栈橋係留時には増加傾向にあり、一方、くし型栈橋係留時には減少傾向にある。
- ⑤ピッチの付加慣性モーメント係数の増減傾向はロールのときとおおむね等しい。
- ⑥ヨウの付加慣性モーメント係数は、単栈橋係留時には増加するが、くし型栈橋係留時には増加しない。

図-51(1)~(6)はくし型栈橋に係留されたプレジャーボートの減衰係数を示す。この図は、図-45に示したくし型栈橋に係留されたプレジャーボートの減衰係数をくし型栈橋に係留していないときのものと比較したものである。無次元化等の表記は、図-38と同様である。

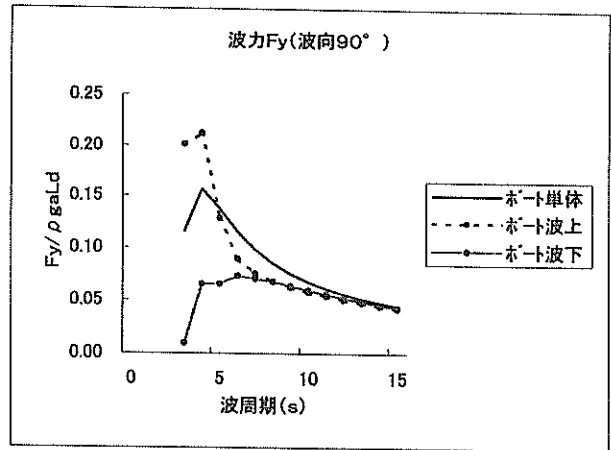
図-51と図-38とを比べてプレジャーボートの減衰係数に関する栈橋との流体力学的相互干渉効果は以下のようにとりまとめられる。

- ①ヒープ、ピッチの流体力学的相互干渉効果は、単栈橋係留時には、非常に小さいが、くし型栈橋係留時の短周期側(3s~4s付近)では、大きくなる。
- ②その他の動揺成分については、単栈橋係留時とくし型

