

港 湾 技 研 資 料

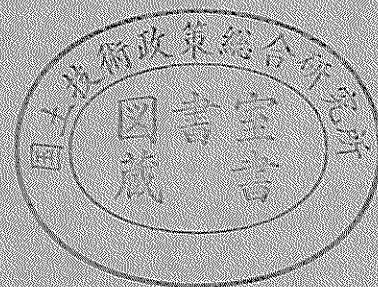
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 754 June 1993

台形ケーソンの洋上接合時および
設置時の動揺特性について

上 田 茂
白 石 悟
板 生 考 司
内 藤 了 二

運輸省港湾技術研究所



台形ケーソンの洋上接合時および設置時の動揺特性について

上田 茂*
白石 悟**
板生 考司***
内藤 了二****

要 旨

本資料では、小名浜港において建設が進められている台形ケーソンによる防波堤の洋上接合時および設置時の動揺特性について動揺シミュレーションによって検討を行ない、運輸省第二港湾建設局で実施された水理模型実験および現地観測の結果と比較検討した。

台形ケーソンに作用する波力およびラディエーション流体力は三次元特異点分布法によって求め、これを用いて規則波中および不規則波中の動揺量を数値シミュレーションによって求めた。ただし、ラディエーション流体力から求められるロールおよびピッチの付加慣性モーメント係数および減衰定数は自由振動実験の結果に基づいて決めた。

本資料の主要な結論は以下のとおりである。

- (1) 台形ケーソンの動揺量の実験値と計算値とはおおむね一致した。
- (2) ただし、アンダーキールクリアランスの小さい4号船溜 A1断面と据付場 A4断面の動揺量の一部の成分については計算値は実験値に比べて大きい。
- (3) 実験値および計算値に基づいて作業限界波高を求めた。作業限界波高は波周期に依存し、長周期側において小さくなる傾向がみられた。作業限界は、断面ごとに若干の相違がみられたが、A1～A3断面では、波周期10sにおいてはおおむね0.2～0.25m、波周期7sにおいておおむね0.3～0.4mである。また、A4断面では波周期10sにおいてはおおむね0.4m、波周期7sにおいてはおおむね0.8mである。
- (4) 現地観測の結果によれば、据付時のケーソンの動揺量はアンダーキールクリアランスが小さくなるにしたがって小さくなる傾向がみられ、計算においても同様な傾向がみられた。

キーワード：台形ケーソン堤、動揺量、動揺シミュレーション、模型実験、現地観測、洋上接合、ケーソン据付

* 構造部長

** 構造部海洋構造研究室長

*** 構造部海洋構造研究室（現 第五港湾建設局 四日市港工事事務所）

**** 構造部海洋構造研究室

1. 概要

小名浜港は、太平洋に面する福島県いわき市に位置している。

小名浜港では、港内の静穏度を高めて稼働率の向上を図るために沖防波堤の延長が計画され建設が進められている。これには台形ケーソンが用いられている。台形ケーソンは、波力を斜面に受けることによって生じる波力の鉛直成分を滑動抵抗に利用できるため矩形ケーソンと比較するとケーソン重量を軽くすることができ、また、底面幅が大きいため地盤反力を小さくすることができる。台形ケーソンは、従来の矩形ケーソンに比べて底面幅が大きくなっているため、小名浜港4号船溜ケーソンヤードにおいては、断面を一体として製作することが困難であるため、半断面づつ製作し、4号船溜において洋上接合する。接合後、7号埠頭ケーソン継足場において上部を洋上で継足し、一時、仮置場に係留し、その後所定の

位置に据付ける。

台形ケーソンについてはこれまで施工の経験が無くまた、洋上接合を行なうことから建設工事に先立ち台形ケーソンの接合時、仮置時、曳航時および据付時における動揺特性の把握、係留索の安全性等を検討するため、水理模型実験および動揺シミュレーションを行った。水理模型実験は、運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所が港湾技術研究所所有の大水深海洋構造物実験水槽を用いて行い、動揺シミュレーションは、筆者らが行った。

本資料は、小名浜港台形ケーソンの接合時、仮置時および据付時の動揺量および係留力を動揺シミュレーションによって検討した結果をとりまとめ、模型実験結果と比較検討したものである。また、第二港湾建設局小名浜港工事事務所が台形ケーソンの据付時に行った動揺観測結果と筆者らが行った動揺シミュレーション結果とを比較検討したものである。

表-1 ケーソン諸元

ケーソン形状	半断面ケーソン	接合後ケーソン	継足後ケーソン	注水後ケーソン
断面形状	A1断面	A2断面	A3断面	A4断面
係留図	図-4	図-5	図-6	図-7
型幅	15.00 m	15.00 m	15.00 m	15.00 m
天端部長	13.07 m	26.14 m	16.33 m	16.33 m
底部長	20.00 m	40.00 m	40.00 m	40.00 m
型深	13.50 m	13.50 m	22.00 m	22.00 m
吃水	6.60 m	6.60 m	12.81 m	18.00 m
乾舷	6.90 m	6.90 m	9.19 m	4.00 m
重心高	5.03 m	5.03 m	6.47 m	5.41 m
浮心高	3.21 m	3.21 m	5.96 m	8.02 m
慣性モーメントX	$4.54 \times 10^6 \text{ kgfms}^2$	$9.07 \times 10^6 \text{ kgfms}^2$	$3.19 \times 10^7 \text{ kgfms}^2$	$3.93 \times 10^7 \text{ kgfms}^2$
慣性モーメントY	$5.66 \times 10^6 \text{ kgfms}^2$	$4.46 \times 10^7 \text{ kgfms}^2$	$6.46 \times 10^7 \text{ kgfms}^2$	$9.09 \times 10^7 \text{ kgfms}^2$
慣性モーメントZ	$6.71 \times 10^6 \text{ kgfms}^2$	$4.67 \times 10^7 \text{ kgfms}^2$	$4.95 \times 10^7 \text{ kgfms}^2$	$7.57 \times 10^7 \text{ kgfms}^2$
排水量	1923tf	3845 tf	6776 tf	8695 tf

2. 水理模型実験および動揺シミュレーションの概要

2.1 対象ケーソンおよび係留場所

本資料で検討の対象とした小名浜港沖防波堤に設置されるケーソンの諸元を表-1に、また、断面図を図-1(1)~(3)に示す。それらは、工事段階毎の接合前の半断面(以後、A1断面という。)、接合後(以後、A2断面という。)、継足後(以後、A3断面という。)、注水後(以後、A4断面という。)の各断面である。これらを取りまとめると以下のとおりである。ただし、接合後ケーソンのうち、4号船溜、7号埠頭において係留されるものについて、それぞれ、4-A2断面、7-A2断面とした。4-A2断面については、水理模型実験が行なわれていないので、本資料ではラジェーション流体力の計算値のみを示す。

No	ケーソン断面	断面形状	係留場所
①	半断面ケーソン (A1断面)	図-1-(1)	4号船溜
②	接合後ケーソン (4-A2断面)	図-1-(2)	4号船溜
③	接合後ケーソン (7-A2断面)	図-1-(2)	7号埠頭
④	継足後ケーソン (A3断面)	図-1-(3)	仮置場
⑤	注水後ケーソン (A4断面)	図-1-(3)	据付場

図-2は、台形ケーソンの各断面の係留場所を示したものである。図中の①は4号船溜、②は7号埠頭、③は仮置場、④は据付場を示す。

2.2 水理模型実験の概要

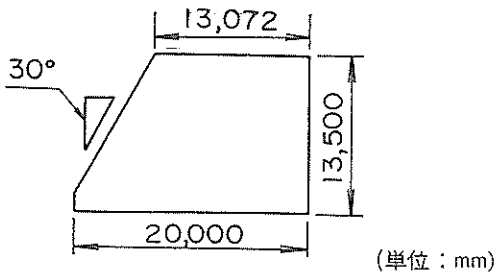
水理模型実験は、港湾技術研究所の大水深海洋構造物実験水槽において、第二港湾建設局横浜調査設計事務所が行ったものであるが、ここではその概要を示す。実験は、小名浜港沖防波堤に設置される台形ケーソンの接合時、係留時、曳航時および据付時における動揺特性の把握、安定性の確認等を目的とした。

(1) 実験水槽

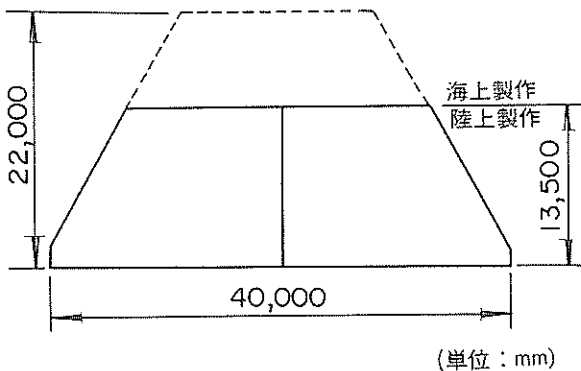
図-3は実験に用いた多方向不規則波造波装置の平面図である。図中には切れ波水槽と表示している。表-2は水槽および造波機の諸元である。造波機はピストン型固定式造波機35台から構成されるサーベント型であり、各造波機に入力する信号の位相を変えることによって多方向不規則波を発生させることが可能である。ただし、本実験においては単一方向波で実験を行った。ケーソン模型は図-3に示すように水槽のほぼ中央位置で、造波機前面に配置した。

(2) 模型浮体

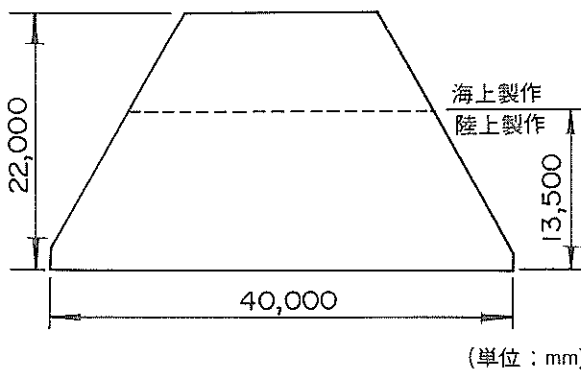
模型の縮尺は表-1に示した台形ケーソンの大きさ、



(1) 半断面ケーソン (A1断面)



(2) 接合後ケーソン (A2断面)



(3) 継足後、注水後ケーソン (A3、A4断面)

図-1 台形ケーソン断面図

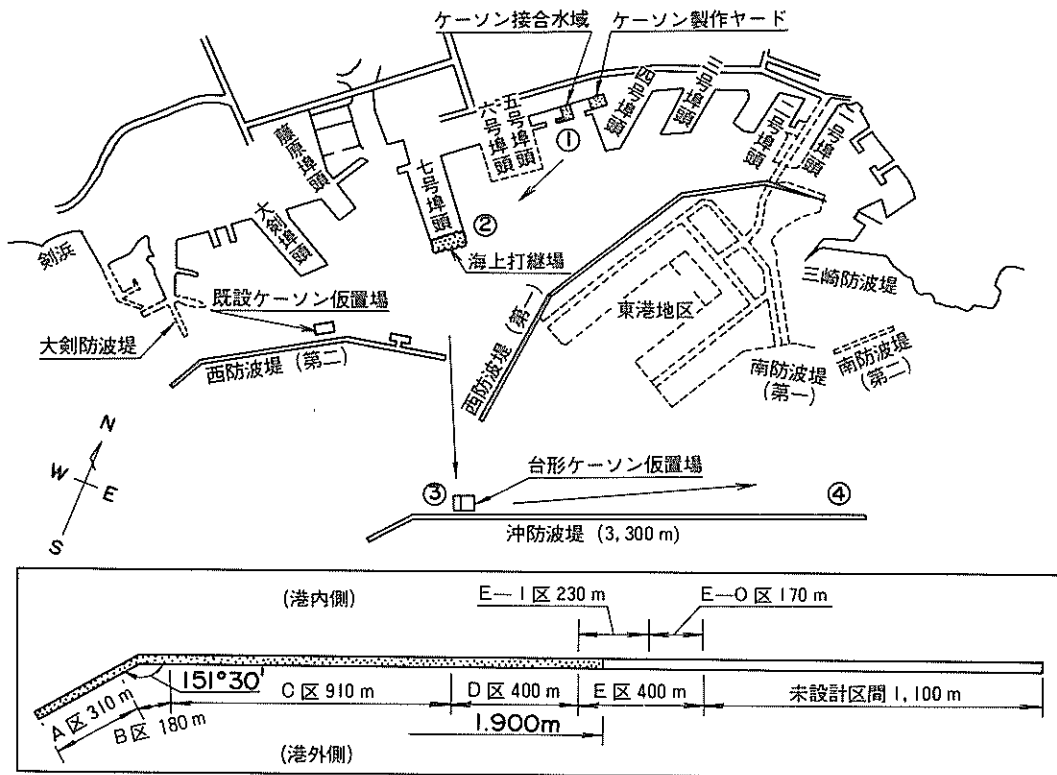


図-2 台形ケーソン係留場所

実験精度等を勘案して1/40縮尺とした。模型はアルミ合金製であり、模型内部にセットする重錘の重量および位置を変更することによって、浮体の重量、重心位置および慣性モーメントを調整することができる。

(3) 係留索の配置および特性

ケーソンの各断面における係留状況を図-4～図-7に示す。ケーソンはワイヤ索およびナイロン索で係留されるが模型実験に用いる係留索は、コイルスプリングおよび釣用のテグスを用いて製作した。図-8～図-11は係留系の変位復元力特性である。図中のW411, W412などは係留索の番号を示しており、前出の図-4～図-7の図中に記載したものに対応する。なお、これらの変位復元力特性はすべて実機換算値で示している。

模型ケーソンにおいて実際に係留索を設置して計測し

た係留系のばね定数は、ワイヤ索の弾性係数から計算したばね定数に比べ小さかった。これは、係留索に初期張力をかけた場合においてもその値が小さく、係留索が緊張していなかったためカタナリー効果が生じている影響と考えられる。図-8～図-11に示した変位復元力特性は模型実験中の動揺量と各係留ラインの張力から求めたものである。

水理模型実験および動揺シミュレーションにおいては、以下の係留条件に対する検討を行なった。

図-4に示す4号船溜のA1断面については、係留方法は実線で示したクロス係留と破線で示したハの字係留の2種類、また、係留索W411, W412の初期張力として3tfまたは0tfについて検討したが、本資料においてはクロス係留で初期張力3tfのケースについて実験値と比較す

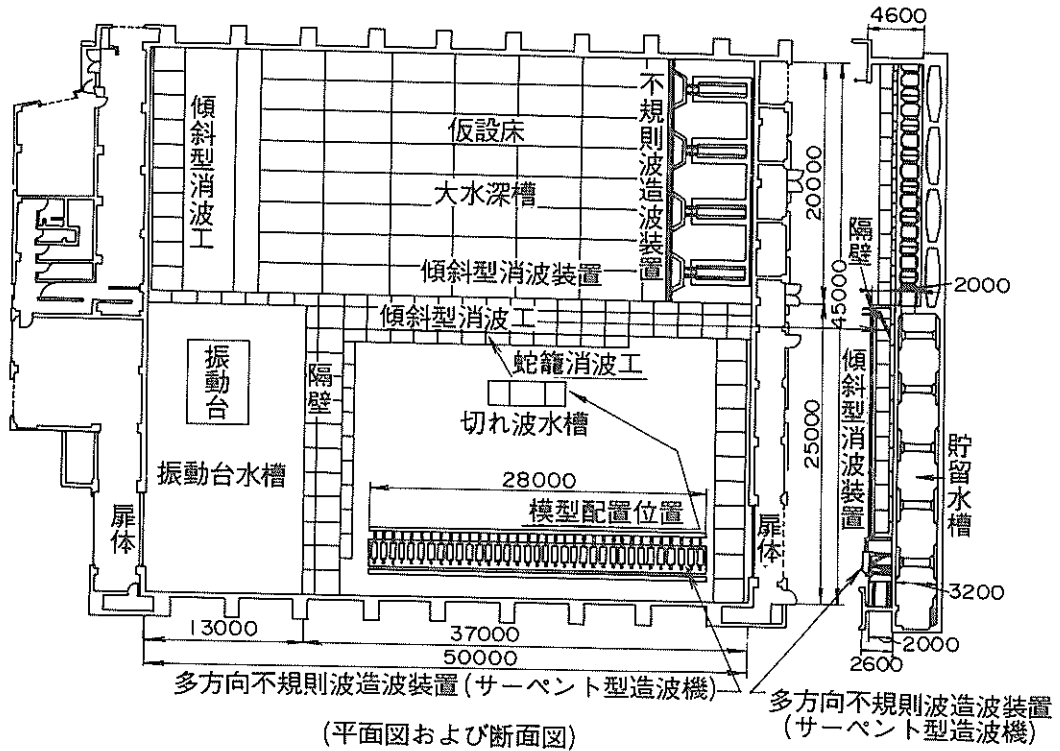


図-3 大水深海洋構造物実験水槽平面図 (運輸省港湾技術研究所: 切れ波水槽)

表-2 大水深海洋構造物実験水槽の切れ波水槽の主要諸元

水槽名称	切れ波水槽
水槽寸法	縦25m×横37m×深さ2.0m
造波機型および台数	ピストン型固定式 (サーペント型) 35台
造波板の幅	28.0m (0.8m×35台)
造波水深	1.2m
発生波の種類	任意波 (多方向不規則波)
最大発生波高	40cm

る。なお、係留索 W413, W414の初期張力は0tfとした。

図-5に示す7号埠頭のA2断面については、係留方法としては、破線で示した係留索C711, C712の係留角度として40°または20°、また、係留索N711~N714の初期張力として3tfまたは0tfとした。ただし、本資料においては係留角度が40°で、初期張力が0tfのケースについて実験値と比較する。

図-6に示す仮置場のA3断面については、係留索NK21にはタグポートによるけん引として一定張力として3tfまたは6tfとした。他のNK11~NK14の初期張力は0tfである。ただし、ここではタグボードによる初期張力を3tfとしたケースについて実験値と比較する。

図-7に示す据付場のA4断面については、係留索NO11, NO12にタグポートによるけん引力として2tfまたは0tfとした。ただし、ここではタグボードによるけん引力として2tfとしたケースについて実験値と比較する。

[4号船溜]

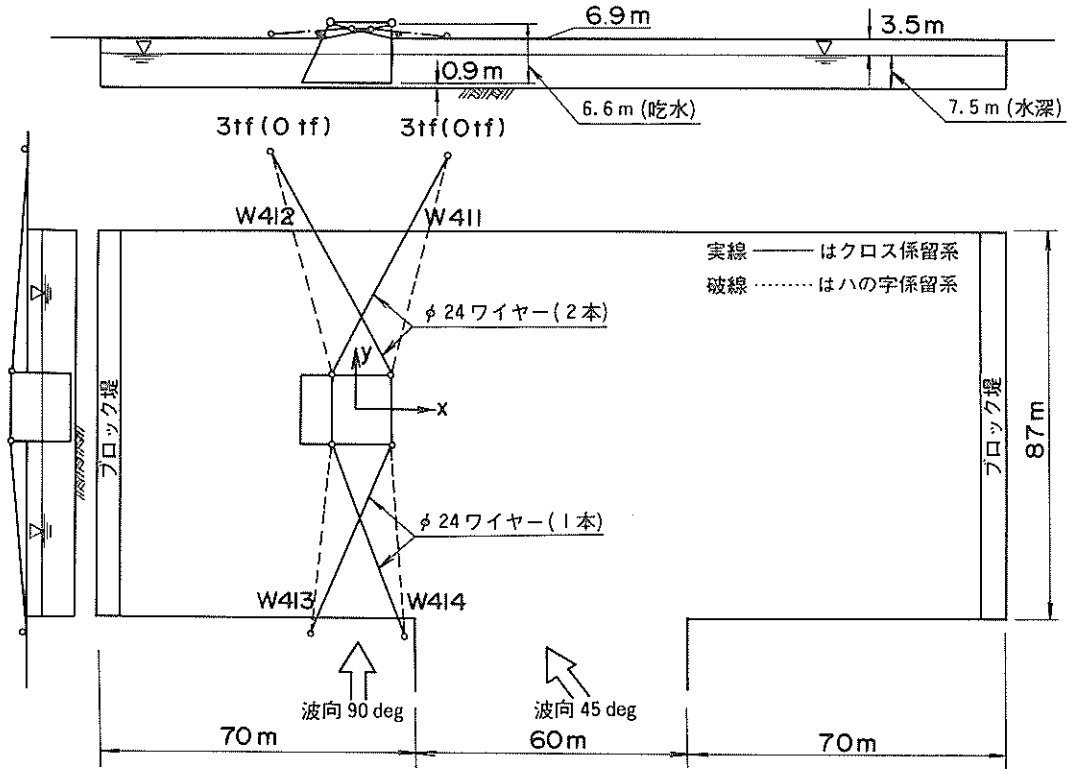


図-4 4号船溜 A1断面ケーソンの係留配置図
250m

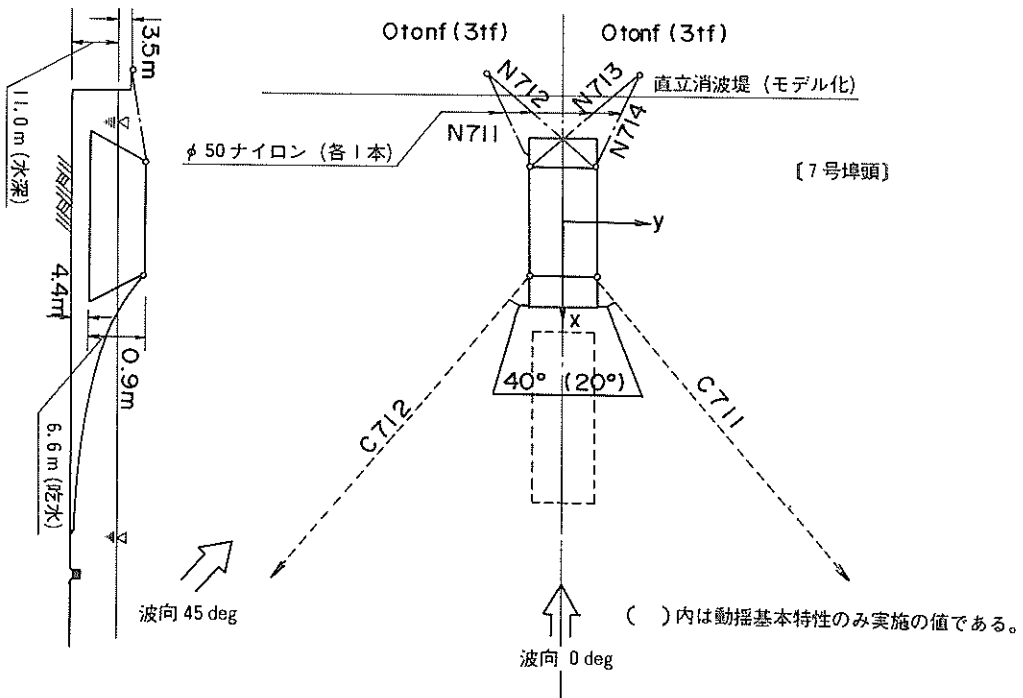
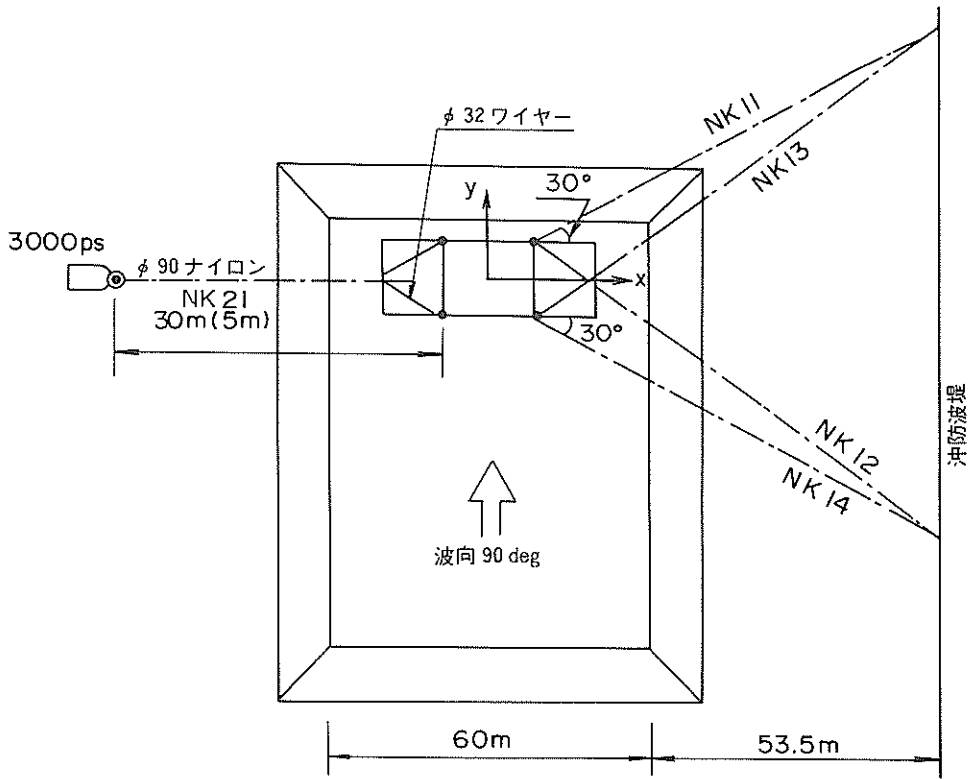


図-5 7号埠頭 A2断面ケーソンの係留配置図



〈 〉内は動揺基本特性のみ実施の値である。

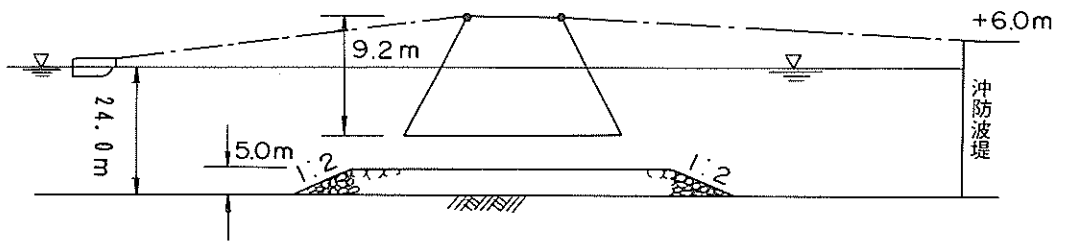


図-6 仮置場 A3断面ケーソンの係留配置図

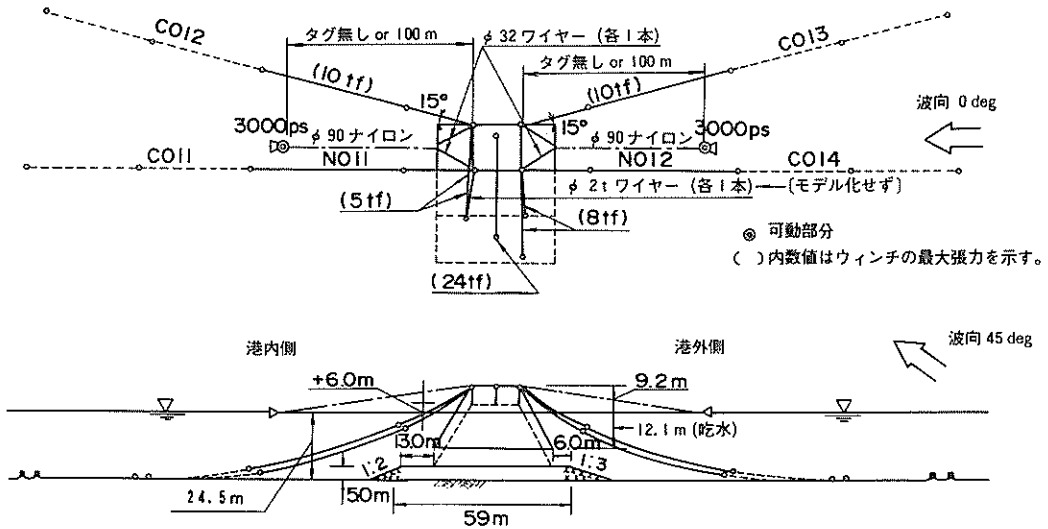


図-7 据付場 A4断面ケーソンの係留配置図

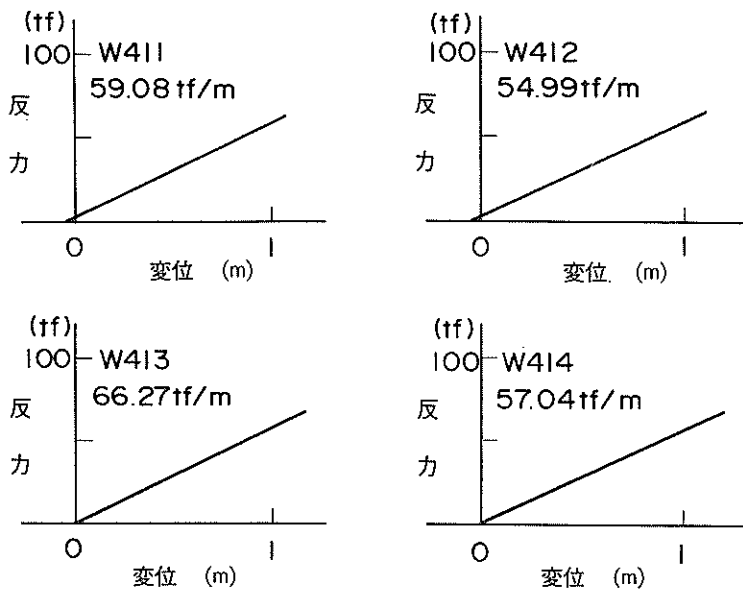


図-8 4号船溜 A1断面ケーソンの係留系の変位復元力特性

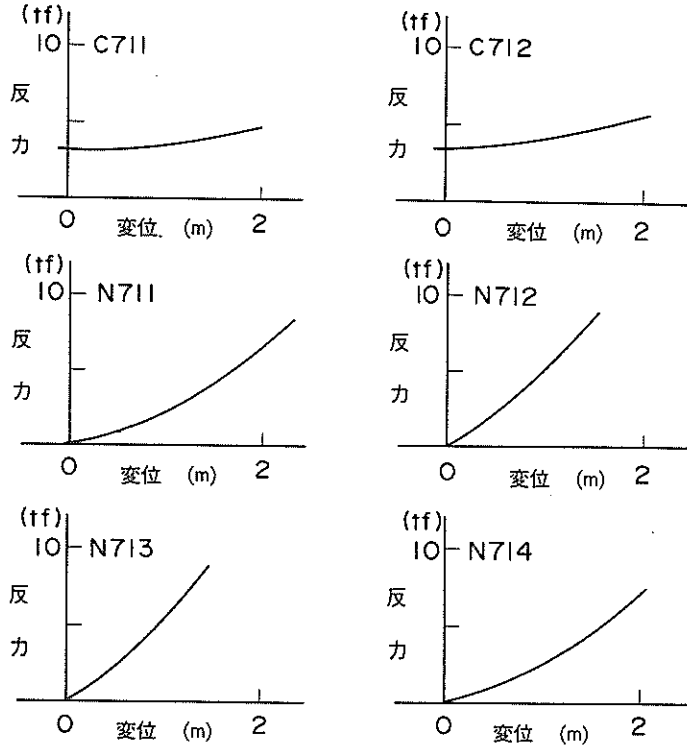


図-9 7号船溜 A2断面ケーソンの係留系の変位復元力特性

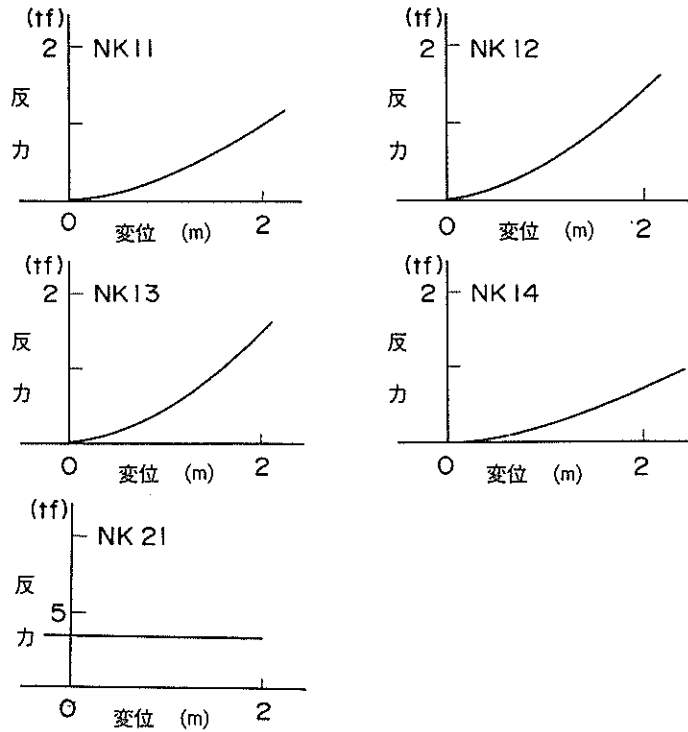


図-10 仮置場 A3断面ケーソンの係留系の変位復元力特性

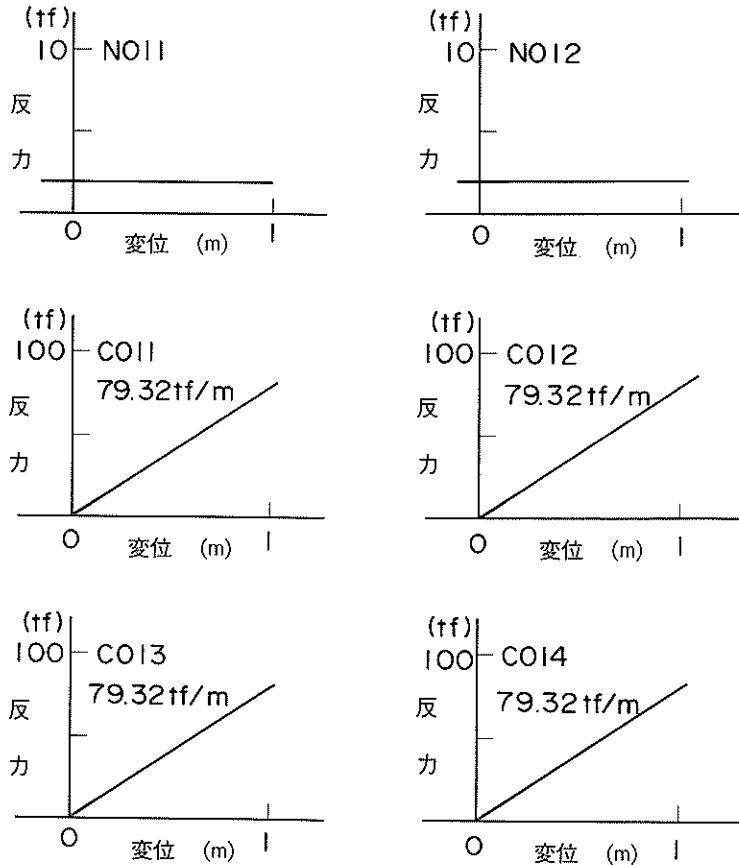


図-11 掘付場 A4断面ケーソンの係留系の変位復元力特性

(4) データの計測および解析

台形ケーソンの動揺は3次元運動解析システムを用いて計測した。図-12は3次元運動解析システムの構成を示したものである。このシステムは2台のカラーカメラを用いてケーソン上に設置したカラーマーカー4点を視準し、これをシステムの演算装置において演算処理して各マーカー点の空間座標を時系列データとして得るものである。このようにして得られた空間上の4点の座標値の変位から浮体の6自由度の動揺量を求めている。

図-13は台形ケーソンの動揺6成分の正負を示したものである。すなわち、各動揺成分の正方向は以下のとおりである。

- サージ : X軸の正方向への動揺
- スウェイ : Y軸の正方向への動揺
- ヒープ : Z軸の正方向(上方向)への動揺
- ロール : X軸の正方向へ向かって右回りの回転
- ピッチ : Y軸の正方向へ向かって右回りの回転
- ヨウ : Z軸の正方向へ向かって右回りの回転

図-14はデータの計測および解析のブロックチャートである。容量式波高計(容量10cm)および張力計(容量2kgfおよび5kgf)により測定されたデータは、それぞれの動歪アンプを通してデータレコーダによって記録する。データレコーダによって記録されたデータは、A/D変換し、パーソナルコンピューターを用いて統計処理を行った。

統計処理においては、張力計によって測定された張力については最大値を、波高および3次元運動解析システムによって測定された動揺量についてはゼロアップクロス解析を行って図-15に示すように最大値および最小値、動揺両振幅の有義値を計算した。

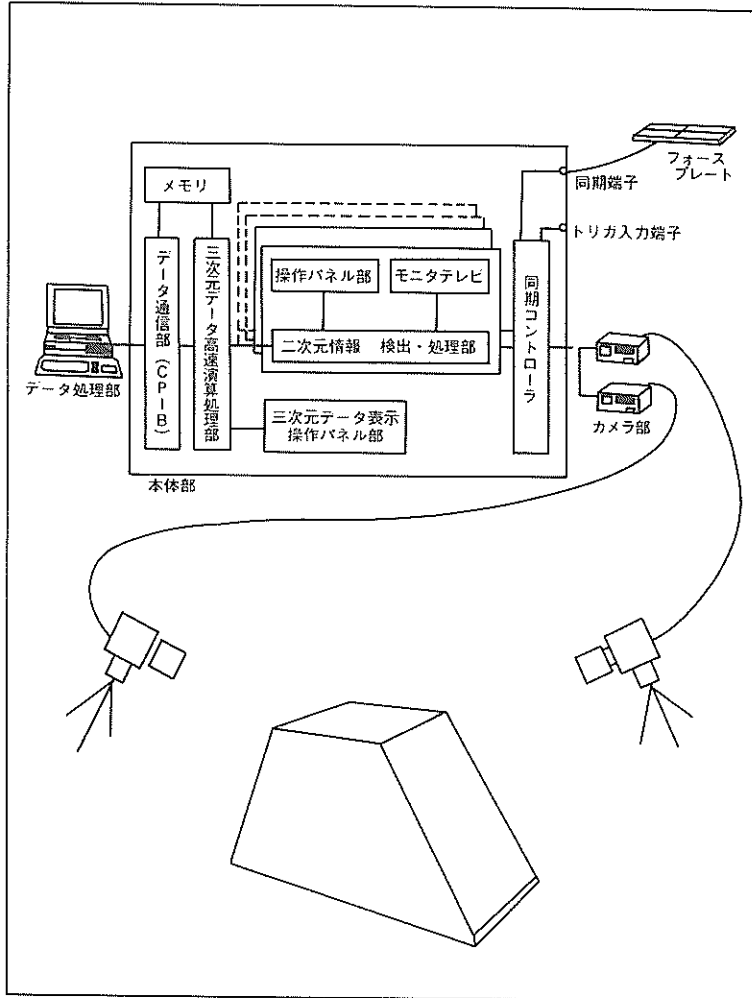


図-12 3次元運動解析システム構成

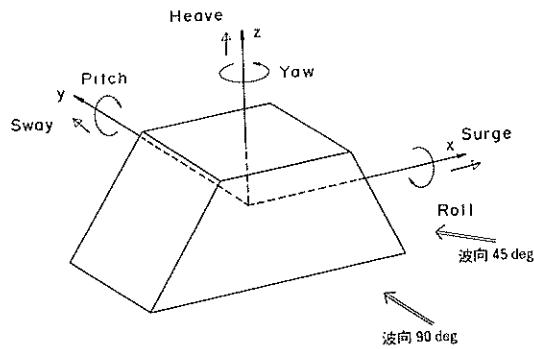


図-13 動揺量の正負

動揺

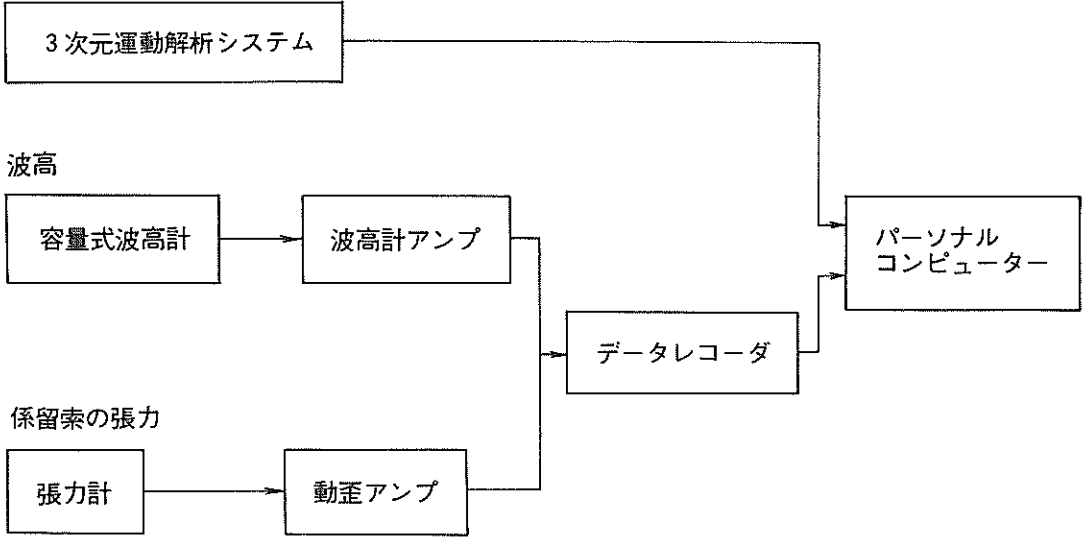


図-14 データ計測および解析のブロックチャート

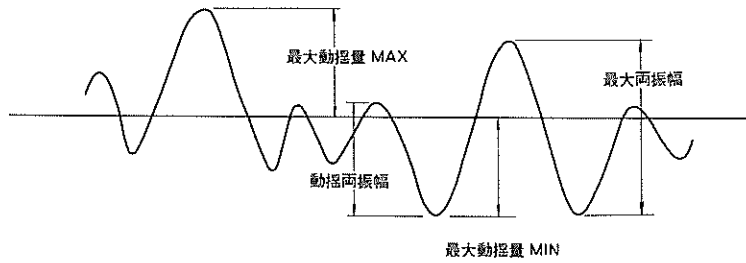


図-15 動揺量の最大値と動揺両振幅の定義

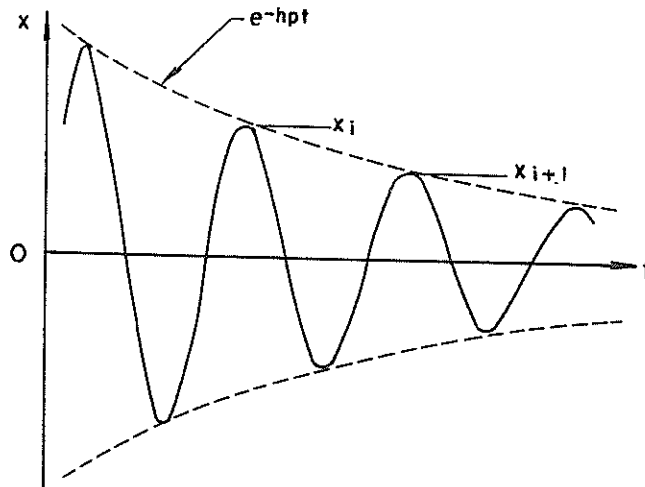


図-16 粘性減衰を受ける自由振動の振幅と時間

(5) 実験ケース

水理模型実験における波浪条件は、係留時、据付時について、それぞれ表-3に示すとおりである。これは、それぞれの条件において作業限界波高に相当するものである。

表-3 実験に用いた波浪諸元

工事場所	波浪種類	波向 (°)	波周期 (s)	波高 (m)
4号船溜	規則波	45,90	4,7,10,13,16	0.5
	不規則波	45,90	4,7,10	0.5
7号埠頭	規則波	0,45	4,7,10,13,16	0.5
	不規則波	0,45	4,7,10	0.5
仮置場	規則波	90	4,7,10,13,16	0.8
	不規則波	90	4,7,10	0.8
据付場	規則波	0,45	4,7,10,13,16	0.8
	不規則波	0,45	4,7,10	0.8

(注) 不規則波は有義波周期、有義波高を示す。

(6) 自由振動実験とその結果

実験水槽において模型浮体の動揺6成分について、自由振動実験を行ない、その結果より固有周期 T および対数減衰率 δ を求め、減衰定数 h' を求めた。ただし、サージ、スウェィ、ヨウについては有効な結果が得られず減衰定数および固有周期を求めることができなかったものがある。

図-16は減衰自由振動の振幅 X_i と時間 t との関係を示したものである。図-16において n 周期だけ離れている2つのピークの比より対数減衰率 δ は式(1)で定義される¹⁾。

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{X_i}{X_{i+n}} = \frac{2\pi h'}{\sqrt{1-h'^2}} \quad (1)$$

通常の振動系 ($h \ll 1$) では、

$$\delta \approx 2\pi h' \quad (2)$$

$$h' \approx \frac{1}{2\pi n} \ln \frac{X_i}{X_{i+n}} \quad (3)$$

と考えてよい。

模型浮体の固有周期 T 、その実機換算値、上記の式(1)~(3)より求めた模型浮体の対数減衰率 δ および減衰定数 h' を表-4に示す。

2. 3 動揺シミュレーション手法の概要

(1) 浮体の運動方程式と動揺シミュレーション手法

係留浮体が波浪荷重、風荷重などを受けて動揺する際

の運動方程式は式(4)のように記述される。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + N|x|\dot{x} + R(x)x = P \quad (4)$$

ここに、

M : 質量マトリックス

C : 減衰マトリックス

N : 非線形減衰マトリックス

$R(x)$: 静水圧復元力および係留系による復元力マトリックス

\ddot{x} : 加速度ベクトル

\dot{x} : 速度ベクトル

$|x|\dot{x}$: 速度の自乗ベクトル

x : 変位ベクトル

P : 荷重ベクトル (波浪荷重, 風荷重, 流れによる荷重など)