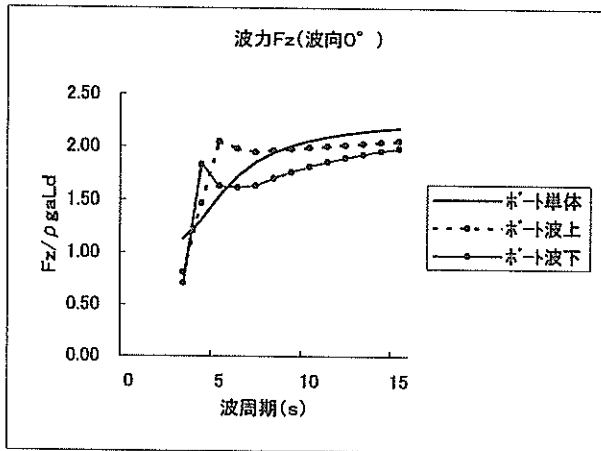
プレジャーボート・波力



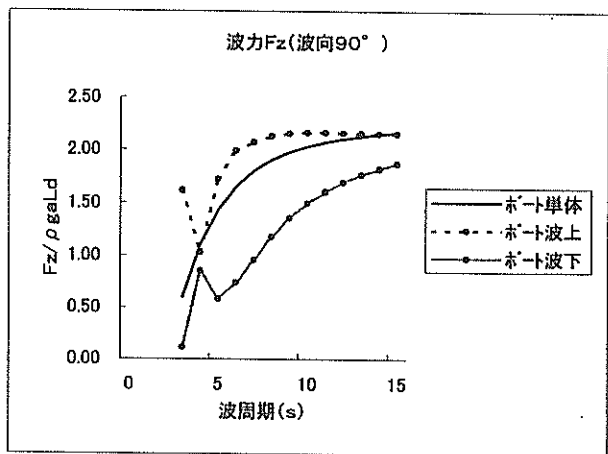
(1) F_x 波向 0°



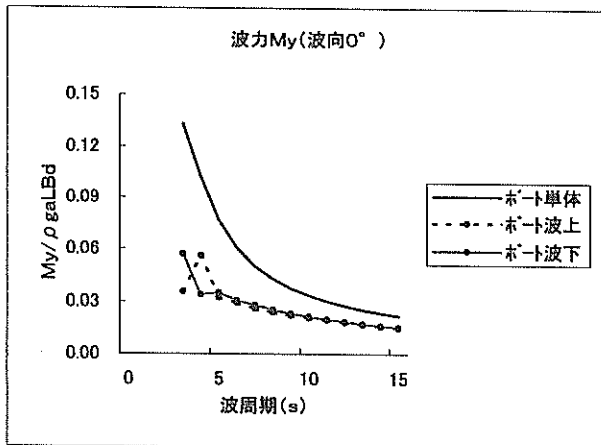
(4) F_y 波向 90°



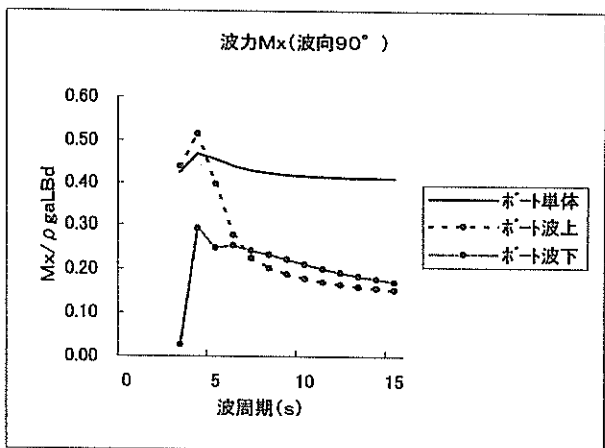
(2) F_z 波向 0°



(5) F_z 波向 90°



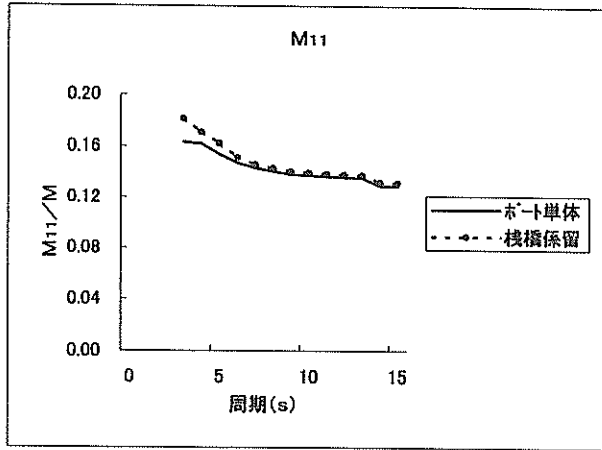
(3) M_y 波向 0°



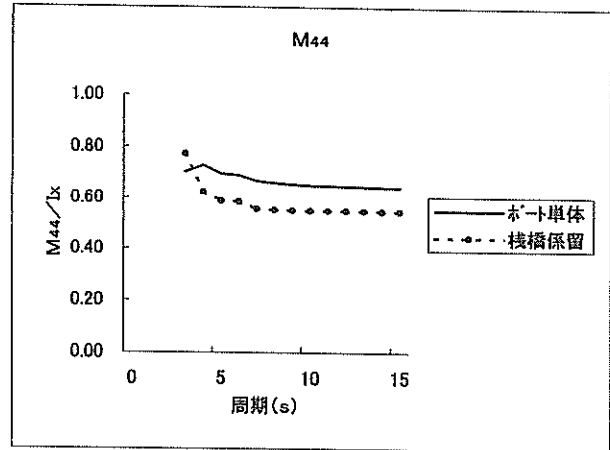
(6) M_x 波向 90°

図-49 くし型栈橋に係留されたプレジャーボートの波力

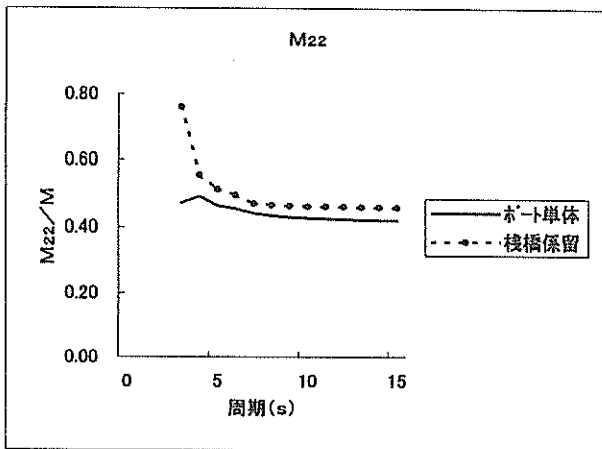
プレジャーボート・流体力（付加質量）