である。

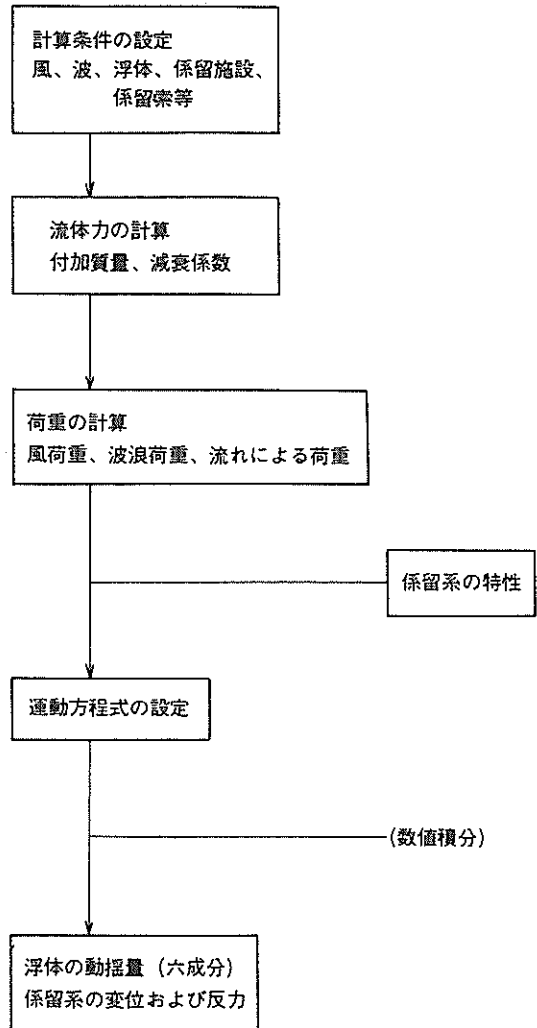


図-17 動揺シミュレーションのブロックチャート

表-4 自由振動実験結果

動揺成分	堤体断面	固有周期 (模型)	固有周期 (現地)	対数 減衰率	減衰定数
サージ	A 1 断面	13.00	82.21	0.122	0.019
	A 2 断面	-	-	-	-
	A 3 断面	-	-	-	-
	A 4 断面	-	-	-	-
スウェイ	A 1 断面	-	-	-	-
	A 2 断面	13.50	85.38	1.634	0.260
	A 3 断面	-	-	-	-
	A 4 断面	-	-	-	-
ヒープ	A 1 断面	3.32	21.00	0.394	0.063
	A 2 断面	1.35	8.52	0.702	0.112
	A 3 断面	2.13	13.45	0.292	0.046
	A 4 断面	2.50	15.81	0.355	0.057
ロール	A 1 断面	7.72	48.83	0.064	0.010
	A 2 断面	2.74	17.33	0.780	0.124
	A 3 断面	2.59	16.40	0.195	0.031
	A 4 断面	1.64	10.37	0.347	0.055
ピッチ	A 1 断面	3.10	19.61	0.143	0.023
	A 2 断面	1.62	10.25	0.339	0.054
	A 3 断面	2.45	15.48	0.482	0.077
	A 4 断面	5.30	33.52	0.912	0.145
ヨウ	A 1 断面	0.89	5.61	0.088	0.014
	A 2 断面	13.01	82.28	1.885	0.300
	A 3 断面	-	-	-	-
	A 4 断面	12.50	79.06	1.138	0.181

(注) -は有効な結果が得られなかったものである。

式(4)は二階の連立微分方程式であり、浮体に作用する荷重が不規則荷重でかつ係留系の変位復元力特性が非線形の場合は、動揺シミュレーションを行ない動揺量および係留系の変位復元力を計算するのが良い。

図-17は動揺シミュレーションのブロックチャートである。詳細については文献(2)に記述されている。浮体の

運動成分は図-13に示す六成分(サージ、スウェイ、ヒープの並進三成分、ロール、ピッチ、ヨウの回転三成分)である。

(2) 特異点分布法による波力およびラディエーション流体力の計算法

a) 速度ポテンシャルと基礎方程式

台形ケーソンに作用する波力およびラディエーション流体力は3次元特異点分布法²⁾を用いて計算する。3次元特異点分布法は、浮体表面に設けた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。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。浮体表面上のわきだしの強さはGreen関数を用いて表現するが、Green関数の未知定数は基礎方程式(ラプラス方程式)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。

イ) 速度ポテンシャル

速度ポテンシャルは式(5)および式(6)で示される。

$$\Phi(x, y, z; t) = \phi_0 e^{-i\omega t} + \sum_{j=1}^7 \phi_j e^{-i\omega t} \quad (5)$$

$$\Phi(x, y, z; t) = \phi_j(x, y, z) e^{-i\omega t} \quad (6)$$

ここに、

Φ : 全速度ポテンシャル

ϕ_0 : 入射波の速度ポテンシャル

$\phi_j \sim \phi_7$: 物体を強制動揺させたときの各運動モードの速度ポテンシャル

($j=1$: サージ, $j=2$: スウェイ, $j=3$: ヒープ, $j=4$: ローラ, $j=5$: ピッチ, $j=6$: ヨウ)

ϕ_7 : 散乱波の速度ポテンシャル

$\phi_0 \sim \phi_7$: 速度ポテンシャルの時間成分

x, y, z : 座標

t : 時刻

i : 虚数単位

ω : 角周波数

である。

ロ) 基礎方程式(ラプラス方程式)

基礎方程式(ラプラス方程式)は式(7)で記述される。

$$\Delta \phi_j(x, y, z) = 0 \quad (j=1, 7) \quad (7)$$

ハ) 境界条件

境界条件は式(8)~式(11)で与えられる。

イ) 自由表面条件

流体の表面($z=0$)では自由表面条件である式(8)が満足される。

$$\frac{\partial}{\partial z} \phi_j(x, y, 0) - \frac{\omega^2}{g} \phi_j(x, y, 0) = 0 \quad (8)$$

ロ) 海底条件

海底($z=-h$)では、式(9)が満足される。

$$\frac{\partial}{\partial z} \phi_j(x, y, -h) = 0 \quad (9)$$

ハ) 物体表面の条件

物体表面では、式(10)が満足される。

$$\frac{\partial}{\partial n} \phi_j(x, y, z) = v_j(x, y, z) \quad (10)$$

ニ) 放射条件

無限遠($r=\infty$)では、式(11)が満足される。

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{\left\{ \frac{\partial}{\partial r} \phi_j(r, \theta, z) - ik \phi_j(r, \theta, z) \right\}} = 0 \quad (11)$$

ただし、

$v_j(j=1\sim 7)$ は複素流速で式(12)~(18)で与えられる。

$$v_1 = -i\omega X_1 n_x \quad (12)$$

$$v_2 = -i\omega X_2 n_y \quad (13)$$

$$v_3 = -i\omega X_3 n_z \quad (14)$$

$$v_4 = -i\omega X_4 [(y-y_0) n_x - (z-z_0) n_y] \quad (15)$$

$$v_5 = -i\omega X_5 [(z-z_0) n_x - (x-x_0) n_z] \quad (16)$$

$$v_6 = -i\omega X_6 [(x-x_0) n_y - (y-y_0) n_z] \quad (17)$$

$$v_7 = -\frac{\partial}{\partial n} \phi_0 \quad (18)$$

X_j : j 方向の運動モードの強制動揺の振幅

g : 重力加速度

h : 水深

k : 波数

r, θ : 極座標

x_0, y_0, z_0 : 浮体の重心座標

n_x, n_y, n_z : 単位法線ベクトル n の X 軸, Y 軸, Z 軸方向成分

である。

シ) Green関数と解法

上記の境界条件を満足するGreen関数を G とし、物体表面のわき出し(Sorce)の強さを σ とする。物体表面上の Q 点で強さ $\sigma(Q)$ のわき出しがあるとき、 P 点のポテンシャルは次式で与えられる。

$$\Phi(P) = \frac{1}{4\pi} \int_{Q \in S_0} \sigma(Q) G(P, Q) ds \quad (19)$$

ここに、

$P = (x, y, z)$: 流体中の任意の点

$Q = (\xi, \eta, \zeta)$: 物体表面上のわき出し点

$\sigma(Q)$: わき出し強さ、未知量で物体表面の境界条件を満足するように決める

$G(P, Q)$: Green関数

S_0 : 物体表面

である。

式(19)の両辺を $\partial/\partial n$ で微分すると $\sigma(P)$ に関する積分方程式となる。

$$\frac{\partial(P)}{\partial n} = -\frac{\sigma(P)}{2} + \int_{Q \in S_0} \sigma(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} ds \quad (20)$$

ここに、

$$\frac{\partial}{\partial n} : P \text{ 点における法線方向微分}$$

ds : Q に関する面積分である。

式(20)に式(10)の境界条件を代入すると積分方程式(21)が得られるので、これを解き式(19)に代入すれば、流体中の任意点の速度ポテンシャルが得られる。実際には浮体表面を要素(面要素)に分割し、積分方程式を離散化して解を求める。

$$\sigma(P) = -2v_i(P) + \frac{1}{2\pi} \int_{Q \in S_0} \sigma(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} ds \quad (21)$$

ここに、

$v_i(P)$: P 点における運動モード i による複素流速である。

有限水深、物体の前進速度が無い場合の Green 関数は以下の式で与えられる。式(22)の級数型の Green 関数は収束が早い、 P が Q に一致する場合は発散するので、その場合には式(23)の積分型の Green 関数を用いる。

級数型の Green 関数

$$G(P, Q) = \frac{2\pi(\nu^2 - h^2)}{k^2 h - \nu^2 h + \nu} \cosh[k(\zeta + h)] \cosh[k(z + h)] \times [Y_0(kr) + iJ_0(kr)] + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(k_n^2 + \nu^2)}{k_n^2 h + \nu^2 h - \nu} \cosh[k_n(z + h)] \cdot \cosh[k_n(\zeta + h)] \times K_0(k_n r) \quad (22)$$

積分型の Green 関数

$$G(P, Q) = \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} + 2P.V. \int_0^{\infty} \frac{(\mu + \nu)e^{-\mu h} \cosh[\mu(\zeta + h)]}{(\mu \sinh \mu h - \nu \cosh \mu h)} \cosh[\mu(z + h)] J_0(\mu r) d\mu + 2\pi i \frac{(k^2 - \nu^2) \cosh[k(\zeta + h)]}{(k^2 h - \nu^2 h + \nu)} \cosh[k(z + h)] \cdot J_0(kr) \quad (23)$$

ここに、

$$\nu : \nu = k \tanh kh$$

$P.V.$: 主値

h : 水深

k : 波数

k_n : n 次の波数

$$R : R = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}$$

$$R' : R' = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z + 2h + \zeta)^2}$$

$$r : r = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}$$

$J_0(X)$: 第1種 Bessel 関数

$Y_0(X)$: 第2種 Bessel 関数

$K_0(X)$: 第2種変形 Bessel 関数

である。

d) 波力およびラディエーション流体力の計算

a) ~ c) で示した諸式を解くことにより、入射波および散乱波の速度ポテンシャルが求められ、また、浮体表面上の波圧分布が求められる。そこで、波圧を構造物の表面で積分することにより浮体の重心点に作用する波力および波力モーメントを計算する。この様にして得られた波力を式(4)の運動方程式の右辺 P に与える。

次に、ラディエーション流体力を求め、浮体にそれぞれの運動モードで単位振幅の強制動揺を与え、このうち加速度に比例する成分を付加質量または付加慣性モーメントとして式(4)の運動方程式の左辺の質量マトリックス M に、速度に比例する成分を減衰係数として左辺の減衰マトリックス C に与える。

波力およびラディエーション流体力の計算に際しては、浮体表面を面要素に分割する。本資料の計算においては面要素の分割数は、A1断面、A2断面、A3断面、A4断面についてそれぞれ、220、376、376、376である。A1断面は他の断面に比べて分割数が少ないが、半断面であるので分割される個々の面積は他の断面に等しい。

なお、分割数が流体力係数の計算値に及ぼす影響については3.1において述べる。

動揺計算において付加質量、付加慣性モーメントおよび減衰定数は計算値を用いるが、ロールおよびピッチについては、渦の発生による減衰力を考慮することが必要である。計算ではこれを評価することができないので、ロールおよびピッチについては自由振動実験によって得られた付加質量および減衰定数を用いることとした。また、4号船溜のA1断面については3次元特異点分布法で求められる付加質量を用いて計算したヒープの固有周期が、自由振動実験で得られた固有周期と大きく異なっていたので、自由振動実験で得られた付加質量を用いて動揺計算を行なうこととした。

表-5は、自由振動実験の結果得られた固有周期および減衰定数をもとに計算したロールとピッチの慣性モーメントと付加慣性モーメントとの和（以下、仮想慣性モーメントと記述する。）および減衰係数を示したものである。また、4号船溜A1断面についてはヒープの仮想質量についても示している。その他のサージ、スウェイ、ヨウについては付加質量および付加慣性モーメントおよび減衰係数は特異点分布法による計算値を用いた。ただし、A1断面およびA4断面についてはサージ、スウェイの長周期波側に対する動揺量の計算値が実験値に比べて大きくなる傾向がみられたので、これらの動揺成分に対する減衰係数を修正した動揺計算を行なった。

e) 動揺シミュレーションのタイムステップ

動揺シミュレーションの、タイムステップ $\Delta t=0.2s$ として模型実験結果と対応させるため繰返し回数を11400回（実時間2280s）として行なった。

計算結果の統計処理は、模型実験結果と同様に、計算初期のデータを除いた379~2280sの間の動揺量、係留力について行った。

3. 模型実験結果および計算結果との比較

3.1 波力およびラディエーション流体力

(1) 分割数とその影響

ここでは、計算に要する時間等を考慮してA1断面について特異点分布法における浮体表面の要素分割数を220とするが、要素分割数は波力およびラディエーション流体力の計算値に影響を及ぼすので要素分割数が880の計算を行なって比較をしておく。なお、要素分割数が220については波長 λ と浮体表面の要素の長さ $(\Delta \ell)$ と

表-5 自由振動実験より求めた仮想質量、仮想慣性モーメントおよび減衰係数

係留場所	堤体断面	係留状態		仮想質量および仮想慣性モーメント			減衰係数	
		係留方法	初期張力	HEAVE (kgfs ² /m)	ROLL (kgfms ²)	PITCH (kgfms ²)	ROLL (kgfms)	PITCH (kgfms)
4号船溜	A1断面	クロス	3tf	0.294×10 ⁷	0.205×10 ⁶	0.303×10 ⁶	0.227×10 ⁶	0.405×10 ⁶
7号埠頭	A2断面	40°	0tf		0.216×10 ⁶	0.117×10 ⁶	0.198×10 ⁷	0.776×10 ⁷
仮置場	A3断面		3tf		0.296×10 ⁶	0.125×10 ⁶	0.712×10 ⁶	0.812×10 ⁷
据付場	A4断面		2tf		0.784×10 ⁶	0.333×10 ⁶	0.228×10 ⁶	0.232×10 ⁶

の比は、波周期4sに対しては、 $\lambda/(\Delta \ell)=14\sim 90$ 、波周期10sに対しては、 $\lambda/(\Delta \ell)=23\sim 152$ である。また、要素分割数880については、要素分割数220に対して各要素の長さ $(\Delta \ell)$ をそれぞれ1/2としたものである。

図-18-(1)~(6)はA1断面について、波向45°、波高1.0mの規則波中における各成分の波力を要素分割数220および880について比較して示したものである。要素分割数による波力の差異は、 F_y 、 M_x 、 M_z についてややみられる。

次に、図-19-(1)~(6)は各動揺成分の付加質量および付加慣性モーメントを要素分割数220および880について比較して示したものである。ヒープ、ロール、ピッチの付加質量および付加慣性モーメントについては分割数による差異はあまり大きくないが、サージおよびスウェイの付加質量については、波周期8s以上で、ヨウの付加慣性モーメントについては波周期4s以上でやや差異がある。

図-20-(1)~(6)は各動揺成分の減衰係数を要素分割数220および880について比較して示したものである。両者はよく合っているが、ヒープの減衰定数については波周期4.5s~7sにおいて、やや差異がみられる。

以上のことから、要素分割数大きい程計算精度が向上するものと思われるが、ここでは、要素分割数による計算値の差異はさほど大きくないと考えられるので、A1断面については220分割とする。ただし、接合後のA2断面は、A1断面を2個接合したものである。要素分割数220の2倍は440であるが、接合面については分割する必要がないので要素分割数は376となる。A3断面、A4断面についてもA2断面と同じ分割数とした。

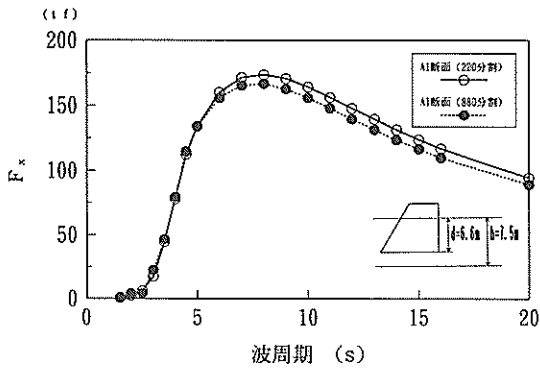


図-18-(1) 要素分割数と波力の関係 (サージ)

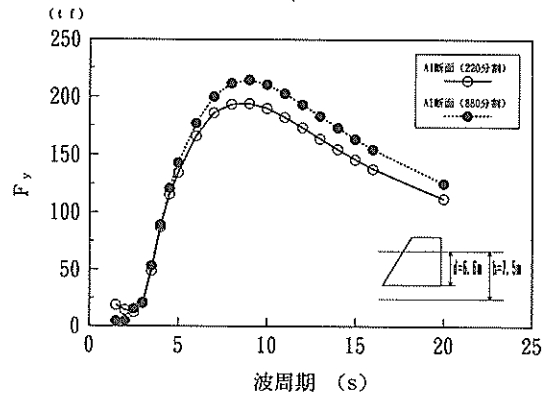


図-18-(2) 要素分割数と波力の関係 (スウェィ)

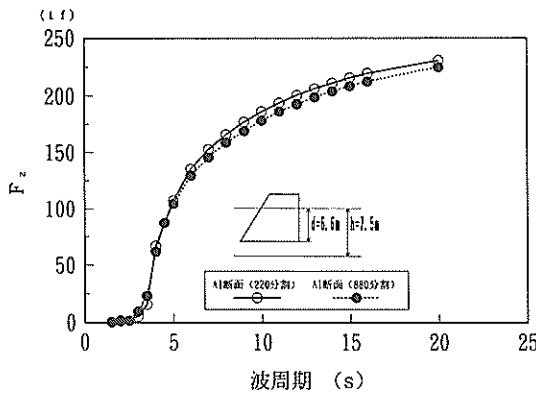


図-18-(3) 要素分割数と波力の関係 (ヒーブ)

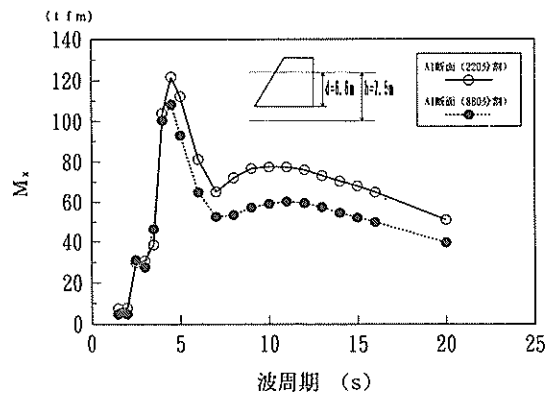


図-18-(4) 要素分割数と波力の関係 (ロール)

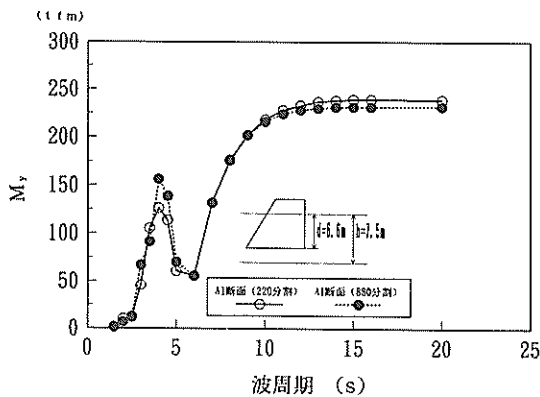


図-18-(5) 要素分割数と波力の関係 (ピッチ)

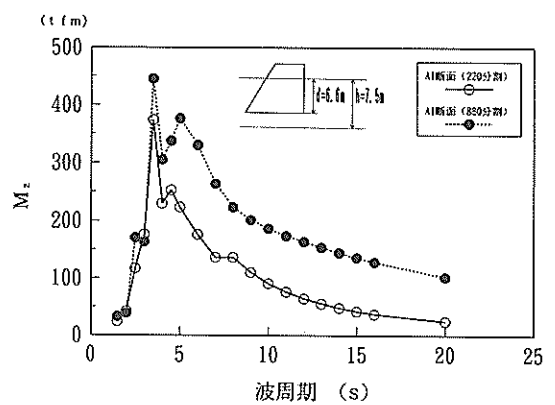


図-18-(6) 要素分割数と波力の関係 (ヨウ)

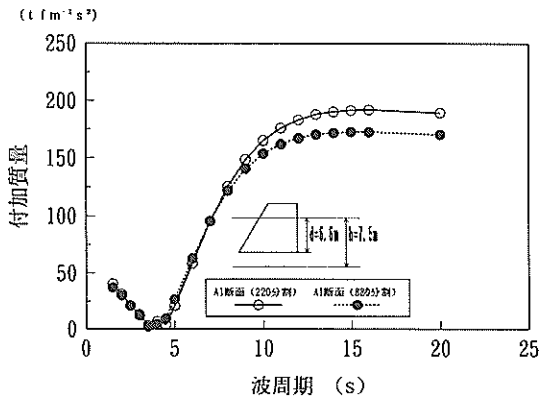


図-19-(1) 要素分割数と付加質量の関係 (サージ)

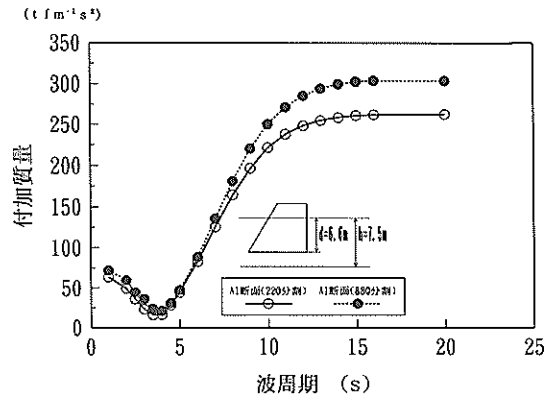


図-19-(2) 要素分割数と付加質量の関係 (スウェー)

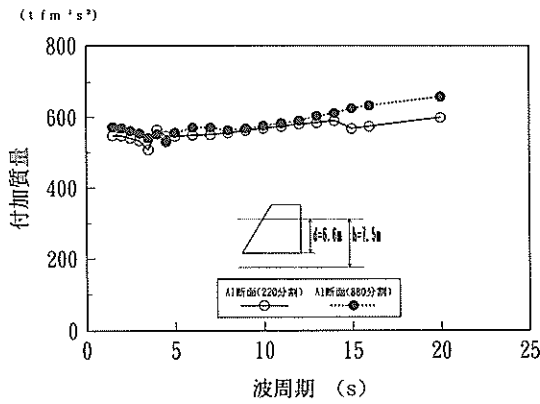


図-19-(3) 要素分割数と付加質量の関係 (ヒープ)

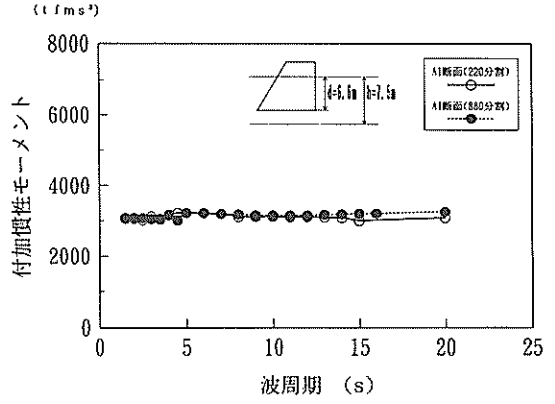


図-19-(4) 要素分割数と付加慣性モーメントの関係 (ロール)

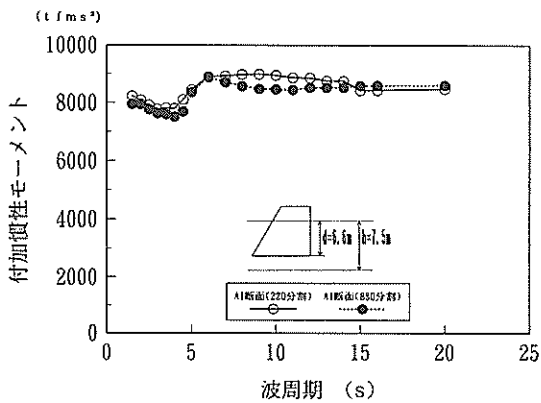


図-19-(5) 要素分割数と付加慣性モーメントの関係 (ピッチ)