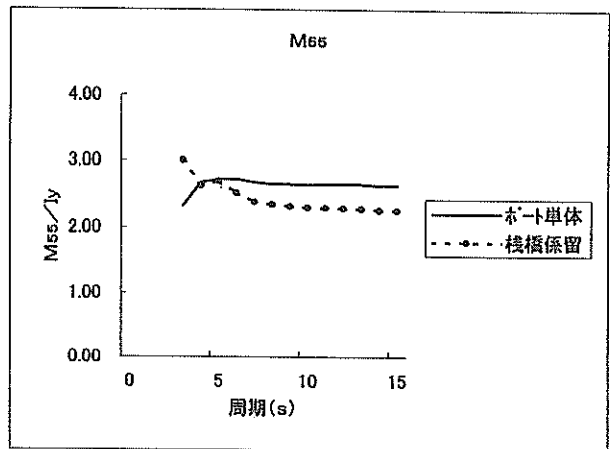
(1) サージ



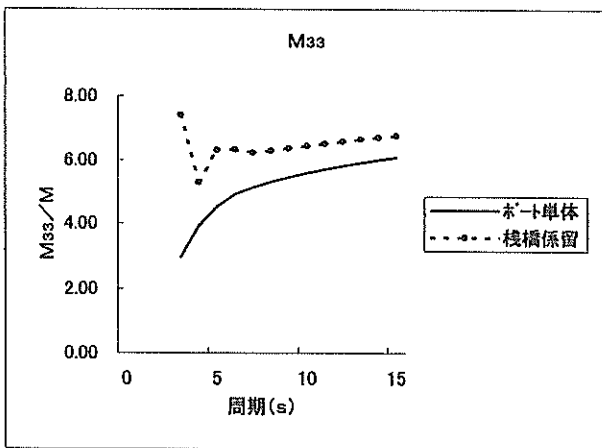
(4) ロール



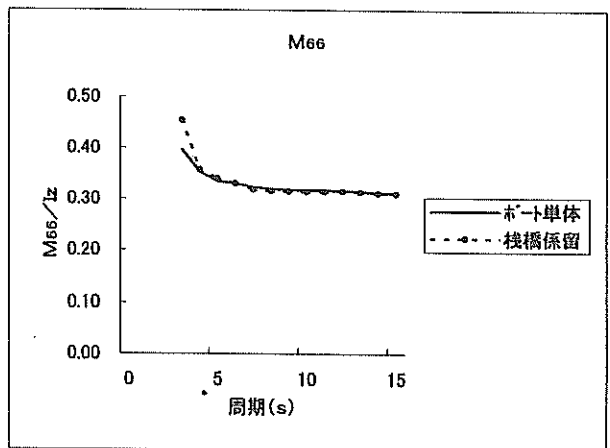
(2) スウェイ



(5) ピッチ



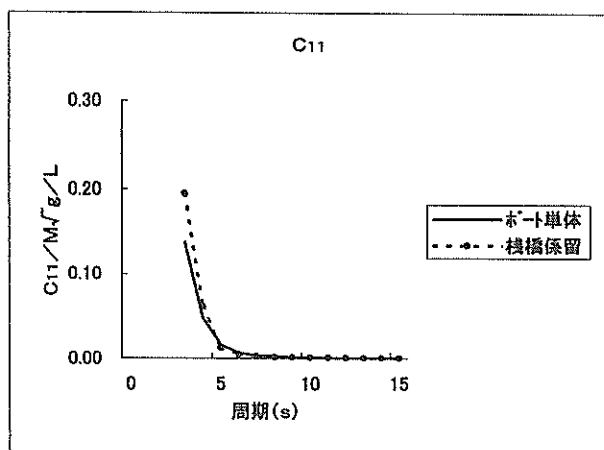
(3) ヒープ



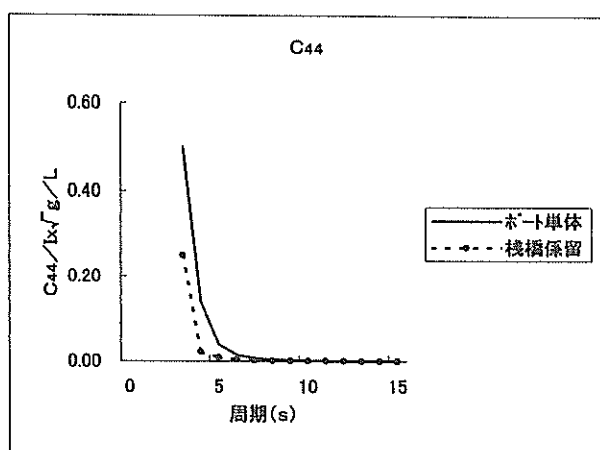
(6) ヨウ

図-50 くし型棧橋に係留されたプレジャーボートの付加質量係数

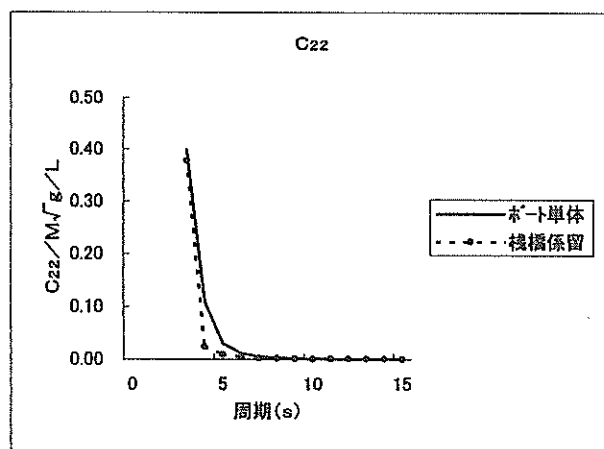
プレジャーボート・流体力（減衰係数）



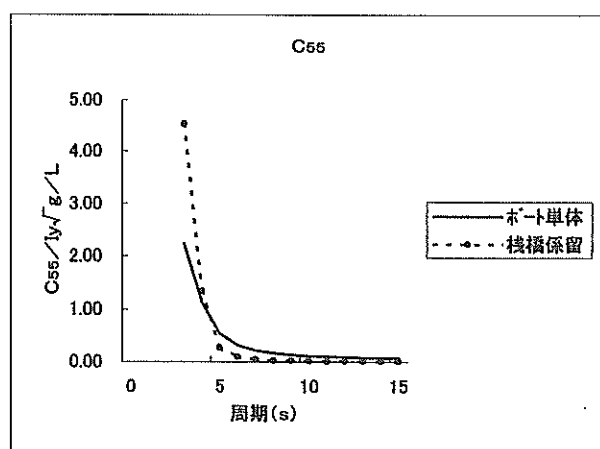
(1) サージ



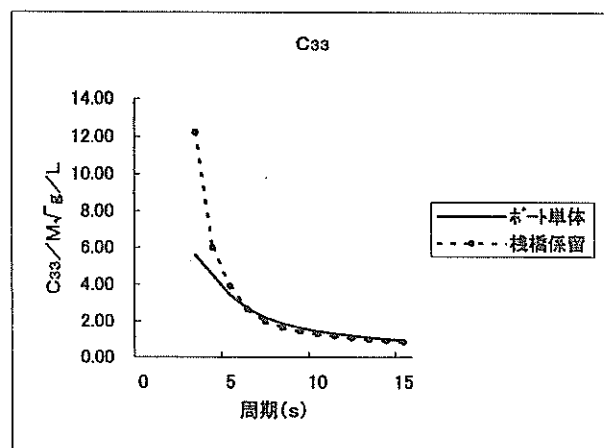
(4) ロール