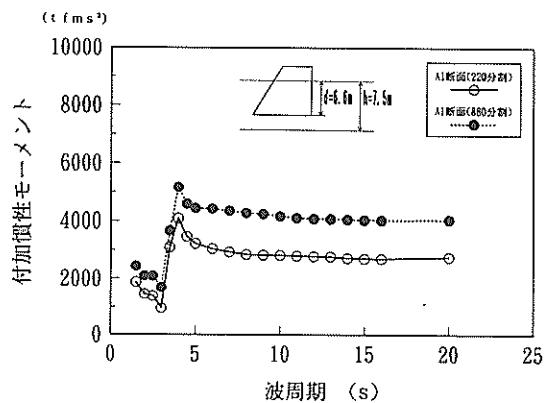


図-19-(6) 要素分割数と付加慣性モーメントの関係 (ヨウ)

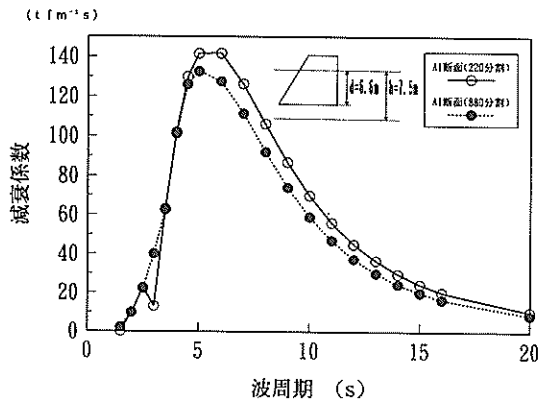


図-20-(1) 要素分割数と減衰係数の関係 (サージ)

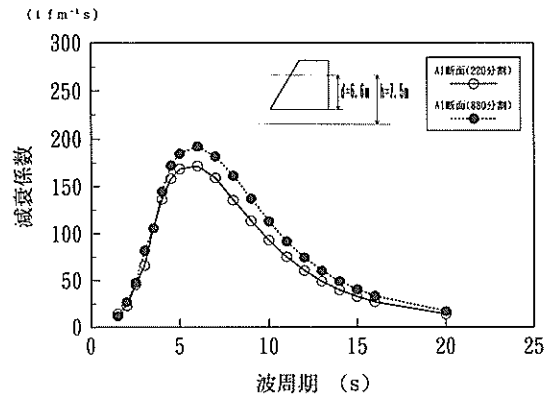


図-20-(2) 要素分割数と減衰係数の関係 (スウェイ)

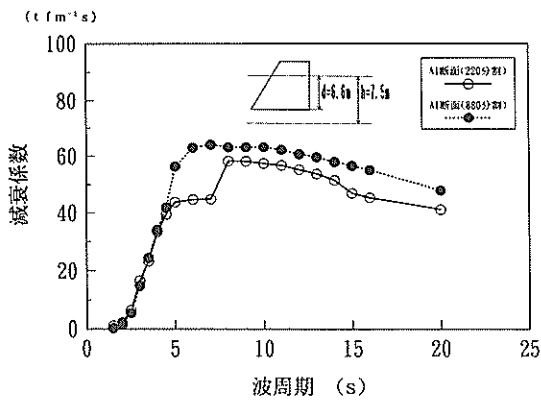


図-20-(3) 要素分割数と減衰係数の関係 (ヒープ)

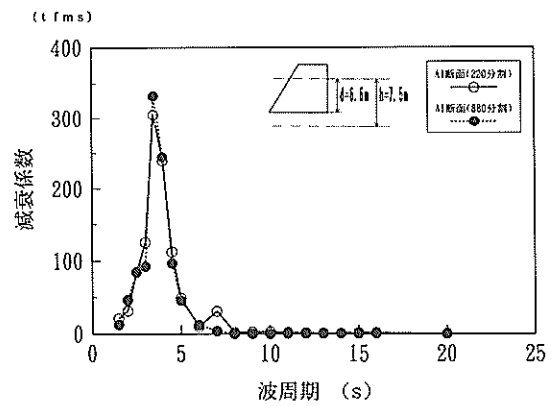


図-20-(4) 要素分割数と減衰係数の関係 (ロール)

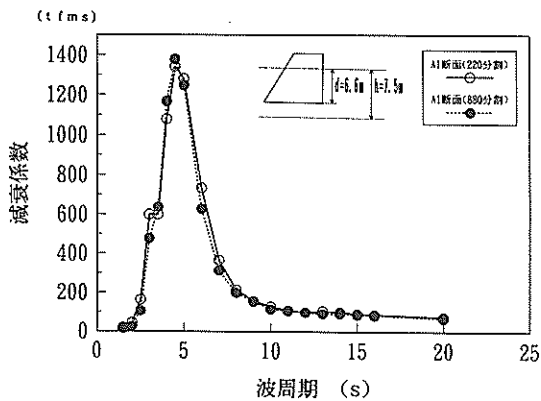


図-20-(5) 要素分割数と減衰係数の関係 (ピッチ)

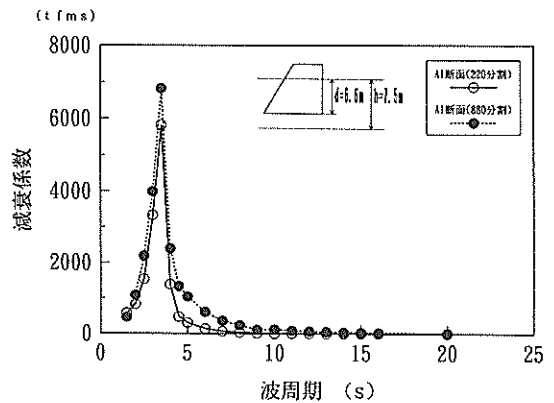


図-20-(6) 要素分割数と減衰係数の関係 (ヨウ)

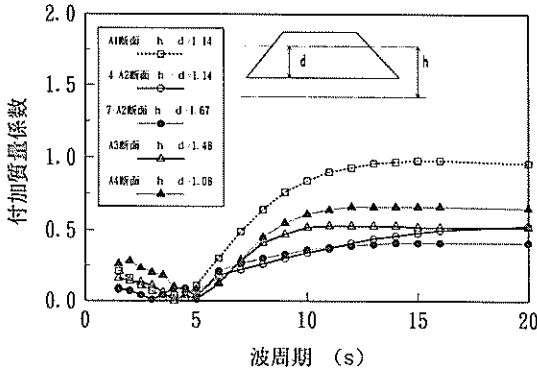


図-21-(1) 台形ケーソンの付加質量係数 (サージ)

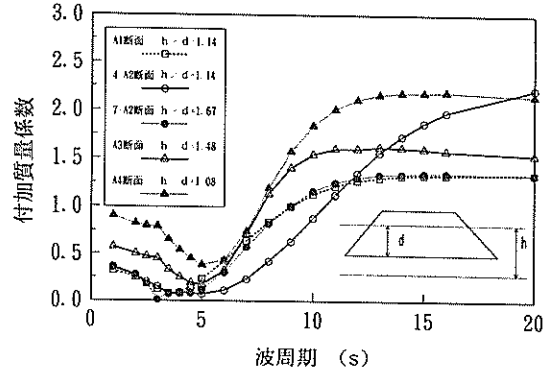


図-21-(2) 台形ケーソンの付加質量係数 (スウェー)

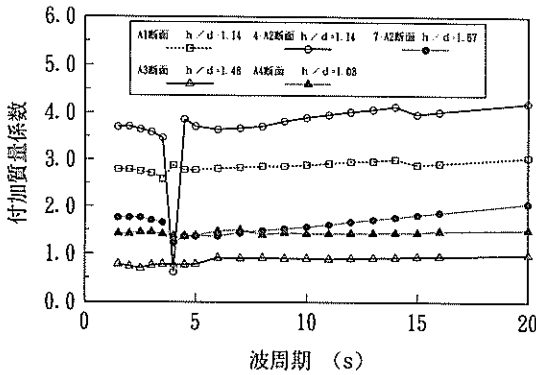


図-21-(3) 台形ケーソンの付加質量係数 (ヒープ)

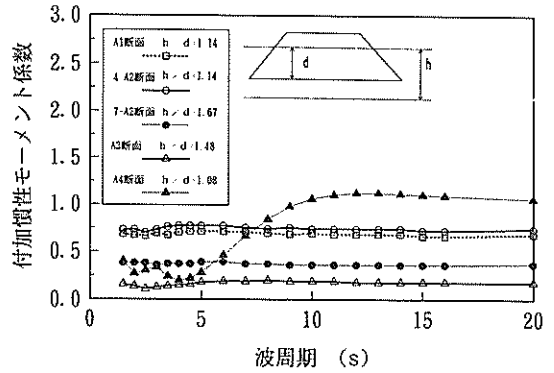


図-21-(4) 台形ケーソンの付加慣性モーメント係数 (ロール)

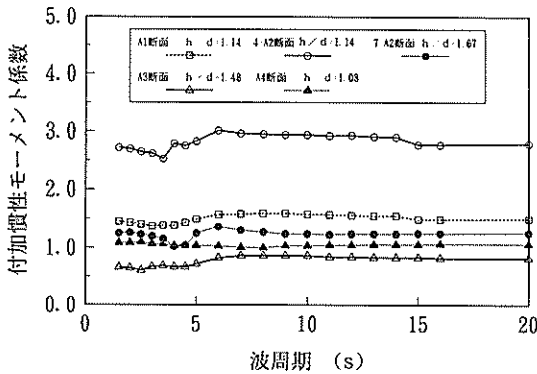


図-21-(5) 台形ケーソンの付加慣性モーメント係数 (ピッチ)

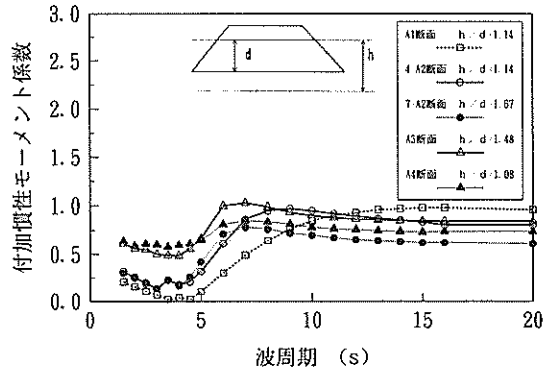


図-21-(6) 台形ケーソンの付加慣性モーメント係数 (ヨウ)

(2) アンダーキールクリアランスとその影響

a) 付加質量係数および付加慣性モーメント係数

図-21-(1)~(6)には各動揺成分について付加質量係数または付加慣性モーメント係数の計算値を示したものである。図には水深喫水比の異なる5つの断面の数値を示している。まず、同一喫水で水深が異なる4-A2断面 ($h/d=1.14$)と7-A2断面 ($h/d=1.67$)とを比較する。図中では前者は○で後者は●で示している。ヒープ、ロール、ピッチの付加質量係数または付加慣性モーメント係数については、全周期にわたってアンダーキールクリアランスの小さい4-A2断面の数値が大きい。これに対して、サージ、スウェイの付加質量およびヨウの付加慣性モーメント係数は短周期側ではあまり差異が大きくないが、長周期側ではヒープ、ロール、ピッチと同様にアンダーキールクリアランスの小さい4-A2断面の数値が大きい。

次に、水深がほぼ同一で、喫水の異なるA3断面 ($h/d=1.48$)とA4断面 ($h/d=1.08$)について比較する。図中では前者は△で、後者は▲で示している。ヨウを除く各成分については、アンダーキールクリアランスの小さいA4断面の付加質量係数または付加慣性モーメント係数がA3断面のそれよりも大きい。なお、図-21-(3)に示すように4-A2断面の周期 $4s$ における付加質量係数が急に小さくなり不連続になっている。このような場合には流体力係数は近傍の周期に対する数値を参考に適切に選定するのが良い。

図-22-(1)~(3)は横軸に水深喫水比 h/d をとり、ヒープ、ロール、ピッチの付加質量係数または付加慣性モーメント係数の計算値および実験値を示したものである。ヒープの付加質量係数についてはA1断面 ($h/d=1.14$)の計算値が7-A2断面 ($h/d=1.67$)の計算値よりも大きくアンダーキールクリアランスの影響が大きい。ただし、A1断面の実験値では、ヒープの付加質量係数、ロールおよびピッチの付加慣性モーメント係数がそれぞれ、13.5、17.9、4.3であって計算値に比べて極めて大きい。A1断面は半断面であるので自由振動実験を行なった際に、例えばヒープの自由振動を生じさせても同時にロール、ピッチの運動が生じ、極めて周期の長い複雑な運動をしていた。これは接合前の断面が非対称であることによる静水圧的復元力の非対称性に起因するものと考えられる。このことから、A1断面については自由振動実験において得られている付加質量係数および付加慣性モーメント係数は精度上のあると思われる。

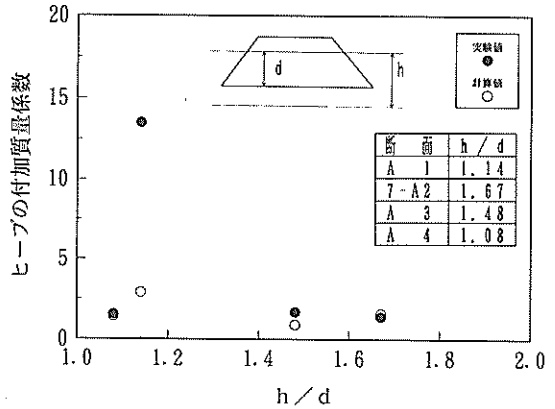


図-22-(1) 水深喫水比と付加質量係数 (ヒープ)

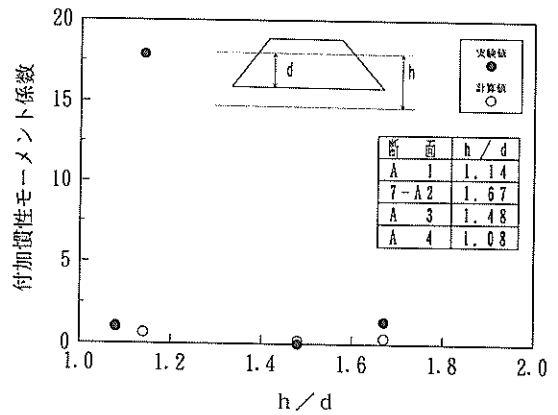


図-22-(2) 水深喫水比と付加慣性モーメント係数 (ロール)

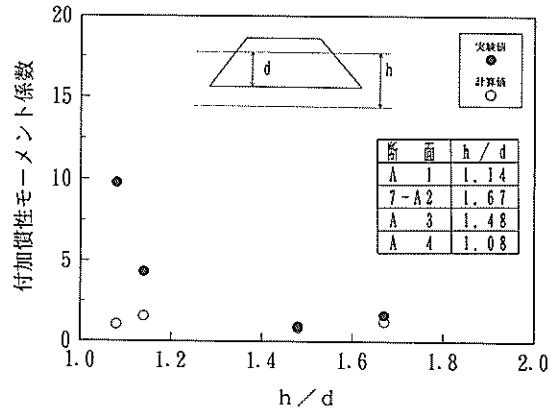


図-22-(3) 水深喫水比と付加慣性モーメント係数 (ピッチ)

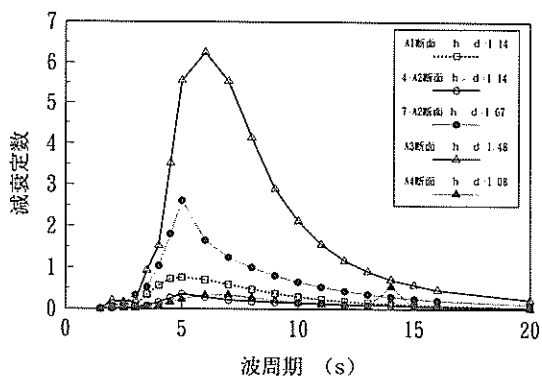


図-23-(1) 台形ケーソンの減衰定数 (サージ)

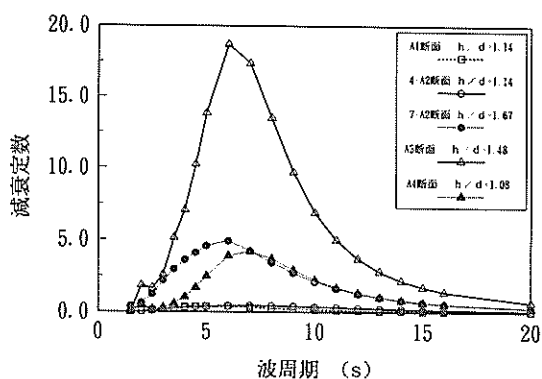


図-23-(2) 台形ケーソンの減衰定数 (スウェイ)

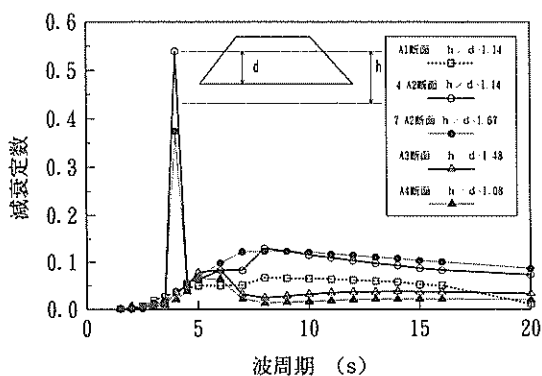


図-23-(3) 台形ケーソンの減衰定数 (ヒープ)

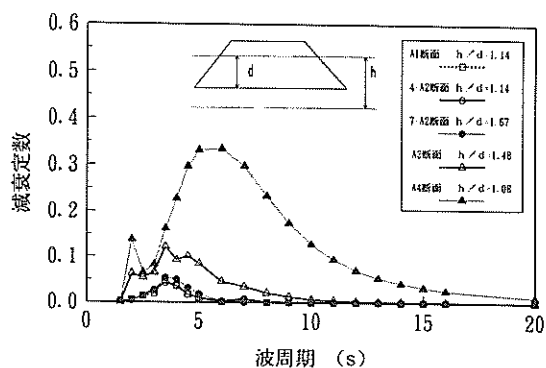


図-23-(4) 台形ケーソンの減衰定数 (ロール)

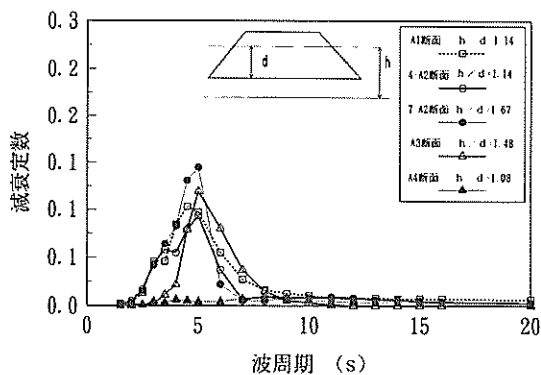


図-23-(5) 台形ケーソンの減衰定数 (ピッチ)

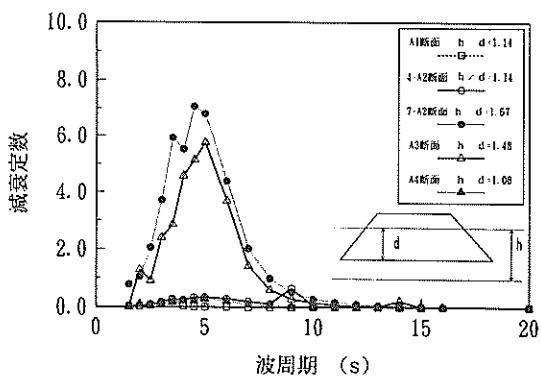


図-23-(6) 台形ケーソンの減衰定数 (ヨウ)

b) 減衰定数

図-23-(1)~(6)は各動揺成分について、減衰定数の計算値を示したものである。図には水深喫水比の異なる5つの断面の数値を示している。なお、サージ、スウェイ、ヨウの7-A2断面およびA3断面において減衰定数 h' が大きい、これらの断面においては係留系によるばね定数 K が小さいために $h'=(C/M)/(2\sqrt{K/M})$ (ただし、 C :減衰係数、 M :仮想質量)として得られる減衰定数が大きくなっている。まず、同一喫水で水深の異なる4-A2断面および7-A2断面とを比較すると、サージ、スウェイ、ヨウについては差異がみられるが、ヒープ、ロール、ピッチの減衰定数については差異が小さい。

次に、水深がほぼ同一で、喫水の異なるA3断面とA4断面について減衰定数を比較する。各動揺成分について、差異がみられる。

図-24-(1)~(3)は横軸に水深喫水比 h/d をとり、ヒープ、ロール、ピッチの減衰定数の計算値および実験値を示したものである。ヒープ、ロール、ピッチの減衰定数について、アンダーキールクリアランスの影響は小さい。ヒープのA4断面、ロールの7-A2断面、ピッチのA1、A2、A3断面では計算値の減衰定数は実験値よりも小さい。これは計算においては、浮体の動揺に伴って生ずる渦の発生による影響が考慮されていないためである。

3.2 動揺量

各動揺成分の動揺両振幅および動揺周期の実験値および計算値を以下の図に示す。

4号船溜 A1断面 (図-25~図-28)

7号埠頭 A2断面 (図-29~図-32)

仮置場 A3断面 (図-33~図-34)

据付場 A4断面 (図-35~図-38)

図の横軸は規則波に対してはその波周期、不規則波に対しては有義波周期、縦軸は各動揺成分の動揺両振幅の有義値($A_{1/3}$)および周期の有義値($T_{1/3}$)である。規則波に対しては動揺両振幅はおおむね一定であったが、実験値の一部については実験値に含まれる長周期成分のため動揺両振幅が一定となっていないものがあつたため、不規則波中の実験値と同様に統計処理して求めた有義値を図示している。なお、以下の図面は、すべて実機換算の数値で示している。

(1) 4号船溜 A1断面

a) 波向45°

各動揺成分について図-25-(1)~(5)に、動揺両振幅の

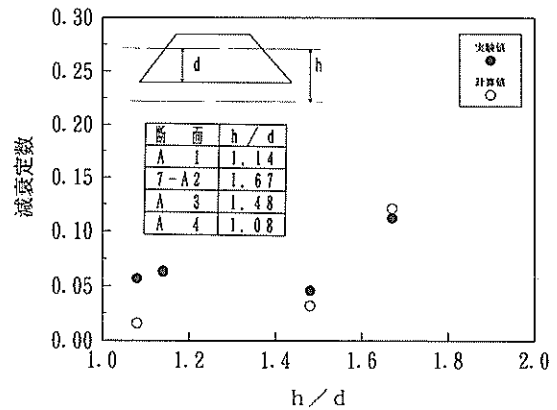


図-24-(1) 水深喫水比と減衰定数 (ヒープ)

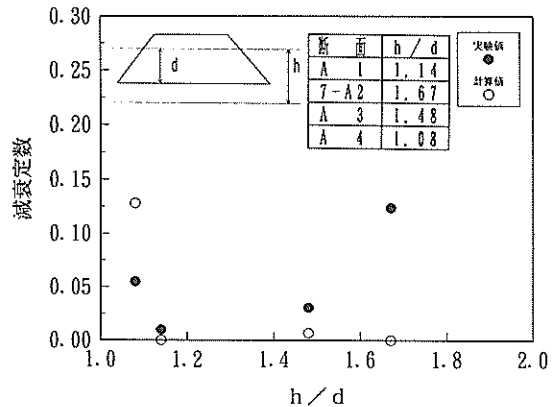


図-24-(2) 水深喫水比と減衰定数 (ロール)