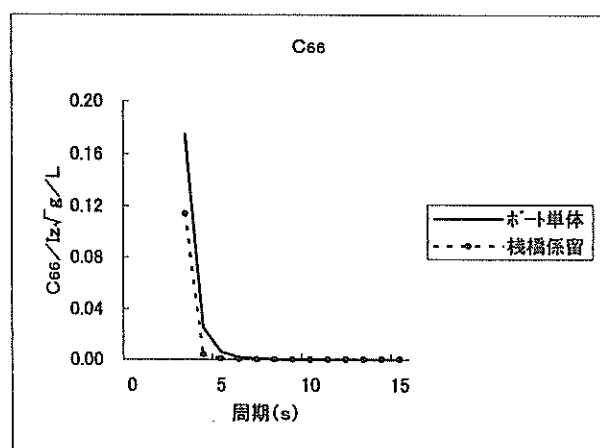
(2) スウェイ



(5) ピッチ



(3) ヒープ



(6) ヨウ

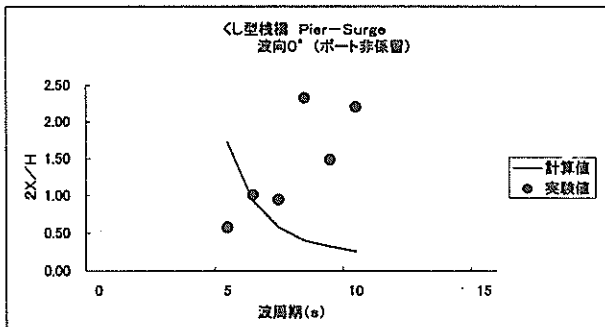
図-51 くし型栈橋に係留されたプレジャーボートの減衰係数

栈橋係留時との相違および栈橋非係留時との相違は、それほど大きくない。

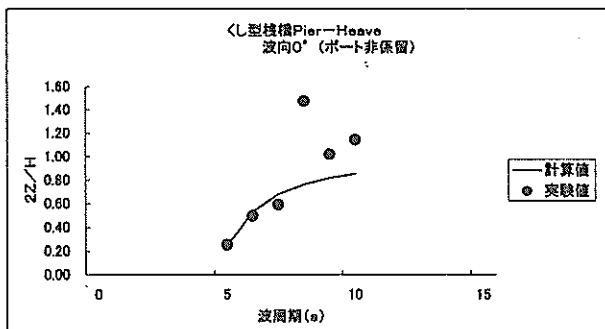
(3) 動揺量

図-52(1)～(2)は、プレジャーボート非係留時のくし型栈橋の動揺量を示す。まず、図-52(1)はサージの動揺両振幅 $2X$ を波高 H で除した $2X/H$ を示す。計算値の動揺特性をみると、動揺量は短周期側で大きく、長周期側で小さい傾向となっている。これに対して実験値では、動揺量のばらつきが大きく周波数特性も計算値とかなり異なっている。これについては、単栈橋のときと同様に係留ばねの非線形性の影響などが考えられる。