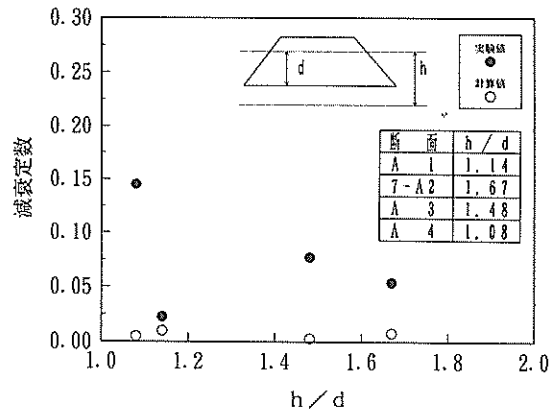


図-24-(3) 水深喫水比と減衰定数 (ピッチ)

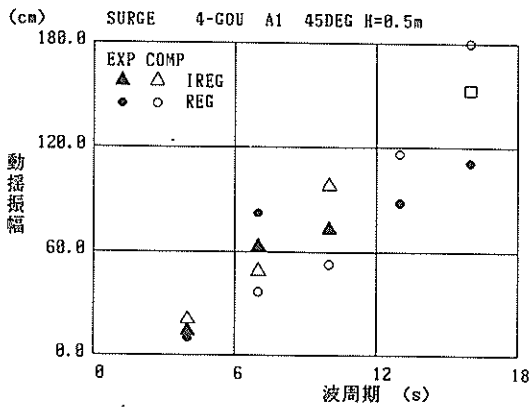


図-25-(1) 4号船溜 A1断面の動揺振幅
(波向45°, 波高 $H=0.5\text{m}$, サージ)

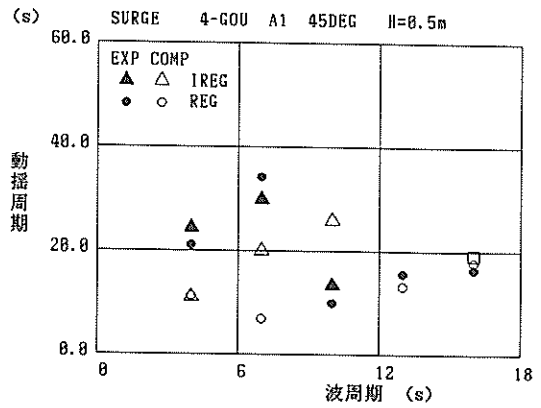


図-26-(1) 4号船溜 A1断面の動揺周期
(波向45°, 波高 $H=0.5\text{m}$, サージ)

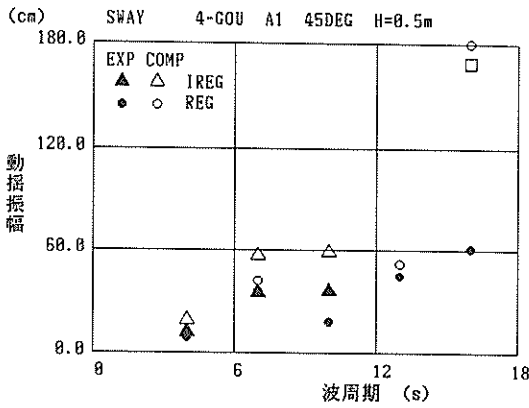


図-25-(2) 4号船溜 A1断面の動揺振幅
(波向45°, 波高 $H=0.5\text{m}$, スウェイ)

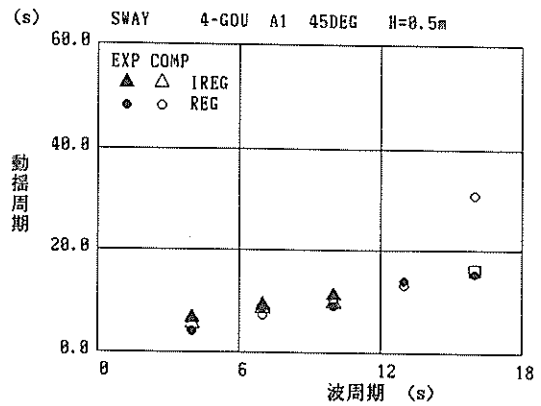


図-26-(2) 4号船溜 A1断面の動揺周期
(波向45°, 波高 $H=0.5\text{m}$, スウェイ)

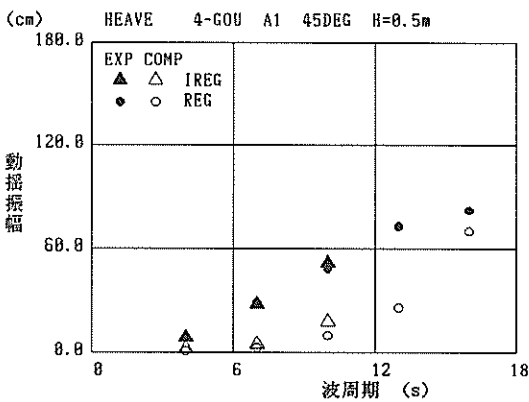


図-25-(3) 4号船溜 A1断面の動揺振幅
(波向45°, 波高 $H=0.5\text{m}$, ヒープ)

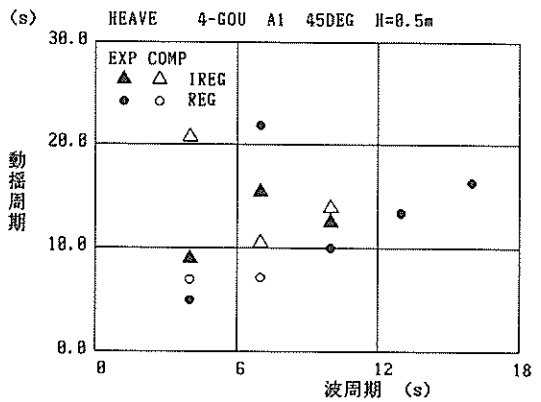


図-26-(3) 4号船溜 A1断面の動揺周期
(波向45°, 波高 $H=0.5\text{m}$, ヒープ)

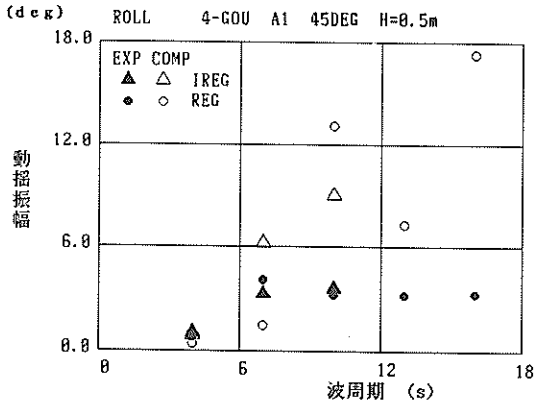


図-25-(4) 4号船溜 A1断面の動揺振幅
(波向45°, 波高H=0.5m, ロール)

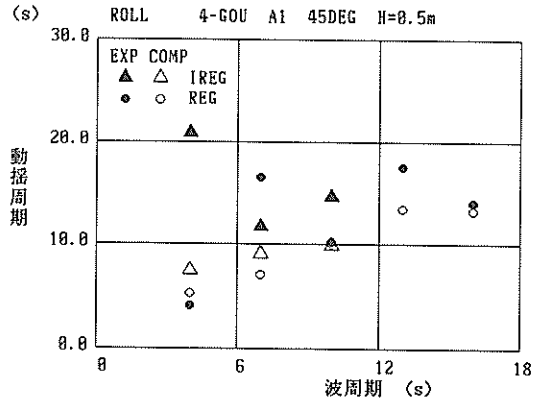


図-26-(4) 4号船溜 A1断面の動揺周期
(波向45°, 波高H=0.5m, ロール)

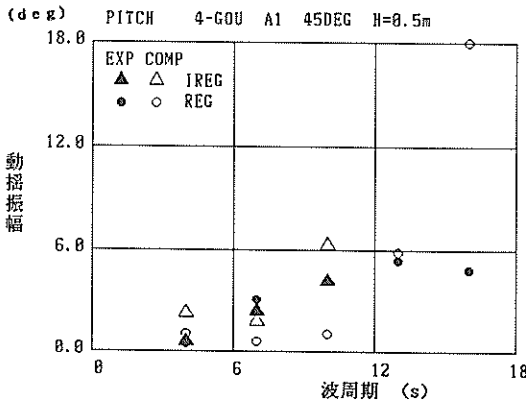


図-25-(5) 4号船溜 A1断面の動揺振幅
(波向45°, 波高H=0.5m, ピッチ)

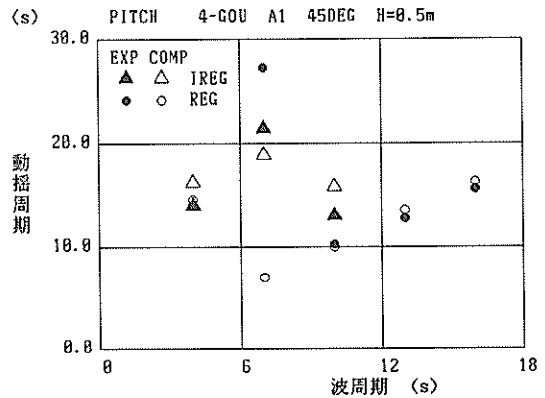


図-26-(5) 4号船溜 A1断面の動揺周期
(波向45°, 波高H=0.5m, ピッチ)

有義値の、また、図-26-(1)~(5)に、動揺周期の計算値と実験値を、それぞれ比較して示している。図番号の(1)~(5)は動揺成分に対応しており、(1)はサージ、(2)はスウェイ、(3)はヒープ、(4)はロール、(5)はピッチに対応する。なお、規則波による実験値は●、計算値は○、不規則波による実験値は▲、計算値は△で示している。不規則波中の動揺量の実験値および計算値は、浮体の動揺量が長周期波に対して大きくなるという傾向があるので規則波に対するものよりも大きい。

全体的にみれば、4号船溜A1断面の動揺両振幅の計算値は実験値とおおむね対応していると考えられるが、幾つか相違している箇所もあるので、これらの点について考察を行なう。

規則波のサージ、スウェイ、ロール、ピッチについては波周期16sにおける動揺両振幅の計算値が実験値に比

べて大きい。これは、サージの固有周期が実験値では82.2sであるのに対して、計算値では18.9sであり計算では固有周期に近いためである。自由振動実験で得られている固有周期よりサージの付加質量係数を求めると33.8である。前にも示した様にA1断面は半断面であり自由振動実験の際に周期の長い複雑な運動をしていたことから付加質量係数の実験値に精度上の問題があると考えられること、また、付加質量係数がこのように大きくなるのは考えにくいことから、計算において用いられている係留索の変位復元力特性が実際よりも硬くなっていることも考えられる。なお、スウェイについても同様に考えられる。この様にサージおよびスウェイについて波周期16sの動揺両振幅の計算値が大きくなる原因は必ずしも明らかでないが、計算値においては固有周期に近いため、減衰定数が動揺両振幅に及ぼす影響は大きい。例えば、

箱型浮体についてスウェイの減衰定数を計算値の1.5倍および3倍に修正して動揺量の比較が行なわれている²⁾。そこで、ここでも動揺量が極めて大きくなっている波周期16sについて、サージおよびスウェイの減衰定数を周期16sにおける計算値の4倍に相当する $h' = 0.248$ および $h'' = 0.180$ に修正して計算した結果を図中に□で示した。この修正の結果はサージの動揺両振幅は392cmから153cmに、またスウェイは268cmから169cmに低減して実験値に近づく傾向がみられる。

図-25-(3)に示すようにヒープについては規則波中および不規則波中のいずれについても、計算値の動揺両振幅が実験値のそれよりも小さい。計算値と実験値の減衰定数は表-6に示したようにほぼ等しいことから、計算と実験にみられる動揺特性の差異は固有周期の相違によるものと考えられる。自由振動実験により得られた固有周期より付加質量を求め、これを用いて動揺量を計算しているが、浮体の形状が半断面であり、静水圧による復元力係数が矩形浮体などとは異なり、線形でないことの効果により実験値と計算値に相違が生じているものと思われる。

次に、サージ、ヒープ、ロール、ピッチについて、規則波の波周期4sまたは7sにおける動揺周期が波周期よりも長くなっている。これらの周期の実験における入射波の時系列を観察すると長周期波成分が含まれており、これに定着して台形ケーンが動揺したためである。なお、他の波周期においては長周期波成分が含まれていない。なお、計算ではそれぞれの周期の正弦波形で計算しているため動揺量の時系列に長周期成分は現れていない。

b) 波向90°

各動揺成分について図-27-(1)~(3)に、動揺両振幅の有義値の、また、図-28-(1)~(3)に、動揺周期の計算値と実験値を、それぞれ比較して示している。図番号の(1)~(3)は動揺成分に対応しており、(1)はスウェイ、(2)はヒープ、(3)はロールに対応する。

スウェイの動揺両振幅が、波周期16sにおいて大きいのは波向45°の場合と同様に計算では実験に比べてスウェイの固有周期が短周期側になっているためである。ロールについて規則波中の波周期10s、不規則波中の有義波周期7sおよび10sにおいて動揺両振幅の計算値が実験値よりも大きい。計算においては自由振動実験で得られた減衰定数を用いているが、A1断面では0.01であって、A2、A3、A4断面では、ロールの減衰定数が、それぞれ、0.124、0.031、0.055であるのに比べて極めて小さい。実際にはもう少し大きな減衰が働いていたものと考えられる。

表-6 固有周期, 付加質量係数, 減衰定数の実験値および計算値

動揺成分	堤体断面	h/d	固有周期		付加質量係数		減衰定数	
			実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値
サージ	A 1	1.14	82.2	18.9	33.8	0.84	0.019	0.292
	A 2	1.67	-	77.5	-	0.36	-	0.642
	A 3	1.48	-	243.2	-	0.52	-	2.120
	A 4	1.08	-	13.8	-	0.61	-	0.151
スウェイ	A 1	1.14	-	9.2	-	1.13	-	0.163
	A 2	1.67	85.4	111.3	0.27	1.16	0.260	2.101
	A 3	1.48	-	416.4	-	1.54	-	6.870
	A 4	1.08	-	98.7	-	1.84	-	2.232
ヒープ	A 1	1.14	21.0	10.7	13.5	2.89	0.063	0.064
	A 2	1.67	8.5	8.7	1.40	1.56	0.112	0.121
	A 3	1.48	13.5	11.2	1.68	0.90	0.046	0.032
	A 4	1.08	15.8	16.2	1.52	1.42	0.057	0.016
ロール	A 1	1.14	48.8	14.6	17.9	0.69	0.010	0.000
	A 2	1.67	17.3	13.1	1.38	0.36	0.124	0.000
	A 3	1.48	16.4	18.6	-0.08	0.19	0.031	0.007
	A 4	1.08	10.4	10.5	1.01	1.06	0.055	0.128
ピッチ	A 1	1.14	19.6	13.6	4.33	1.58	0.023	0.010
	A 2	1.67	10.3	9.5	1.65	1.24	0.054	0.008
	A 3	1.48	15.5	15.2	0.94	0.86	0.077	0.003
	A 4	1.08	33.5	14.6	9.79	1.04	0.145	0.005
ヨウ	A 1	1.14	5.6	4.2	1.49	0.42	0.014	0.000
	A 2	1.67	82.3	190.4	-	0.70	0.300	0.279
	A 3	1.48	-	214.4	-	0.90	-	0.142
	A 4	1.08	79.1	20.4	25.6	0.78	0.181	0.012

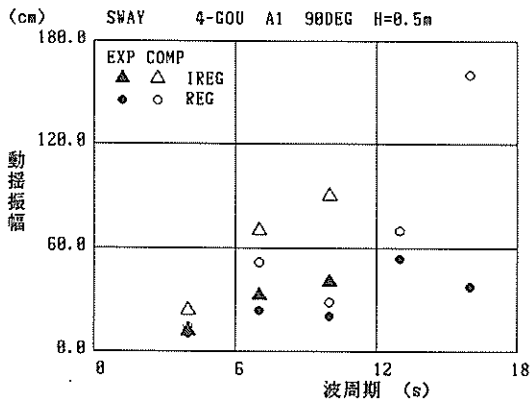


図-27-(1) 4号船溜 A 1断面の動揺振幅
(波向90°, 波高 $H=0.5\text{m}$, スウェイ)

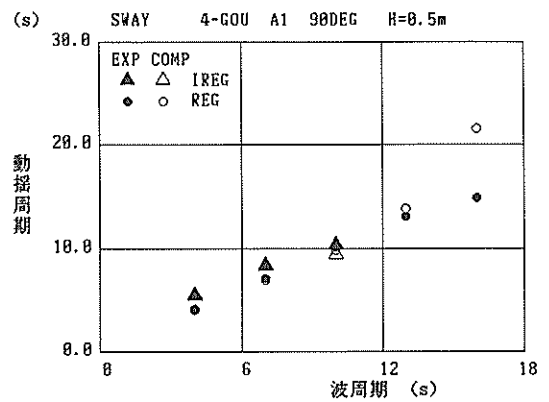


図-28-(1) 4号船溜 A 1断面の動揺周期
(波向90°, 波高 $H=0.5\text{m}$, スウェイ)

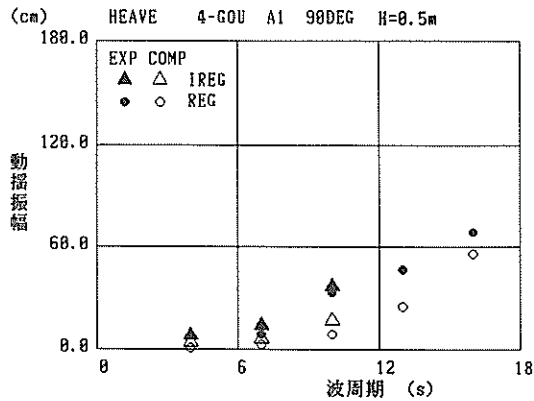


図-27-(2) 4号船溜 A 1断面の動揺振幅
(波向90°, 波高 $H=0.5\text{m}$, ヒープ)

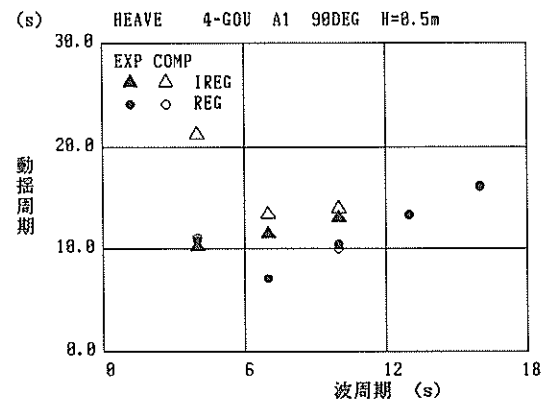


図-28-(2) 4号船溜 A 1断面の動揺周期
(波向90°, 波高 $H=0.5\text{m}$, ヒープ)

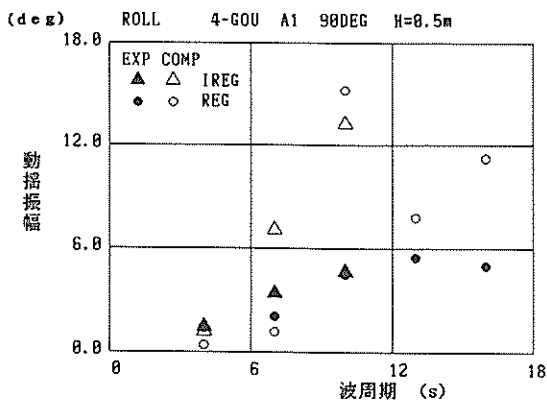


図-27-(3) 4号船溜 A 1断面の動揺振幅
(波向90°, 波高 $H=0.5\text{m}$, ロール)

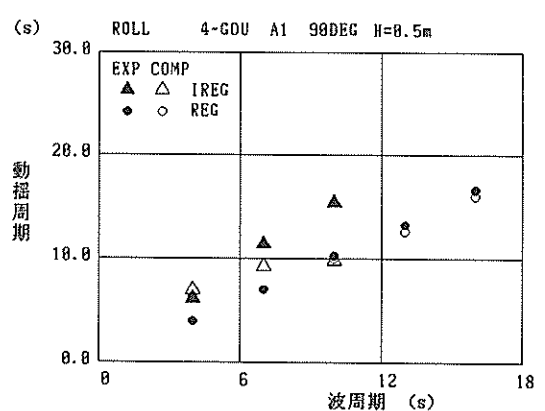


図-28-(3) 4号船溜 A 1断面の動揺周期
(波向90°, 波高 $H=0.5\text{m}$, ロール)

(2) 7号埠頭 A2断面

a) 波向 0°

各動揺成分について図-29-(1)~(3)に、動揺両振幅の

有義値の、また、図-30-(1)~(3)に、動揺周期の計算値と実験値を、それぞれ比較して示している。

7号埠頭 A2断面については、動揺両振幅の計算値

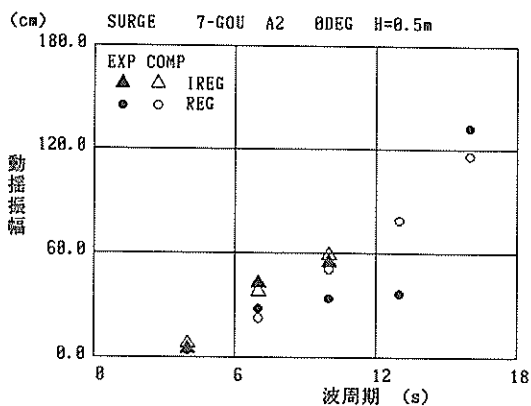


図-29-(1) 7号埠頭 A2断面の動揺振幅 (波向0°, 波高H=0.5m, サージ)

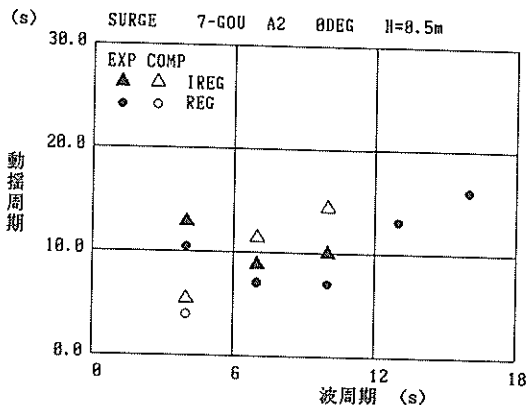


図-30-(1) 7号埠頭 A2断面の動揺周期 (波向0°, 波高H=0.5m, サージ)

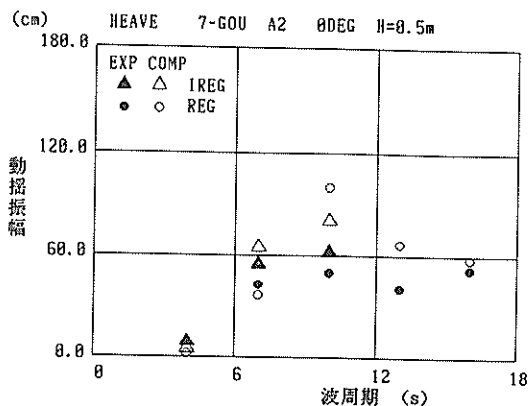


図-29-(2) 7号埠頭 A2断面の動揺振幅 (波向0°, 波高H=0.5m, ヒープ)

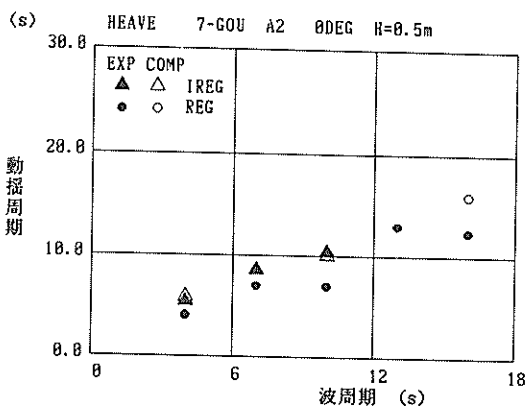


図-30-(2) 7号埠頭 A2断面の動揺周期 (波向0°, 波高H=0.5m, ヒープ)

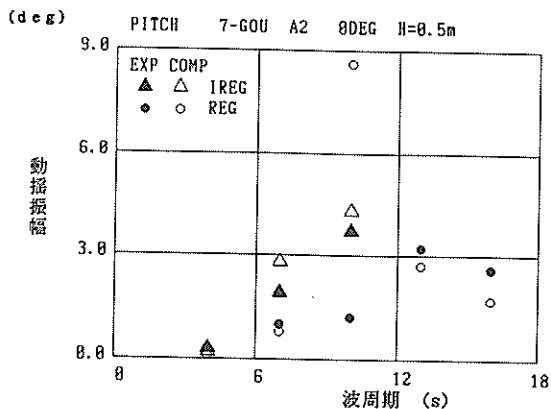


図-29-(3) 7号埠頭 A2断面の動揺振幅 (波向0°, 波高H=0.5m, ピッチ)

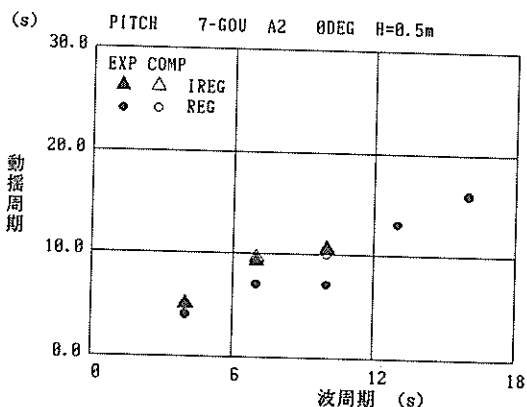


図-30-(3) 7号埠頭 A2断面の動揺振幅 (波向0°, 波高H=0.5m, ピッチ)

は実験値とおおむね一致している。特に、不規則波に対する動揺両振幅の計算値は実験値との対応が良い。

ただし、規則波中のヒープおよびピッチの計算値は波周期10sでピークを示し、しかも実験値に比べてかなり大きい。これは、計算におけるピッチの固有周期が10.3sであるため、ピッチが波周期10sにおいて共振現象を起こしている。このときの減衰定数は0.054である。ただし、この固有周期は自由振動実験から得られたものである。本来ならば実験においても波周期10sのときにピッチの共振現象がなければならない。この相違の原因は現段階では明らかでないが、ケーソンの形状が台形であるため静水圧の復元モーメント係数が非線形性を有すること等の要因が考えられる。

次に、ヒープについても波周期10sにおいて計算値にピークがみられるが、ヒープの固有周期は8.7sであることから、これはピッチと連成して生じたものと考えら

れる。

b) 波向 45°

各動揺成分について図-31-(1)~(5)に、動揺両振幅の有義値の、また、図-32-(1)~(5)に、動揺周期の計算値と実験値を、それぞれ比較して示している。動揺両振幅の計算値は実験値とおおむね一致している。とくに、不規則波については、よく一致している。

ただし、ヒープは規則波中の16sの実験値が計算値よりも大きくなっている。この断面においてはヒープの固有周期の計算値および実験値は8.7sおよび8.5sであり、計算値および実験値のいずれについても波周期10sにおいてピーク値をとり、計算値はその後減少しているのに対して、実験値では波周期16sにおいて再び大きくなっている。波周期16sにおいては、サージ、スウェイ、ロールの動揺が大きくなっており、実験値においてはこれらの成分に連成する形でヒープについても動揺が大きくなっ

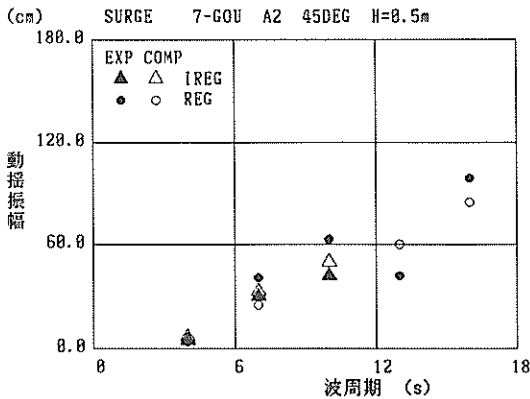


図-31-(1) 7号埠頭 A2断面の動揺振幅 (波向45°, 波高H=0.5m, サージ)

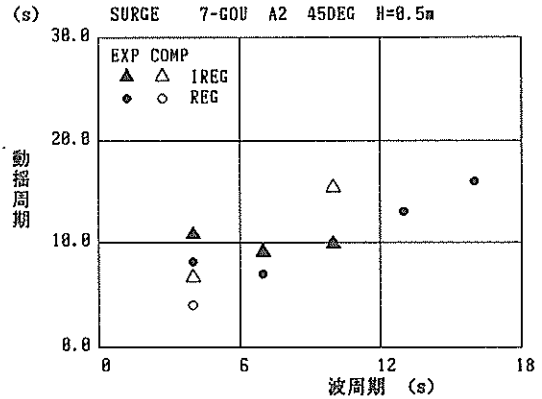


図-32-(1) 7号埠頭 A2断面の動揺周期 (波向45°, 波高H=0.5m, サージ)

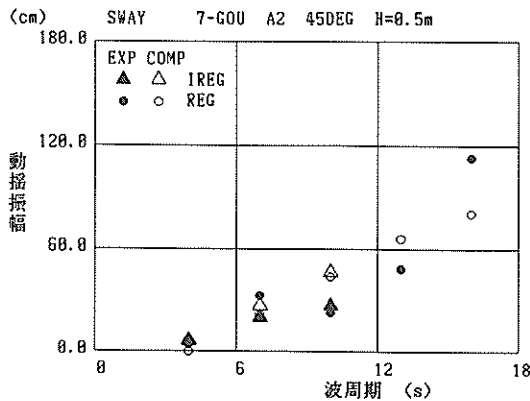


図-31-(2) 7号埠頭 A2断面の動揺振幅 (波向45°, 波高H=0.5m, スウェイ)

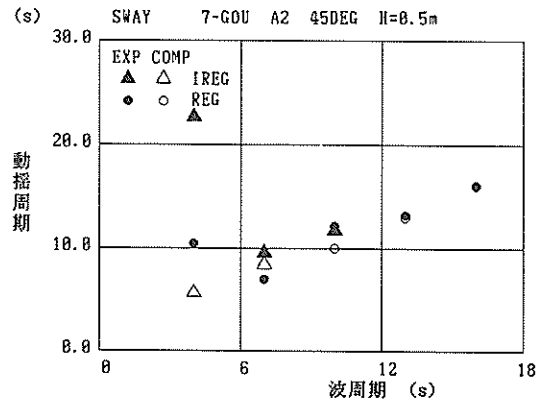


図-32-(2) 7号埠頭 A2断面の動揺周期 (波向45°, 波高H=0.5m, スウェイ)

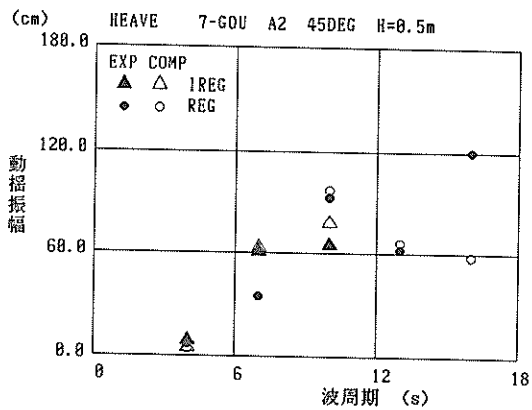


図-31-(3) 7号埠頭 A 2断面の動揺振幅
(波向45°, 波高H=0.5m, ヒープ)

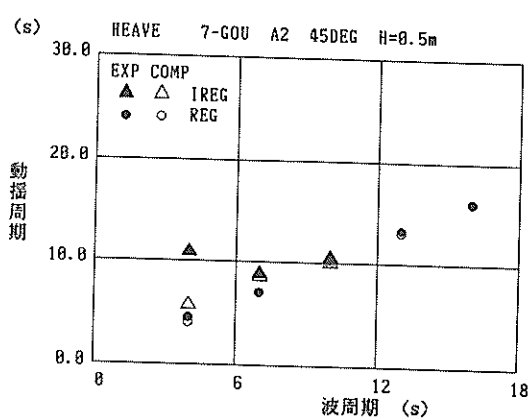


図-32-(3) 7号埠頭 A 2断面の動揺周期
(波向45°, 波高H=0.5m, ヒープ)

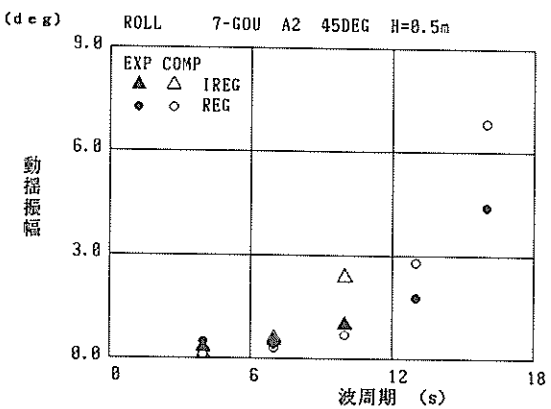


図-31-(4) 7号埠頭 A 2断面の動揺振幅
(波向45°, 波高H=0.5m, ロール)

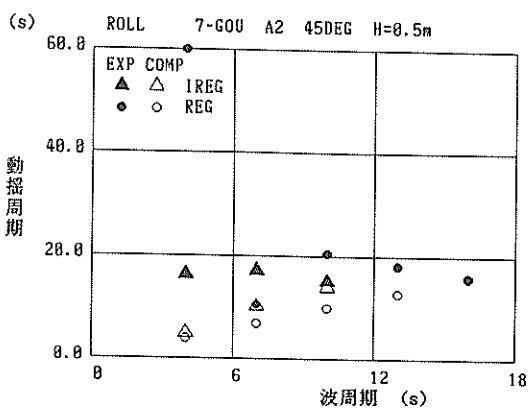


図-32-(4) 7号埠頭 A 2断面の動揺周期
(波向45°, 波高H=0.5m, ロール)

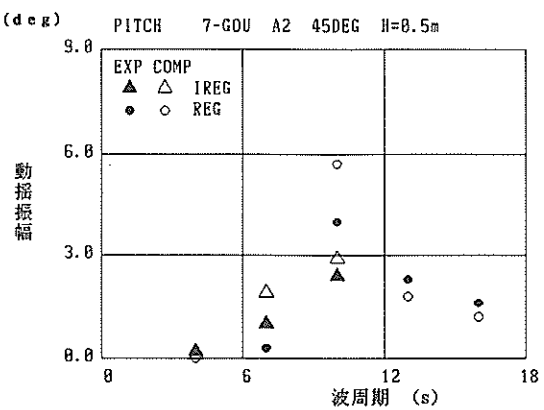


図-31-(5) 7号埠頭 A 2断面の動揺振幅
(波向45°, 波高H=0.5m, ピッチ)

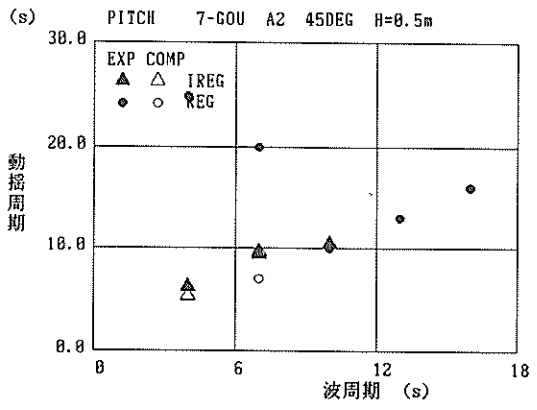


図-32-(5) 7号埠頭 A 2断面の動揺周期
(波向45°, 波高H=0.5m, ピッチ)

ているものと考えられる。

図-31-(4)はロールの動揺振幅を示すが、波周期16sにおいて計算値の動揺振幅は実験値よりも大きい。A2断面におけるロールの固有周期および減衰定数の実験値は17.3sおよび0.124であり、計算値においてもこの数値を用いているが、減衰定数の実験値を用いても計算においては実験値に比べて動揺振幅が大きくなっている。

図-32-(2),(4)および(5)に示すように、波周期4sにおけるスウェイ、波周期4s、7sにおけるロールおよびピッチの動揺周期の実験値が波周期よりも長くなっている。この原因としては、4号船溜A1断面において説明したように実験の入射波に含まれている長周期波成分の影響によるものと思われる。

(3) 仮置場 A3 断面

各動揺成分について図-33-(1)~(3)に、動揺両振幅の有義値の、また、図-34-(1)~(3)に、動揺周期の計算値

と実験値を、それぞれ比較して示している。

仮置場A3断面については動揺両振幅の計算値は実験値とおおむね一致している。ただし、図-33-(1)に示すスウェイの動揺両振幅において、規則波中の波周期13sおよび16sでは実験値の動揺両振幅が計算値のそれよりも大きくなっている。このケースにおいては自由振動実験の結果が得られていないので、計算で得られた減衰定数を用いているが、図-22-(2)に示すようにかなり大きく波高に対する動揺両振幅の応答倍率が2.0前後であるのに対して、波周期16sの実験値においては応答倍率が7.0と大きい。

なお、図-34-(1)に示すように、不規則波中の有義波周期4sおよび10sにおいてはスウェイの計算値においては長周期成分がみられる。これはスウェイのA3断面における固有周期の計算値が416sと極めて長く、長周期波成分が計算波形上に生じているためである。

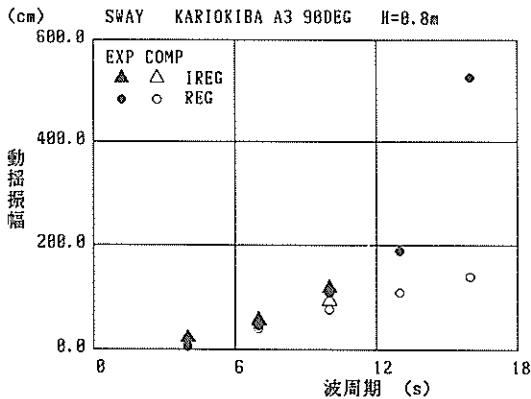


図-33-(1) 仮置場 A3 断面の動揺振幅
(波向90°, 波高H=0.8m, スウェイ)

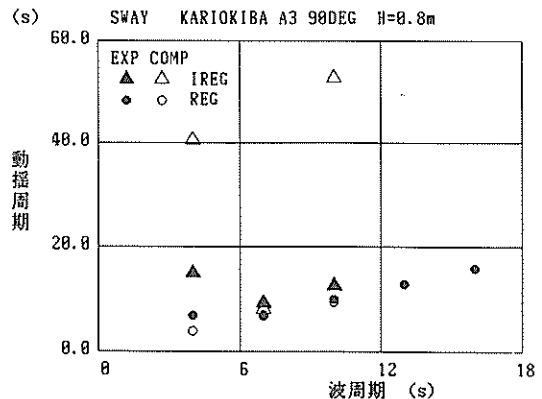


図-34-(1) 仮置場 A3 断面の動揺周期
(波向90°, 波高H=0.8m, スウェイ)

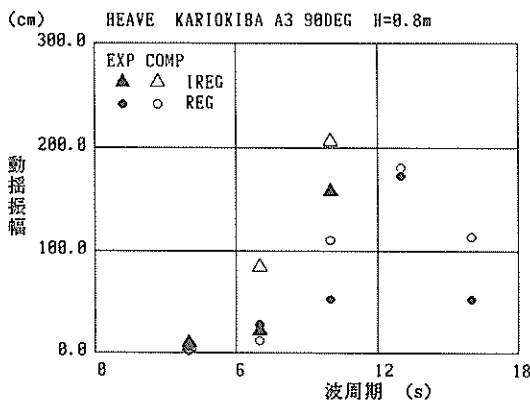


図-33-(2) 仮置場 A3 断面の動揺振幅
(波向90°, 波高H=0.8m, ヒープ)

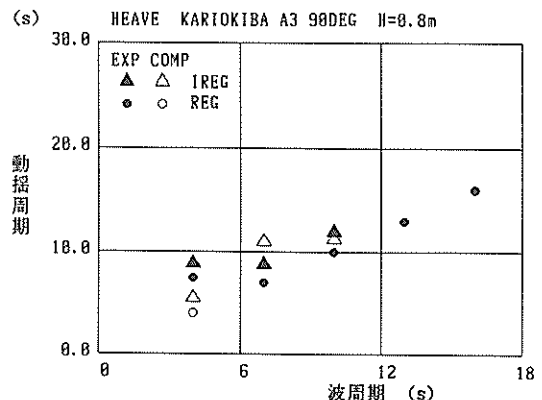


図-34-(2) 仮置場 A3 断面の動揺周期
(波向90°, 波高H=0.8m, ヒープ)

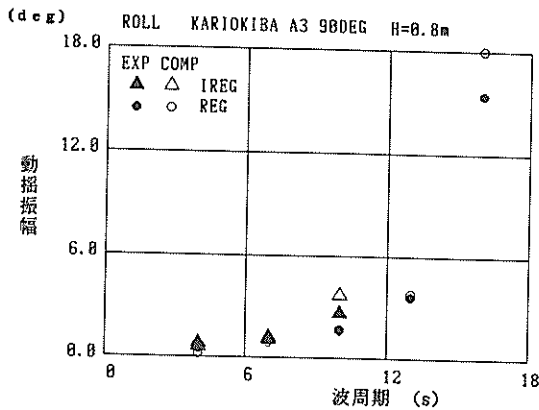


図-33-(3) 仮置場 A 3 断面の動揺振幅
(波向 90° , 波高 $H=0.8\text{m}$, ロール)

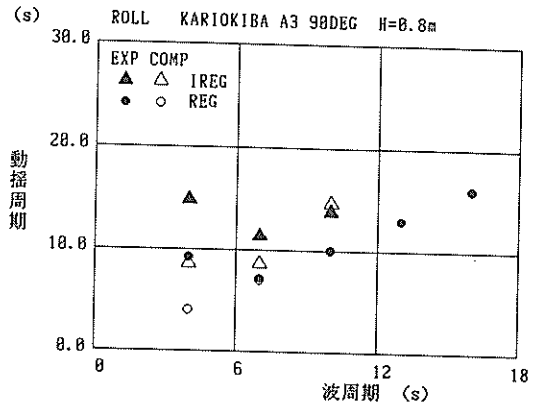


図-33-(3) 仮置場 A 3 断面の動揺周期
(波向 90° , 波高 $H=0.8\text{m}$, ロール)

(4) 据付場 A 4 断面

a) 波向 0°

各動揺成分について図-35-(1)~(3)に、動揺両振幅の有義値の、また、図-36-(1)~(3)に、動揺周期の計算値と実験値を、それぞれ比較して示している。

据付場 A 4 断面においては動揺両振幅の計算値と実験値とは A 2 断面、A 3 断面ほど合っていない。特に規則波中における差異が大きい。A 4 断面では水深喫水比が $h/d=1.08$ であり、A 2 断面の $h/d=1.67$ 、A 3 断面の $h/d=1.48$ に比べるとアンダーキールクリアランスが小さいために計算上の誤差が大きい。

図-35-(1)はサージの、図-35-(2)はヒープの動揺両振幅を示したものである。いずれの成分についても規則波の波周期16sにおける計算値が実験値に比べて大きくなっている。

まず、ヒープについて考察する。自由振動実験の結果得られたヒープの固有周期は15.8sであるが計算では16.3sである。また、このときの減衰定数は $h'=0.021$ である。自由振動実験の結果は、 $h'=0.057$ であるのでこれを用いて行った計算結果を図中に□で示す。ヒープの動揺両振幅の計算値は388cmとなるが、依然として実験値の197cmより大きい。不規則波の10sに対しても、計算値は実験値の約2.5倍である。これは自由振動実験による減衰定数が0.057であるのに対して周期10sにおける減衰定数の計算値が0.016であるためと考えられる。

次に、サージについて考察する。周期16sにおける付加質量係数の計算値0.66を用いて計算したサージの固有周期は13.8sである。自由振動実験ではサージの波形について有効な結果が得られていないので、実験における固有周期については不明である。しかしながら、不規則

波中の動揺周期の実験値によればサージについて長周期動揺が生じていないので、実験における固有周期は長くないと思われる。固有周期付近では、減衰定数が計算値に及ぼす影響が大きい。そこで、ここでも、動揺量が極めて大きくなっている波周期16sについて、減衰定数を周期16sにおける計算値の3倍に相当する $h'=0.10$ として動揺シミュレーションを行ない実験値と対比する。修正した計算値を図中に□で示しているが、計算値の動揺両振幅は80cmとなり、実験値に近づく傾向がみられる。

次に、実験値と計算値の動揺周期について考察する。

図-36-(1)に示すようにサージの波周期16sにおいては動揺周期が波周期の約2倍の34.8sである。サージの固有周期は13.6sであるが、ピッチの固有周期が33.5sであることから、ピッチに連成する形でサージについても動揺周期が長くなっていると考えられる。

図-36-(2)に示すようにヒープの波周期4s、7sにおける動揺周期は波周期よりも長くなっている。これは先にも示した様に実験の入射波に長周期波成分が含まれているためである。

b) 波向 45°

各動揺成分について図-37-(1)~(5)に、動揺両振幅の有義値の、また、図-38-(1)~(5)に、動揺周期の計算値と実験値を、それぞれ比較して示している。波向 45° についても規則波に対するサージおよびヒープの実験値と計算値の対応はあまり良くない。しかしながら、不規則波に対しては有義波周期10sにおけるヒープを除いては動揺両振幅の実験値と計算値はおおむね一致する。

図-37-(1)はサージの動揺両振幅を示したものであるが、実験値については波周期16sで動揺両振幅が大きい。

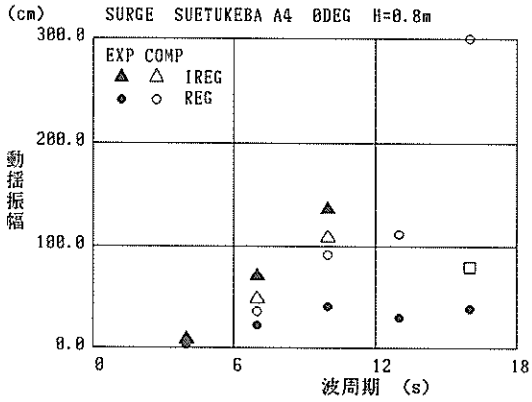


図-35-(1) 据付場 A 4 断面の動揺振幅
(波向 0° , 波高 $H=0.8\text{m}$, サージ)

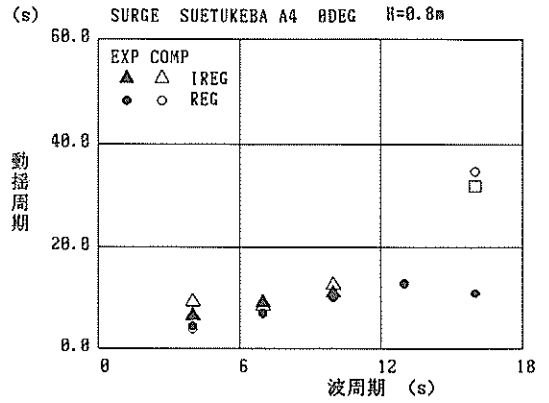


図-36-(1) 据付場 A 4 断面の動揺周期
(波向 0° , 波高 $H=0.8\text{m}$, サージ)

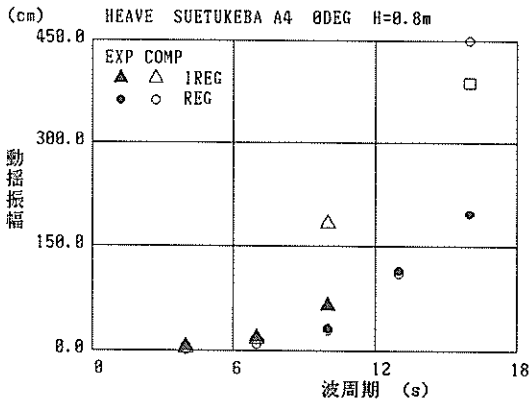


図-35-(2) 据付場 A 4 断面の動揺振幅
(波向 0° , 波高 $H=0.8\text{m}$, ヒープ)