つぎに図-52(2)は、ヒープの動揺両振幅 $2Z$ を波高 H で除した $2Z/H$ を示す。ヒープについて、動揺特性は実験値と計算値とでおおむね一致していることがわかる。しかしながら、波周期 8 s において実験値は計算値を大きく上回っている。この原因は詳細には不明であるが、前述したように水槽の側面からの反射波の影響等が考えられる。



(1) サージ、波向 0°



(2) ヒープ、波向 0°

図-52 くし型栈橋の動揺量

4. 5 本解析手法の応用

本解析手法は種々の複数浮体に対して汎用的に利用できるように開発されている。そこで、ここでは、複数浮体の動揺解析プログラムの主な用途を述べ、また、それを今後各種の浮体構造物に対して適用する際の留意点についても述べる。

(1) マリーナにおける浮栈橋とプレジャーボートの動揺解析

これは、4. 3～4. 4でも述べたように、浮栈橋と複数の係留ボートの動揺解析に適用するものである。適用においては、以下の点に留意することが重要である。

① 栈橋の係留のモデル化

杭係留の場合には、杭の変位復元力特性および使用される係留装置の変位復元力特性に留意する必要がある。また、その変位復元力特性を線形とするか、非線形とするかについても十分に注意する必要がある。

チェーン係留の場合には、カタナリー特性に基づく係留系の非線形特性を考慮に入れる必要がある。現実には上下変位、水平変位に応じてカタナリー特性曲線が時々刻々と変化することに注意する必要がある。しかしながら、このような解析は、変位復元力特性を各時間ステップごとに変える必要があることからやや煩雑となるので、現実には水平変位に対する拘束力の特性のみを考慮するなどモデルの単純化を図る必要がある。

② プレジャーボートの係留のモデル化

係留ロープによる係留状態においては、係留索の変位復元力特性の非線形性を考慮する必要がある。これを再現するには、おのおのの係留索の強伸度特性に基づく非線形モデルを動揺計算に取り入れる必要がある。具体的には、係留索の変位復元力特性を折れ線近似による非線形モデルとするのが実用的である。このような機能は、すでに本プログラムでは組み込み済みである。

③ 浮栈橋相互の結合部のモデル化

浮栈橋相互の結合部のモデル化には、十分注意する必要がある。結合部の条件としては、ヒンジ結合、ピン結合、ゴム素材による弾性結合等があるので、数値計算においてはこれらを適切にモデル化する必要がある。現プログラムではヒンジ結合、ピン結合について対応していないので、今後改良が必要である。

④ 浮栈橋自体の弾性

浮栈橋が弾性変形する素材で造られている場合には、その影響をも考慮する必要がある。4. 2で示したモデルにおいては、その点の考慮ができないので、今後の検討課題である。

⑤ フローターと上部工のモデル化

フローター付きの浮棧橋では、その形状を考慮して流体力を計算する必要がある。

⑥プレジャーボートに作用する風荷重のモデル化

プレジャーボートに作用する風荷重は、浮棧橋の重心点に同時に作用させることは適当ではない。したがって、風荷重をプレジャーボートの重心点および浮棧橋の重心点に個別に作用させる必要がある。4.2で示したモデルにおいては、そのような入力が可能である。風荷重を考慮する場合は時間的な変動性、空間的な風の変動性に注意する必要がある。時間的な変動特性は、ダavenportあるいは日野等のスペクトルを用いて考慮することができる。空間的な風の変動性は、マリーナの浮棧橋については、それほど大規模ではないことから考慮しなくとも良いと思われる。しかしながら、プレジャーボートが多数並ぶことによる風荷重の低減効果には十分配慮する必要がある。これは、解析的に得ることが困難であるので、風洞実験を行うなど実験的に求めることが望ましいが、これに関する実験例¹⁹⁾は極めて少ない。

⑦諸元の異なる波の作用

マリーナの浮棧橋には港口部からの回折波、防波堤からの伝達波、港内発生波が重なって作用することがある。さらに、これらが、波向が異なるとともに代表周期も異なることに注意してプレジャーボートおよび浮棧橋に作用する波浪荷重を算定する必要がある。

(2) 浮体式係船岸に係留された船舶の動揺解析

4.2で示した解析モデルは、複数浮体に適用できるものであるから、浮体式係船岸とその係留船の動揺解析に適用することができる。適用においては、以下の点に十分に注意する必要がある。

①護岸条件による流体力への影響

浮体式係船岸は、通常、護岸の前面に係留されることから、護岸の反射条件に十分注意してモデル化を行う必要がある。護岸の反射条件は、護岸までの距離とその反射率でモデル化する。4.2に示した本解析モデルでは、この様な機能をすでに組み込んでいる。

②防舷材の変位復元力特性の非線形性のモデル化

浮体式係船岸の係留方式は、通常、ドルフィン係留または、チェーン係留である。ドルフィン係留においては、防舷材の種別による変位復元力特性の相違、その非線形性に十分に配慮する必要がある。定反力型防舷材においては、通常、骨格モデルによるヒステリシスのモデル化を行うのが良い。反力漸増型防舷材については、係留索の変位復元力特性のモデル化と同様に、折れ線近似によるモデル化を行うのが良い。

(3) 固定式係船岸における複船係留

事例は少ないが、固定式係船岸において船舶を並列係留することがある。これは、漁船等の小型船の係留においてよくみられるものであるが、造船所の艀装岸壁における艀装中の船舶の係留方式としても採用されることがある。このような状態の計算モデルへの適用においては、以下の点に十分に注意する必要がある。

①係船岸の反射条件の浮体（船舶）の流体力への影響

係船岸と係留船相互の流体力学的相互干渉効果に十分に注意する必要がある。特に、同程度の船が近接して並ぶことから流体力学的相互干渉効果の影響は大きいと思われるので、十分な検討のもとに動揺解析に用いる流体力係数（付加質量係数、減衰係数）を決める必要がある。また、係船岸壁の反射条件について考慮する必要がある。

②船舶相互を結ぶ係留索、防舷材の特性

船舶相互の係留は、係留索あるいは、船体間に投入されたフローター式の防舷材によってなされることが多い。これらは、船舶の動揺による相対変位によって変形するので、その変位復元力特性は十分に注意してモデル化する必要がある。

(4) 連続ポンツーン式または分離式（セパレート型）の浮体橋梁の動揺解析

本解析モデルを改良することにより、複数の浮体を連続的に並べた浮体橋梁の動揺解析に應用できる。その適用においては、以下の点に注意する必要がある。

①浮体弾性のモデル化

ポンツーン間の接合条件のモデル化に留意する必要がある。接合条件は、軸方向圧縮ばね、鉛直方向せん断ばね、水平方向せん断ばね、回転ばねによってモデル化するのが適切と思われる。現在のところ、本解析モデルにおいては、この様な形式のばねの入力ができないので、今後モデルの改良が必要である。

②固定スパンとの接合部におけるモデル化

固定スパンと浮体部の接合部のモデル化に留意する必要がある。接合条件としては、ポンツーン相互間と同様に、軸方向圧縮ばね、鉛直方向せん断ばね、水平方向せん断ばね、回転ばねによってモデル化するのが適切と思われる。

③波高の場所による分布（波高の値、位相）の不均一性

浮体が長大であることから、波高が場所によって異なることの効果を考慮する必要がある。なお、浮体が十分に離れている場合には、浮体間の流体力学的相互干渉効果は考慮しなくて良いので、この点に対する確認的な検討も必要である。

5. 結論

本研究によって得られた主要な結論を以下にとりまとめる。

(1) 単栈橋における水理模型実験結果

①プレジャーボートの動揺は波向 90° （横波）において、スウェイおよびロールの動揺が顕著になる。したがって、プレジャーボートに入射する波が、このような条件の際には、ボートと浮栈橋間の緩衝材（防舷材等）の設置に配慮することが必要となる。

②実験した範囲においては、波高と浮栈橋およびプレジャーボートの動揺量との間には、ほぼ比例関係が見られた。

③プレジャーボートの動揺は、浮栈橋の曲げ剛性の影響を受けるが、サージ、スウェイおよびロールについては、浮栈橋が剛体である方が動揺量が大きく、ヒープについては、浮栈橋が弾性体である方が動揺量が大きい。

④浮栈橋の固定条件は、プレジャーボートのヒープに対しては、あまり影響を及ぼさないが、スウェイおよびロールは、浮栈橋が浮動状態の方が相対的に動揺量が大きくなる傾向がみられた。このことから、浮体が浮栈橋とプレジャーボートのように複数個存在することの動揺に及ぼす影響は、とくに、スウェイおよびロールについて注目すればよいと思われる。

⑤単栈橋に波浪のみが作用する条件では、プレジャーボートの係留の有無は浮栈橋の動揺量に対しては、それほど大きな影響を与えない。

(2) くし型栈橋における水理模型実験結果

①プレジャーボートの動揺は波向 0° （プレジャーボートに対して横波状態）において、スウェイおよびロールの動揺が顕著になる。したがって、プレジャーボートに入射する波が、このような条件となる場合には、プレジャーボートと浮栈橋間の緩衝材（防舷材等）の設置に配慮することが必要となる。

②実験した範囲においては、くし型栈橋においても、波高と浮栈橋およびプレジャーボートの動揺量との間には、ほぼ比例関係が見られた。

③プレジャーボートの動揺は、浮栈橋の剛性の影響を受ける。サージ、スウェイについては、浮栈橋が剛体である方が動揺量が大きい、ヒープについては、浮栈橋の剛性の影響はあまり受けない。

④くし型栈橋に波浪のみが作用する条件では、プレジャーボートの係留の有無は、浮栈橋の動揺量に対しては、それほど大きな影響を与えない。

(3) 複数浮体の動揺解析手法

①単栈橋または、くし型栈橋に係留されたプレジャーボートの動揺について、複数浮体間の流体力学的相互干渉効果および連結力による相互干渉効果を考慮できるモデルを作成した。