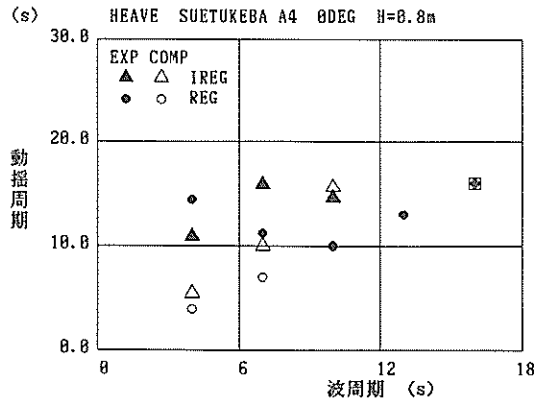


図-36-(2) 据付場 A 4 断面の動揺周期
(波向 0° , 波高 $H=0.8\text{m}$, ヒープ)

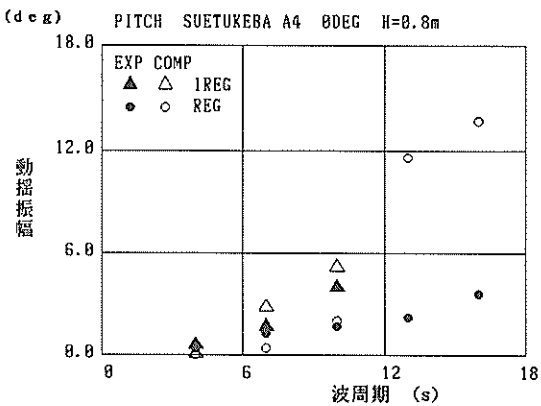


図-35-(3) 据付場 A 4 断面の動揺振幅
(波向 0° , 波高 $H=0.8\text{m}$, ピッチ)

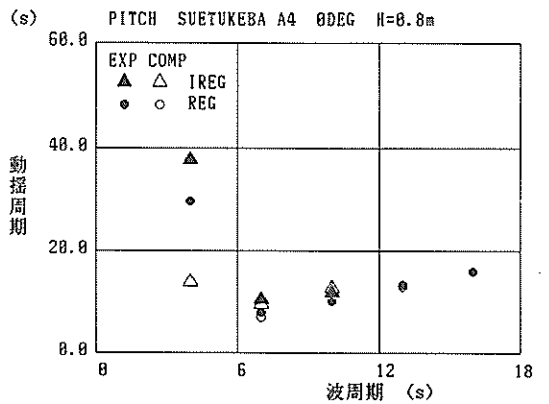


図-36-(3) 据付場 A 4 断面の動揺周期
(波向 0° , 波高 $H=0.8\text{m}$, ピッチ)

波向0°の場合と同様に減衰定数を計算値の3倍 ($h' = 0.10$) に修正した動揺両振幅の計算値は修正前よりも小さくなり、実験値とほぼ一致する。また、図-37-(3)はヒープの動揺両振幅を示したものであるが、波周期16s

において計算値は極めて大きくなっているが、これは固有周期16.2sに極めて近いためである。自由振動実験による減衰定数 $h' = 0.057$ を用いた計算値は367cmとなるが、依然として実験値の137cmよりも大きい。

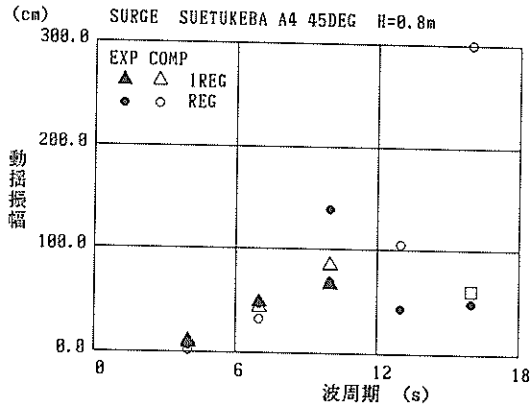


図-37-(1) 据付場 A 4 断面の動揺振幅 (波向45°, 波高H=0.8m, サージ)

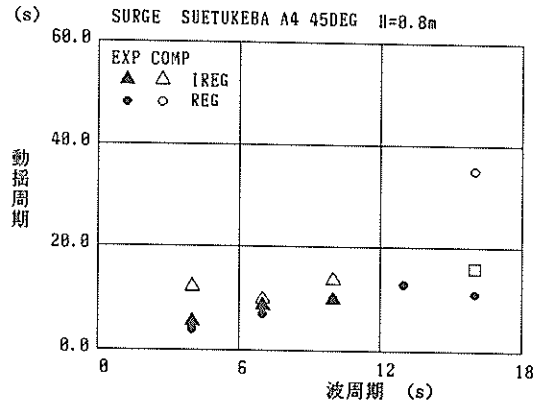


図-38-(1) 据付場 A 4 断面の動揺周期 (波向45°, 波高H=0.8m, サージ)

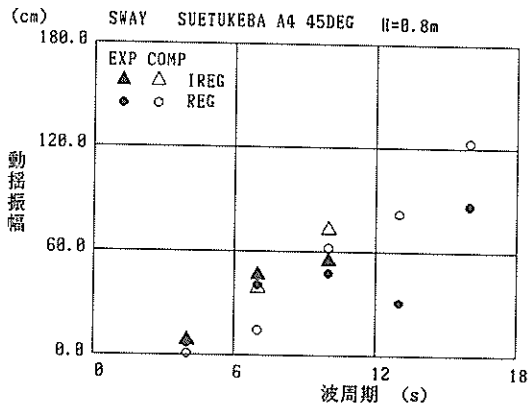


図-37-(2) 据付場 A 4 断面の動揺振幅 (波向45°, 波高H=0.8m, スウェイ)

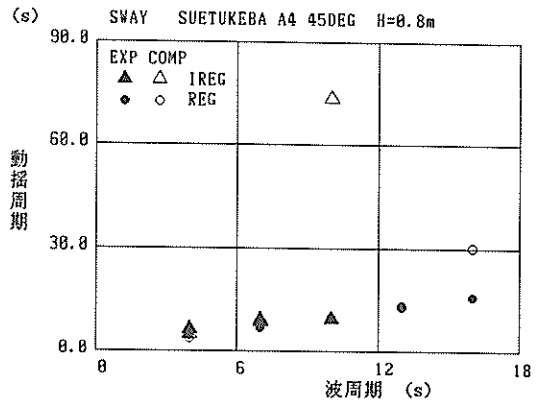


図-38-(2) 据付場 A 4 断面の動揺周期 (波向45°, 波高H=0.8m, スウェイ)

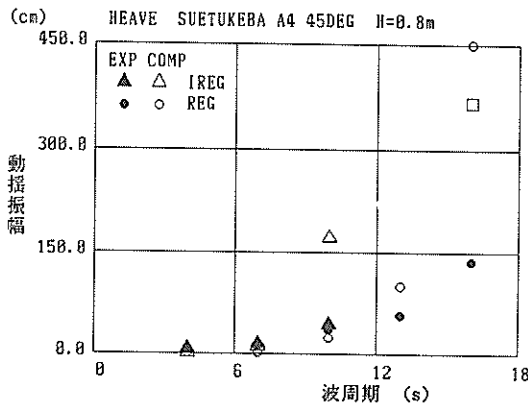


図-37-(3) 据付場 A 4 断面の動揺振幅 (波向45°, 波高H=0.8m, ヒープ)

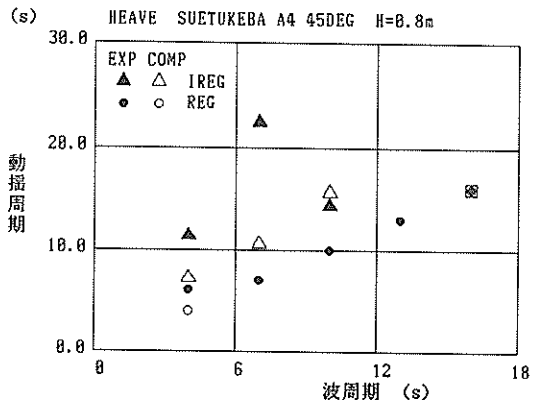


図-38-(3) 据付場 A 4 断面の動揺周期 (波向45°, 波高H=0.8m, ヒープ)

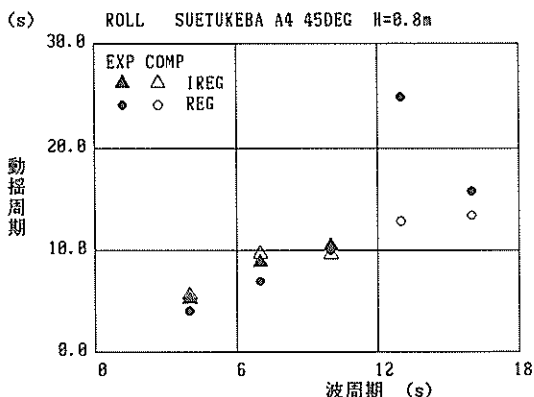


図-37-(4) 据付場 A 4 断面の動揺振幅
(波向45°, 波高H=0.8m, ロール)

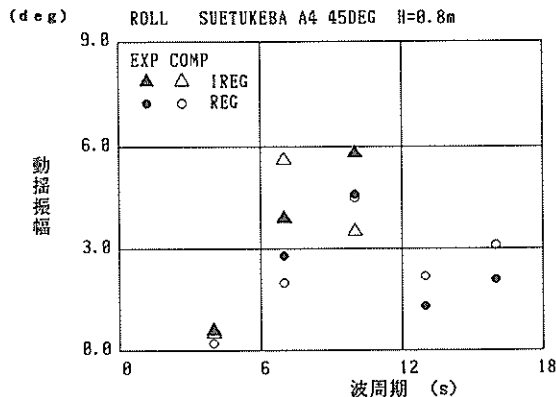


図-38-(4) 据付場 A 4 断面の動揺周期
(波向45°, 波高H=0.8m, ロール)

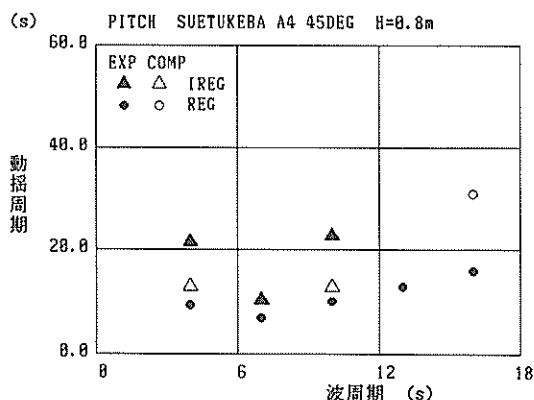


図-37-(5) 据付場 A 4 断面の動揺振幅
(波向45°, 波高H=0.8m, ピッチ)

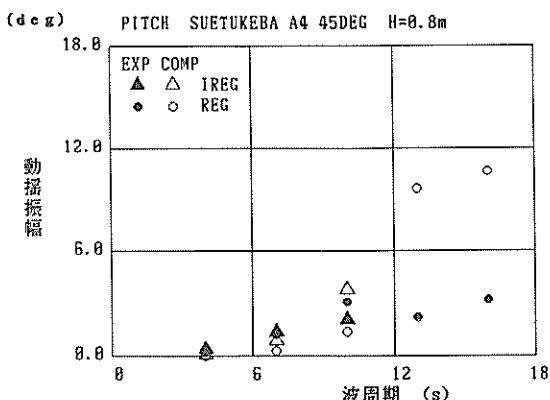


図-38-(5) 据付場 A 4 断面の動揺周期
(波向45°, 波高H=0.8m, ピッチ)

図-37-(5)はピッチの動揺両振幅を示したものであるが、波周期13s、16sにおいて計算値と実験値との相違が大きい。ここで現れている差異はヒープ等の他の成分の影響によるものと考えられる。

次に動揺周期について計算値と実験値の相違点を考察する。規則波の波周期16sのケースにおいてはサージ、スウェイ、ピッチについて動揺周期が30~35sとなっており、これはピッチの固有周期33.5sとほぼ一致する。この波周期においては、ピッチの動揺両振幅が大きく、これに連成する形で計算値においてはサージ、スウェイの動揺大きくなり、動揺周期も長くなっているものと考えられる。

3. 3 模型実験結果に基づく作業限界についての検討

(1) 作業限界動揺量

表-7は、運輸省第二港湾建設局より提示された、接合時および据付時の作業限界動揺量を示したものである。作業限界動揺量は、台形ケーソンの各断面の動揺量の有義両振幅の値である。作業限界動揺量はサージ、スウェイ、ヒープについては0.4mである。ただし、A4断面について、サージ、スウェイは0.7m、ヒープは0.5mである。ロールはA1~A4の各断面について、それぞれ、2.4°, 1.8°, 2.8°, 3.2°である。また、ピッチはそれぞれ、3.1°, 3.1°, 3.1°, 3.9°である。なお、ロール、ピッチの作業限界動揺量については、ケーソンの両端部の上下方向の動揺両振幅をそれぞれ0.4m (A1断面, A2断面, A3断面) および、0.5m (A4断面) とし、設定したものである。

(2) 作業限界に対する考察

シミュレーション結果ならびに模型実験結果に基づいて求めた作業限界波高を以下に示す。

表-7 台形ケーソンの作業限界動揺量（動揺両振幅の有義値）

工事場所	堤体断面	作業限界動揺量				
		鉛直変位	水平変位	回転変位 (m)		
		ヒープ (m)	サージ、スウェイ (m)	端部鉛直変位	ロール (°)	ピッチ (°)
4号船溜	A1断面	0.4	0.4	0.4	2.4	3.1
7号埠頭	A2断面	0.4	0.4	0.4	1.8	3.1
仮置場	A3断面	0.4	0.4	0.4	2.8	3.1
据付場	A4断面	0.5	0.7	0.7	3.2	3.9

表-8-(1) 作業限界波高 (A1断面)

波向 (°)	条件	有義波周期 (s)	サージ	スウェイ	ヒープ	ロール	ピッチ
45	計算値	4.0	0.95	1.05	10.00	1.72	<u>0.52</u>
		7.0	0.41	0.35	4.00	<u>0.25</u>	0.67
		10.0	0.20	0.34	1.11	<u>0.17</u>	0.19
	実験値	4.0	1.43	1.67	2.22	<u>1.41</u>	2.00
		7.0	<u>0.32</u>	0.57	0.71	0.47	0.50
		10.0	<u>0.27</u>	0.56	0.38	0.43	0.29
90	計算値	4.0	0.91	0.83	5.00	1.29	<u>0.40</u>
		7.0	0.34	0.29	3.33	<u>0.22</u>	0.52
		10.0	0.30	0.22	1.18	<u>0.12</u>	0.44
	実験値	4.0	<u>0.83</u>	1.67	2.50	1.03	0.92
		7.0	0.63	0.61	1.43	<u>0.46</u>	0.71
		10.0	0.38	0.49	0.54	<u>0.33</u>	0.34

(単位: m)

a) 4号船溜 A1断面

表-8-(1)は、不規則波中の計算値および実験値に基づいて、A1断面の作業限界波高を求めたものである。作業限界波高は動揺成分ごとに求めているが、波周期ごとに最小の波高になっている箇所を枠で囲って示した。

波向45°における計算値によれば、作業限界波高は有義波周期4s, 7s, 10sに対して、それぞれ、0.52m, 0.25m, 0.17mである。長周期波になるにしたがい、作業限界波高が低下していることがわかる。また、同一

条件での実験値によれば、作業限界波高は有義波周期4s, 7s, 10sに対して、それぞれ、1.41m, 0.32m, 0.27mである。

次に、波向90°に対する計算値に基づいて作業限界波高を求めると、有義波周期4s, 7s, 10sに対して、それぞれ、0.40m, 0.22m, 0.12mである。また、同一条件での実験値によれば、作業限界波高は有義波周期4s, 7s, 10sに対して、それぞれ、0.83m, 0.46m, 0.33mである。

4号船溜A1断面においては、アンダーキールクリアランスが小さいため実験値と計算値にやや相違があることから、実験値を中心に作業限界波高を設定すると、波周期10sにおいて0.25m、波周期7sにおいて0.3mであると思われる。

b) 7号埠頭 A2断面

表-8-(2)は、不規則波中の計算値および実験値に基づいて、A2断面の作業限界波高を求めたものである。波向45°における計算値によれば、作業限界波高は有義波周期4s, 7s, 10sに対して、それぞれ、2.50m, 0.31m, 0.21mである。長周期波になるにしたがい、作業限界波高が低下していることがわかる。また、同一条件での実験値によれば、作業限界波高は有義波周期4s, 7s, 10sに対して、それぞれ、2.22m, 0.36m, 0.24mである。

次に、波向45°に対する計算値に基づいて作業限界波高を求めると、有義波周期4s, 7s, 10sに対して、それぞれ、2.86m, 0.32m, 0.26mである。また、同一条件での実験値によれば、作業限界波高は有義波周期4s, 7s, 10sに対して、それぞれ、2.22m, 0.33m, 0.31mである。

以上をとりまとめると、7号埠頭A2断面においては作業限界波高はおおむね波周期10sにおいて0.2m、波周期7sにおいて0.3mであると思われる。

c) 仮置場 A3 断面

表-8-(3)は、不規則波中の計算値および実験値に基づいて、A3断面の作業限界波高を求めたものである。波向90°における計算値によれば、作業限界波高は有義波周期4s, 7s, 10sに対して、それぞれ、1.39m, 0.38m, 0.16mである。長周期波になるにしたがい、作業限界波高が低下していることがわかる。また、同一条件での実験値によれば、作業限界波高は有義波周期4s, 7s, 10sに対して、それぞれ、1.39m, 0.57m, 0.20mである。A3断面の波向90°の不規則波中においてはスウェイまたはヒープの動揺量によって作業限界波高が定まっている。以上をとりまとめると、仮置場 A3 断面においては作業限界波高はおおむね波周期10sにおいて0.2m、波周期7sにおいて0.4mであると思われる。

d) 据付場 A4 断面

表-8-(4)は、不規則波中の計算値および実験値に基づいて、A4断面の作業限界波高を求めたものである。波向0°における計算値によれば、作業限界波高は有義波周期4s, 7s, 10sに対して、それぞれ、6.22m, 0.91m, 0.22mである。

長周期波になるにしたがい、作業限界波高が低下していることがわかる。また、同一条件での実験値によれば、作業限界波高は有義波周期4s, 7s, 10sに対して、それぞれ、4.27m, 0.79m, 0.41mである。

次に、波向45°に対する計算値に基づいて作業限界波高を求めると、有義波周期4s, 7s, 10sに対して、それぞれ、5.09m, 0.56m, 0.23mである。また、同一条件での実験値によれば、作業限界波高は有義波周期4s, 7s, 10sに対して、それぞれ、5.20m, 0.80m, 0.54mである。

据付場 A4 断面においてはアンダーキールクリアランスが小さいため実験値と計算値にやや相違があることから、実験値を中心に作業限界波高を設定すると、作業限界波高はおおむね波周期10sにおいて0.4m、波周期

表-8-(2) 作業限界波高 (A2 断面)

波向 (°)	条件	有義波周期 (s)	サージ	スウェイ	ヒープ	ロール	ピッチ
0	計算値	4.0	2.50	-	4.00	-	4.50
		7.0	0.53	-	0.31	-	0.32
		10.0	0.34	-	0.25	-	0.21
	実験値	4.0	4.00	5.00	2.22	15.50	3.00
		7.0	0.47	1.67	0.36	3.88	0.47
		10.0	0.36	1.82	0.32	3.88	0.24
45	計算値	4.0	2.86	2.86	4.00	15.00	9.00
		7.0	0.61	0.74	0.32	2.58	0.47
		10.0	0.40	0.43	0.26	0.65	0.31
	実験値	4.0	4.00	3.33	2.22	5.17	4.50
		7.0	0.67	1.00	0.33	3.10	0.90
		10.0	0.48	0.74	0.31	1.55	0.38

(単位: m)

表-8-(3) 作業限界波高 (A3 断面)

波向 (°)		有義波周期 (s)	サージ	スウェイ	ヒープ	ロール	ピッチ
90	計算値	4.0	-	1.39	5.33	4.13	-
		7.0	-	0.56	0.38	2.25	-
		10.0	-	0.34	0.16	0.67	5.60
	実験値	4.0	6.40	1.39	3.20	3.10	7.47
		7.0	2.00	0.57	1.45	2.07	5.60
		10.0	0.89	0.27	0.20	0.95	2.80

(単位: m)

7sにおいて0.8mであると思われる。

4. 現地観測結果および計算結果との比較

4.1 現地観測および据付の概要

動揺量の現地観測は運輸省第二港湾建設局が平成4年1月21日の台形ケーソンの据付時に実施した。

現地観測においては、図-39に示すように台形ケーソンの曳航時および据付時についてケーソンの位置および動揺を各種センサーを用いて測定している。

曳航および据付中のケーソンは、方位および位置が変化し、かつ波浪中で動揺するため、以下のシステムを用いて観測した。まず、位置を求めるために、自動追尾式光波位置計を用いて、ケーソンの喫水および動揺量(ヒープ)が計測されている。また、ケーソンの動揺量(ロー

表-8-(4) 作業限界波高 (A4断面)

波向 (°)	条件	有義波周期 (s)	サージ	スウェイ	ヒープ	ロール	ピッチ
0	計算値	4.0	6.22	-	13.33	-	25.60
		7.0	1.17	-	2.50	10.40	0.91
		10.0	0.51	11.20	0.22	4.46	0.49
	実験値	4.0	7.00	9.33	6.67	10.40	4.27
		7.0	0.79	2.07	2.00	1.95	1.51
		10.0	0.41	2.33	0.62	1.25	0.64
45	計算値	4.0	5.09	7.00	40.00	6.24	25.60
		7.0	1.30	1.44	3.64	0.56	2.84
		10.0	0.66	0.77	0.23	0.89	0.67
	実験値	4.0	6.22	6.22	5.71	5.20	6.40
		7.0	1.17	1.19	2.67	0.80	1.83
		10.0	0.85	1.02	0.91	0.54	1.22

(単位: m)

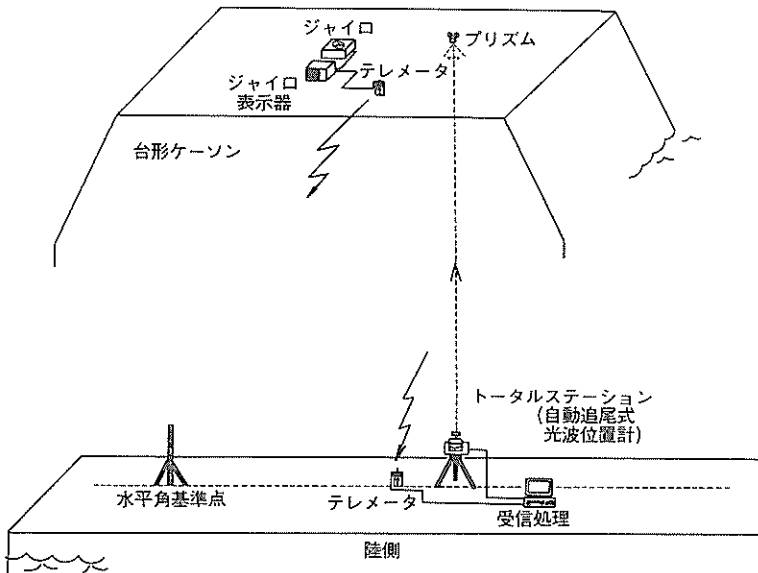


図-39 現地での計測器の配置図

およびピッチ)は、ケーソン上に設置した小型ジャイロコンパスを用いて測定した。ジャイロコンパスで計測された動揺量はテレメータを用いて既設の沖防波堤に送信し、受信後パーソナルコンピュータを用いて解析処理している。