②単栈橋およびくし型栈橋に係留されたプレジャーボートについて、波力および流体力（付加質量および減衰係数）について、流体力学的相互干渉効果の影響度を考察した。単栈橋においては、栈橋およびプレジャーボートの波力に及ぼす流体力学的相互干渉効果の影響は、波向 0° のときには少なく、一方、波向 90° では大きくなる。これは、栈橋による波の遮蔽効果および浮体間のスウェイ、ロールの連成影響が大きいためである。くし型栈橋においては、プレジャーボートの係留の有無による波力への影響は比較的少ないが、プレジャーボートについては、波上側と波下側のボートに作用する波力の値の相違が大きく、特にくし型栈橋の背後に位置する波下側のボートに対する波力の低減が顕著となる。

6. あとがき

本研究は、建設中のマリーナにおける浮栈橋およびプレジャーボートの被災を契機に開始された。当該マリーナにおいては、防波堤が整備中であつたことが被害の主たる原因であつたが、浮栈橋の設計において波浪の影響を十分に考慮すべきことを認識させられた。本資料で述べた水理模型実験は、浮栈橋とプレジャーボートの動揺特性を把握し、新たに開発した複数浮体の動揺計算法の検証を行うために実施した。水理模型実験の結果、浮栈橋およびプレジャーボートの動揺に及ぼす栈橋の固定条件、曲げ剛性、プレジャーボートの係留の有無などの諸要因の影響を明らかにするとともに、複数浮体の動揺解析手法の適用性についても検討がなされた。検討の結果、複数浮体の波力、流体力係数の相互干渉効果が明らかにされるとともに、動揺量について水理模型実験の結果との比較がなされた。しかしながら、サージ、スウェイなどの係留時の動揺振幅、ロール、ピッチなどの非線形粘性減衰など、実験値と計算値の間には若干の相違もみられ、計算に用いる流体力係数の修正法など今後さらに、計算精度の向上のための研究が必要と思われる。

すでに述べたように、本研究ではプレジャーボート、浮栈橋の動揺特性を明らかにするに留まり、実務面への応用に関しては、例えば、マリーナに要求される泊地内の静穏度の指標値について、プレジャーボートの係留限界条件、利用制約条件等の観点から明らかにするに至つ

ていない。これらについては、今後継続して検討を行って明らかにしていかなければならない課題である。

さらに、ここで用いた複数浮体の動揺解析手法においては、浮棧橋を剛体として取り扱っており、浮棧橋が弾性的な性状を示す場合の影響を取り入れることはできない。また、浮体の動揺にともなう浮体の断面力についても計算することができない。マリーナの浮棧橋は、弾性的な性状を示すものが多いことから、これらの点についての計算モデルの改良は、今後に残された課題である。

なお、本研究において水理模型実験の準備および実施にあたっては、近藤圭央氏(平成8年度海洋構造研究室研修生、(株)港湾コンサルタント)および李真鶴氏(韓国科学技術院土木工学科 PhDコース、平成8年度韓国若手研究者短期研修にて来所)の協力があった。本資料の著述を終えるに際して、両氏の協力に感謝の意を表したい。

(1999年9月30日受付)

参考文献

- 1) 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会：海岸波動(波・構造物・地盤の相互作用の解析法)、土木学会、1994.7, pp. 313~330
- 2) 合田良実, 高山知司, 笹田正: 楕円体近似による固定船体に働く波力の理論および実験, 港湾技術研究所報告, 12巻4号, 1973.12, pp.23-74
- 1) Faltinsen O.M., Michelsen F.C.: Motions of Large Structures in Waves at Zero Froude Number, *Proc. of Int. Symp. Pyn. Mar. Vehic. Struct. in Waves, Inst. of Mech. Engrs. London*, 1974., pp.99~114
- 2) Garrison, C.J.: Hydrodynamic loading of large offshore structures: Three dimensional source distribution method in Offshore Engineering, Chapter 3, John Wiley & Sons., 1978
- 5) 井島武士, 吉田明德: 有限水深域における矩形浮体の3次元係留運動, 九大工学集報, 第49巻2号, pp.83~86, 1976.3
- 3) 上田茂, 白石悟, 板生孝司: 弛緩係留された浮体の長周期動揺, 海洋開発論文集, Vol.4, 1988.11, pp.319~324.
- 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, 22巻4号, 1983.12, pp.181~218
- 4) 上田茂, 白石悟: 大型矩形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究(第2報) - 数値シミュレーション手法について -, 港湾技術研究所報告, 19巻3号, 1980.9, pp.105~143.
- 9) 上田茂, 白石悟, 甲斐一夫: 箱型浮体の波浪によるせん断力と縦曲げモーメントの計算法について, 港湾技研資料, No.505, 1984.12, 27p.
- 10) 上田茂, 白石悟, 石崎崇志: 箱型浮体の波浪による断面力の計算法, 港湾技術研究所報告, 31巻2号, 1992.6, pp.75~106.
- 11) 上田茂, 白石悟, 石崎崇志: 箱型浮体の波浪による断面力の計算例と流体力係数の図表, 港湾技研資料, No.731, 1992.6, 57p.
- 12) Muller, J.: Structural Consideration and configurations II, Paper Presented the Seminar on Concrete Ships and Vessels, University of California Extension, Berkeley, 1975.
- 13) 白石悟, 米山治男, 横井和幸: マリーナの浮棧橋の動揺及び断面力に関する一考察, 海洋開発論文集, Vol.11, 1995.6, pp.327~332.
- 14) 白石悟, 米山治男, 横井和幸: くし型浮体の波浪による断面力の計算法, 港湾技研資料, No.828, 1996.3, 25p.
- 15) 松浦正己, 池上国広: 係留・連結された複数浮体の波浪中挙動解析法, 三菱重工技報, Vol.31, No.4, pp.266~269, 1994.7
- 16) Inoue, Y., Seif, M.S., Asada, H. and Yamashita, S.: Motion Analysis of Parallely Connected FPSO Unit and LNG Carrier, *Proc. of the 15th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE '96)*, Volume I-Part A, pp.415~421, 1996.
- 17) Inoue, Y., Seif, M.S.: Nonlinear Responses of Multiple Floating Systems, *Proc. of 16th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE'97)*, Volume I-Part A, pp.259~267, 1997.4
- 18) 齊藤勝彦: 2浮体動揺よりみた港内静穏に関する基礎的研究, 177p., 1991.
- 19) 川口恵一郎, 加藤信男, 加藤雅也, 仲倉道雄, 上山美登里, 栗田剛: マリーナ等に複数係留された小型船舶に作用する風荷重の研究, 海洋開発論文集, Vol.13, 1997.6, pp.901~906.

主要記号表

B	: 浮体の幅
$[C_k]$: 造波減衰力マトリクス
$[C'_k]$: 粘性減衰力マトリクス
d	: 浮体の喫水
$\{F_k(t)\}$: k 番めの浮体に作用する外力ベクトル (波力+風荷重+流れによる力+係留)

	力+連結力)		曲げひずみの最大値
$\{F_{Ak}(t)\}$: k 番めの浮体に作用する波力ベクトル	ϵ_{ymax}	: 補助栈橋の各波周期における
$\{F_{Bk}(t)\}$: k 番めの浮体に作用する風荷重ベクトル		曲げひずみの最大値
$\{F_{Ck}(t)\}$: k 番めの浮体に作用する流れによる力によるベクトル	λ	: 波長
$\{F_{Dk}(t)\}$: k 番めの浮体に作用する係留力ベクトル	ρ	: 流体の密度
$\{F_{Ek}(t)\}$: k 番めの浮体に作用する連結力ベクトル		
g	: 重力加速度		
i	: 虚数単位		
j	: 浮体の動揺成分 (j ; 1:サージ, 2:スウエイ, 3:ヒーブ, 4:ロール, 5:ピッチ, 6:ヨウ)		
$[K_k]$: 静水圧的復元力マトリクス		
k	: k 番めの浮体であることを示す添字		
k	: 浮体の動揺成分 (k ; 1:サージ, 2:スウエイ, 3:ヒーブ, 4:ロール, 5:ピッチ, 6:ヨウ)		
L	: 主栈橋の長さ		
L'	: 補助栈橋の長さ		
$[M_k]$: 質量マトリクス		
r	: 浮体の番号		
s	: 浮体の番号		
t	: 時間		
$X^*_{rj sk}$: r 番めの浮体の j 動揺成分の動揺振幅		
$\{\ddot{x}_k\}$: k 番めの浮体の加速度ベクトル		
$\{\dot{x}_k\}$: k 番めの浮体の速度ベクトル		
$\{\dot{x}_k \dot{x}_k \}$: k 番めの浮体の速度の自乗ベクトル		
$\{x_k\}$: k 番めの浮体の変位ベクトル		
ζ_0	: 入射波振幅		
ϕ_0	: 入射波による速度ポテンシャル		
ϕ_d	: 散乱波による速度ポテンシャル		
$\phi_{rj sk}$: r 番めの浮体の j 動揺成分による s 番めの浮体の k 動揺成分に対する発散波による速度ポテンシャル		
$\epsilon_{max}(X)$: 主栈橋の座標位置 x における曲げひずみの最大値		
$\epsilon_{max}(Y)$: 補助栈橋の座標位置 y における曲げひずみの最大値		
ϵ_{xmax}	: 主栈橋の各波周期における		

港湾技研資料 No. 950

1999.12

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 有限会社つばさ印刷技研

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

Copyright © (1999) by P.H.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, 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。