図-40はケーソン据付時におけるアンカーワイヤーの設置状況を示している。据付用にはφ38またはφ28のワ

イヤロープを用いる。これらのワイヤーの先端にはφ34のスタッドチェーンがつけられ、さらにその先端には4つ片爪アンカーが用いられている。

ケーソンの据付は、図-41に示すように捨石マウンド上までケーソンを曳航し、既設ケーソンより20~30m離れた場所で一次注水を行なうが、一次注水の完了まではケーソンが所定の位置に留まるように既設ケーソンよりロープをとり、曳航および押船でケーソンを保持する。

一次注水完了後、図-42に示すように曳航および押船で既設ケーソン側へ徐々に近づける。その後、据付用ワイヤーロープの1番(真ん中ワイヤー)を連結し、軽く張った状態で、ケーソンを維持し、順次2番(外港三崎側)、3番(外港照島側)、4番(内港三崎側)、5番(内港照島側)と据付用ワイヤーロープをセッティングし、据付を開始する。

各据付用ワイヤーロープのセッティングが終了し、ワイヤーロープの異常の有無を確認後、図-43に示すようにウインチ台船のウインチで徐々にワイヤーロープを緊張していく。

各ウインチによってワイヤーロープを均等に緊張した時点で二次注水を行ない、据付の微調整ができる位置までケーソンを沈め、法線を確認しながら、最終注水を行ない据付を完了させる。

ケーソン据付時には、各据付ワイヤーのセッティングおよび緊張時にケーソンを破損させないようにゴム製の緩衝材を当てて行ない、ケーソンを着底した時点で隣接するケーソンとの間隔が20cmになるように、堅木に入れ替えて、据付目地の調整を行なう。

据付の誘導点は既設函上に設置し、トランシットで据付ケーソンの先端部を視準し誘導する。なお、法線の出入りは、±20cm以内として据付ける。

4. 2 ケーソンの動揺の状況および計算値との比較

ここでは据付時におけるケーソンの動揺量について現地観測結果と計算値とを比較する。検討ケースおよびピッチ、ロール、ヒープの動揺両振幅の観測値を表-9に示す。それらは、据付時の喫水の推移によって検討ケースを分けている。ただし、ケース①～③は一次注水中のデータであり、ケース④は二次注水中のデータである。

図-44-(1)～(3)は横軸にケーソンのアンダーキールクリアランス(ケーソンの底面からマウンドまでの距離)を、縦軸にヒープ、ロール、ピッチの各動揺両振幅の有義値をとり、両者の関係を示したものである。なお、この据付作業時の有義波高は $H_{1/3}=0.8\text{m}$ で変化がみられない。ヒープの動揺両振幅の推移をみると据付場に到着して一次注水を開始したケース①については動揺両振幅の有義値は2.05mで有義波高0.8mの約2.5倍の動揺量を示しているが、注水が進行し、アンダーキールクリアランスが小さくなるにしたがって動揺両振幅の有義値は1.98m, 1.30m, 0.52m, 0.35m, 0.21mと徐々に小さくなっている。これに対して、ピッチの動揺両振幅の有義値は据付場に到着時には 6.00° であったのが、一次注水を開始後にいったんケース②およびケース③において 7.07° , 11.7° と動揺両振幅が大きくなるが、その後 1.46° , 0.99° , 0.86° と再び減少がみられる。なお、ケース①～③の区間は、一次注水中であり、各10分ごとの喫水変化は、それぞれ0.3m(ケース①), 1.1m(ケース②), 1.7mおよび1.2m(ケース③)とかなり大きい。

これに対して、ロールの動揺両振幅の有義値は据付開始直後には 1.93° であったのが 1.37° , 1.92° ,

1.56° と増減した後、動揺が小さくなり 1.22° , 1.25° となる。しかし、ロールの動揺両振幅についてはヒープおよびピッチにおいてみられたような急激な変化は見られない。これは、据付日時の目視による波向がケーソン法線方向からおおむね $20^\circ\sim 30^\circ$ であり、ロールに比べてピッチが卓越する波向であったためと考えられる。

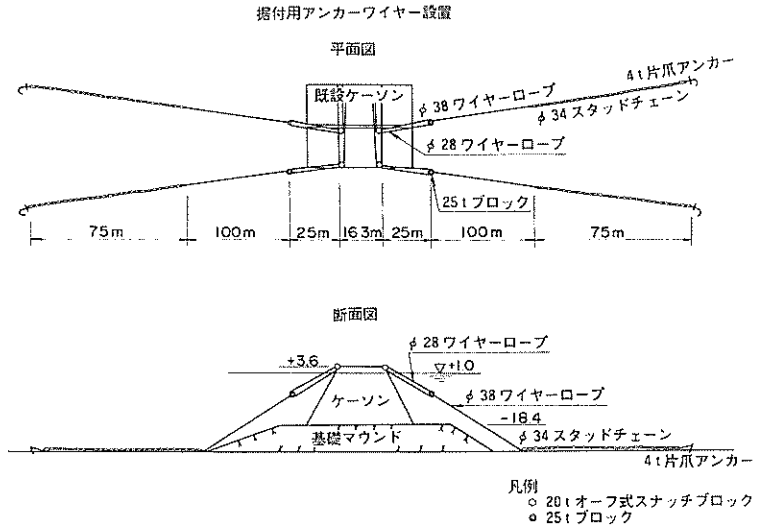


図-40 据付け用アンカーワイヤー設置図

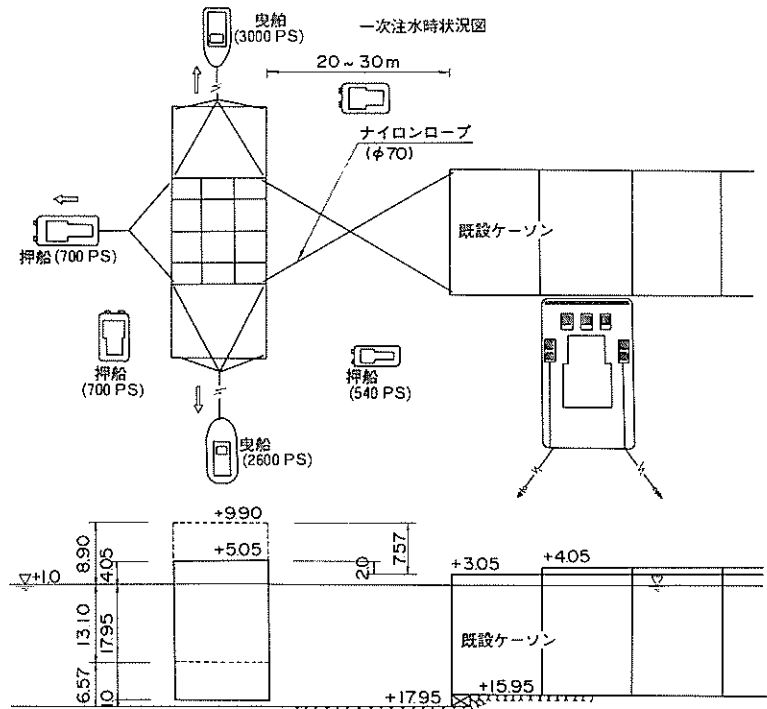


図-41 ケーソン一次注水時状況図

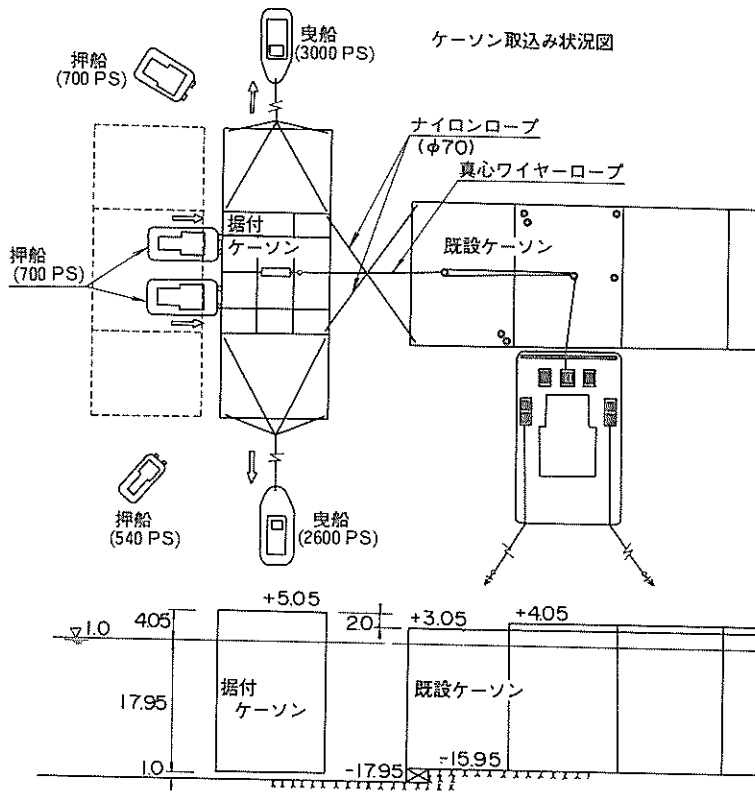


図-42 ケーソン引寄せ状況図

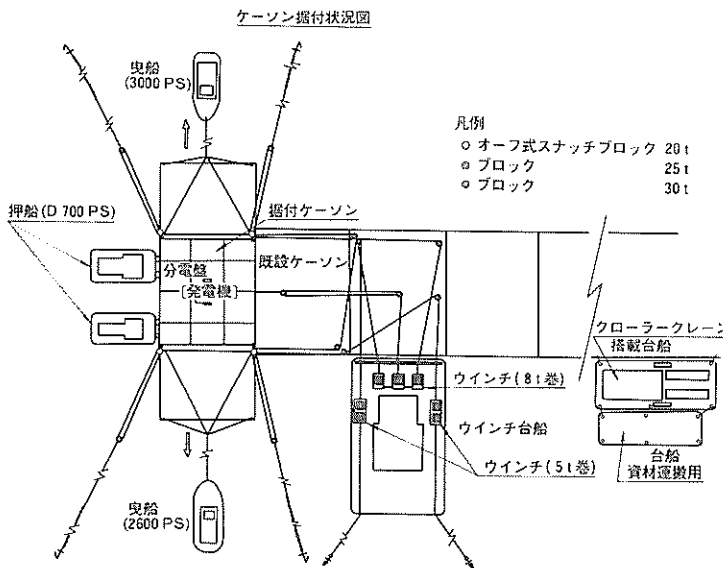


図-43 ケーソン据付状況図

以上に示した据付時の状況に対して動揺シミュレーションを行ない計算値と観測値との比較を行ない、前出の図-44-(1)~(3)に示した。ただし、各ケースごとに台形ケー

ソンの喫水が異なるので波力およびラディエーション流体力はそれぞれ特異点分布法を用いて計算した。また、各喫水条件ごとにケーソンの慣性モーメントを計算し、これを動揺シミュレーションにおいて用いた。ただし、計算における減衰定数については模型実験結果を参考にした。据付ケーソンの水深喫水比 h/d はケース①~⑥についてそれぞれ、1.37, 1.27, 1.12, 1.06, 1.04であるが、A4断面 ($h/d=1.08$) の模型実験の結果を参考にして、ヒープ、ロール、ピッチの減衰定数をそれぞれ0.057, 0.055, 0.145とした。ヒープについては計算値は観測値と非常によく一致している。しかし、アンダーキールクリアランスが最も小さいケース⑥ ($h/d=1.04$) における計算値は実測値の約2倍であるので、実際にはさらに減衰定数が大きくなっているものと考えられる。ロールについてはケース①、ケース②でやや差異があるがケース③~ケース⑥では計算値は観測値とよく一致している。

次にピッチについては、据付直前のケース④~⑥については計算値と実験値の対応が良いが、ケース①~③の計算値は観測値と相違する。ここでは、A4断面の模型実験結果を参考に減衰定数を0.145として計算したが、A3断面 ($h/d=1.48$) およびA2断面 ($h/d=1.67$) については減衰定数の実験値が0.077および0.054であるのでケース①~③の減衰は0.145よりも小さいと考えられる。したがって、ケース①~③については $h'=0.145$ では減衰定数をやや過大に評価したものと考えられるので $h'=0.054$ として計算した結果を図中に○で示すが、ケース①、②については計算値は観測値に近づくが、ケース③については依然として差が大きい。

表-9 現地観測による台形ケーソンの動揺両振幅

ケース番号	時刻	水深 (m)	噴水 (m)	水深 噴水比	ヒープ(m)		ピッチ(°)		ロール(°)	
					A _{max}	A _{1/3}	A _{max}	A _{1/3}	A _{max}	A _{1/3}
①	9:20	19.1	13.9	1.37	3.04	2.05	9.23	6.00	3.21	1.93
②	9:30	19.1	14.2	1.27	2.56	1.98	9.17	7.07	2.54	1.37
③	9:50	19.1	17.0	1.12	2.00	1.30	15.82	11.71	2.86	1.92
④	10:00	19.1	18.2	1.06	1.30	0.52	2.70	1.46	2.22	1.56
⑤	10:10	19.1	18.2	1.06	0.98	0.35	1.35	0.99	1.70	1.22
⑥	10:50	19.1	18.4	1.04	0.28	0.21	1.18	0.86	2.26	1.25

アンダーキールクリアランスが小さくなるにしたがってピッチの付加慣性モーメントが大きくなるので固有周期の計算値はケース①では15.3sであるが、ケース⑥では29.5sとなる。現地観測のケース⑥における固有周期の計算値は、模型実験のA4断面の自由振動実験で得られている固有周期33.5sとほぼ一致するので、計算に用いた付加慣性モーメント係数はおおむね適切であったと考えられる。また、観測波形を観察するとピッチの動揺周期は有義波周期11.0sよりも若干長い12.0sであった。したがって、ケース③においてピッチの動揺両振幅の観測値が大きくなっていた原因は明らかでないが、注水がやや不均一であったためケーソンに傾斜が生じ、これにより動揺が増幅したことが原因として考えられる。

5. まとめ

本資料では、小名浜港において建設が進められている台形ケーソンによる防波堤の洋上接合時および設置時の動揺特性について数値シミュレーションによって検討を行ない、第二港湾建設局で実施された模型実験および現地観測の結果と比較検討した。

台形ケーソンに作用する波力およびラディエーション流体力は三

次元特異点分布法によって求め、これを用いて規則波中および不規則波中の動揺量を数値シミュレーションによって求めた。ただし、ロールおよびピッチの仮慣性モーメント係数および減衰定数は自由振動実験の結果を用いて修正した。

本資料の主要な結論は以下のとおりである。

- (1) 台形ケーソンの動揺量の実験値と計算値とはおおむね一致した。
- (2) ただし、アンダーキールクリアランスの小さい4号船溜A1断面と掘付場A4断面の動揺量の一部の成分については、計算値は実験値に比べて大きい。

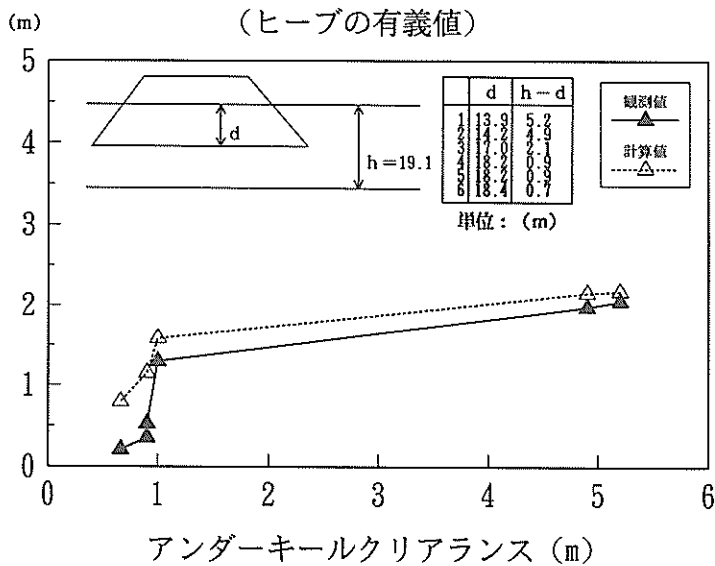


図-44-(1) アンダーキールクリアランスと動揺振幅(ヒープ)

- (3) 実験値および計算値を用いて作業限界波高を検討した。作業限界波高は、波周期に依存し、長周期側において小さくなる傾向がみられた。作業限界は、断面ごとに若干の相違がみられたが、A1~A3断面では波周期10sにおいてはおおむね0.2~0.25m、波周期7sにおいてはおおむね0.3~0.4m程度である。また、A4断面では、波周期10sにおいてはおおむね0.4m、波周期7sにおいてはおおむね0.8mである。
- (4) 現地観測の結果によれば、掘付時のケーソンの動揺量はアンダーキールクリアランスが小さくなるに

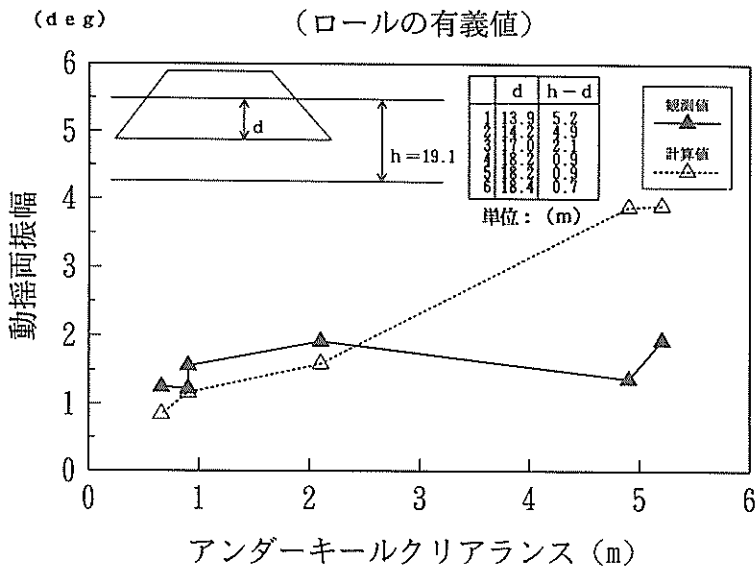


図-44-(2) アンダーキールクリアランスと動揺振幅(ロール)

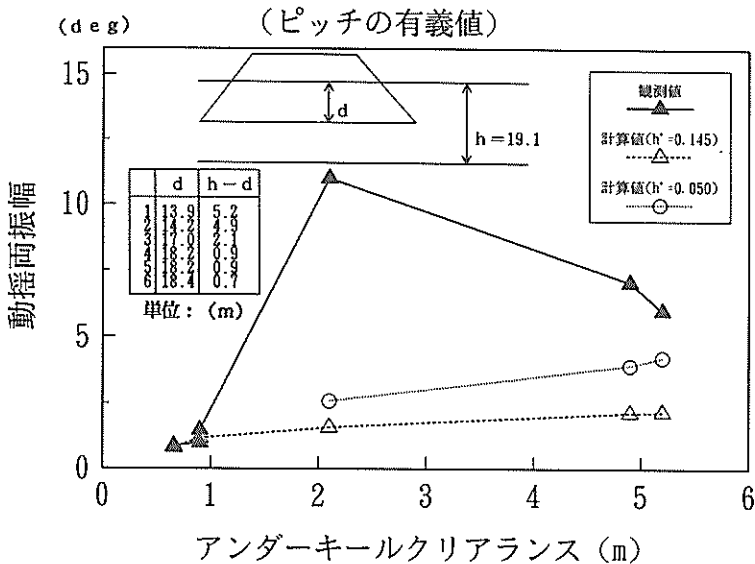


図-44-(3) アンダーキールクリアランスと動揺振幅(ピッチ)

したがって低減する傾向があり、計算においても同様な傾向がみられた。

本資料において明確にできなかった点について以下に述べる。結論の(2)でも示した様にアンダーキールクリアランスが小さい断面については台形ケーソンの動揺両振幅の計算値と実験値との対応があまり良くなかった。と

くに、規則波の長周期波側においては計算値と実験値の対応があまり良くない場合があった。しかしながら、実際にケーソンの据付が実施できると考えられる波周期10s以下の不規則波の条件では、本手法によって計算される動揺量はおおむね実験値と一致することから、台形ケーソンに対して特異点分布法を適用して波力およびラディエーション流体力を求め動揺解析する手法の適用性はおおむね確認されたと思われる。

最後に、本資料をとりまとめるにあたり、運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所および同小名浜港工事事務所の各位には模型実験データおよび現地観測データ等の提供において大変お世話になりました。深く感謝の意を表します。

(1993年3月31日受付)

参 考 文 献

- 1) 小坪清真: "土木振動学", 森北出版株式会社, 1973年4月, pp. 31~43
- 2) 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の検討 -", 港湾技術研究所報告, 第19巻第2号, 1980年9月, pp. 105~143
- 3) Faltinsen O. M.・Michelsen・F. C.: "Motions of Large Structures in Waves at Zero Froude Number" *Proc. Int. Symp. Pyn. Mar. Vehic. Struct. in Waves, Inst. Mech. Engrs. London*, 1974年, pp. 99~114

主 要 記 号 表

C : 減衰マトリックス
 dS : Q に関する面積分
 $G(P, Q)$: Green 関数
 g : 重力加速度
 h : 水深
 h' : 減衰定数
 i : 虚数単位
 $J_0(X)$: 第1種 Bessel 関数
 $K_0(X)$: 第2種変形 Bessel 関数
 k : 波数
 k_n : n 次の波数
 M : 質量マトリックス
 N : 非線形減衰マトリックス
 n_x : 単位法線ベクトル n の X 軸方向成分
 n_y : 単位法線ベクトル n の Y 軸方向成分
 n_z : 単位法線ベクトル n の Z 軸方向成分
 $P = (x, y, z)$: 流体中の任意の点
 P : 荷重ベクトル (波浪荷重, 風荷重, 流れによる)
 $P. V.$: 主値
 $Q = (\xi, \eta, \zeta)$: 物体表面上のわき出し点
 R : $R = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}$
 R' :
 $R' = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z + 2h + \zeta)^2}$
 $R(x)$: 静水圧復元力および係留系による復元力マトリクス
 r : $r = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}$
 r : 極座標
 S_0 : 物体表面
 t : 時刻
 $v_i(P)$: P 点における運動モード i による複素流速

v_j : 複素流速
 X_j : j 方向の運動モードの強制動揺の振幅
 \ddot{x} : 加速度ベクトル
 \dot{x} : 速度ベクトル
 $x |x|$: 速度の自乗ベクトル
 x : 変位ベクトル
 x : 座標
 x_G : 浮体の重心座標
 $Y_0(X)$: 第2種 Bessel 関数
 y : 座標
 y_G : 浮体の重心座標
 z : 座標
 z_G : 浮体の重心座標
 Φ : 全速度ポテンシャル
 Φ_0 : 入射波の速度ポテンシャル
 $\Phi_1 \sim \Phi_6$: 物体を強制動揺させたときの各運動モードの速度ポテンシャル ($j=1$: サージ, $j=2$: スウェイ, $j=3$: ヒープ, $j=4$: ロール, $j=5$: ピッチ, $j=6$: ヨウ)
 Φ_7 : 散乱波の速度ポテンシャル
 $\phi_0 \sim \phi_7$: 速度ポテンシャルの時間成分
 θ : 極座標
 $\sigma(Q)$: わき出し強さ
 $\frac{\partial}{\partial n}$: P 点における法線方向微分
 ν : $\nu = k \tanh kh$
 ω : 角周波数

港湾技研資料 No. 754

1993・6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 東京プリント

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

Copyright © (1993) by P.H.R.I

Allright 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。