

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL. 35 NO. 4 Dec. 1996

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究報告 (REPORT OF P. H. R. I.)

第35巻 第4号 (Vol. 35, No. 4), 1996年12月 (Dec 1996)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 久里浜湾における長期検潮記録解析  
……………永井 紀彦・菅原 一晃・渡邊 弘・川口 浩二…………… 3  
(Long Term Observation of the Mean Tide Level and Long Waves at the  
Kurihama-Bay  
…………… Toshihiko NAGAI, Kazuteru SUGAHARA, Hiroshi WATANABE,  
Koji KAWAGUCHI)
2. 防波堤ケーソンの自動設置システムの開発 (第一報) —引船方式の水理模型  
実験による検討—  
……………米山 治男・白石 悟・名里 健吾・高橋 英俊……………37  
(Development of Automatic Installation System of Breakwater Caisson (1st Report)  
— Evaluation of Tugboat Support System by Hydraulic Model Experiments —  
…………… Haruo YONEYAMA, Satoru SHIRAISHI, Kengo NAZATO,  
Hidetoshi TAKAHASHI)
3. 混和材として分級フライアッシュを用いたコンクリートの港湾・海洋構造物  
への適用性に関する研究  
……………濱田 秀則・福手 勤・石井 光裕……………75  
(A Study on An Application of Classified Fly Ash Mixed Concrete to  
Port & Harbour Structures or Marine Structures  
…………… Hidenori HAMADA, Tsutomu FUKUTE, Mitsuhiro ISHII)

## 防波堤ケーソンの自動設置システムの開発（第一報） —引船方式の水理模型実験による検討—

米山 治男<sup>\*</sup>・白石 悟<sup>\*\*</sup>・名里 健吾<sup>\*</sup>・高橋 英俊<sup>\*\*\*</sup>

### 要 旨

本報告では、防波堤ケーソンの据付作業の省力化および工費の縮減、作業員の安全性の確保、施工能率の向上等に寄与することを目的として開発した、防波堤ケーソン等の海洋構造物の自動設置システムについて述べる。

本報告で示すシステムは、以下の手順で目標としたケーソン設置位置にケーソンを据付けるものである。

- ①ケーソンを据付ける際に、ケーソンの位置および動揺量データ、ワイヤの張力データ、ケーソン設置海域の波高データなどを計測する。
- ②計測データに基づき、作業船に搭載したエンジニアリングワークステーション（Engineering Work Station, EWS）を用いてケーソンの位置および動揺を予測する。
- ③各ウインチに対して、EWS からワイヤの巻上げ・繰出しの操作命令を出力してケーソンの位置制御を行う。

以上の手順による本システムを用いることにより、現在、作業船上で作業員が直接手動で行っているウインチ操作作業を自動化することができ、海上工事における作業環境の改善が期待できる。

本システムは、引船を使用した引船方式、引船を使用せずアンカーを用いたアンカーワイヤ方式の2方式でケーソンの据付作業を行うことが可能である。本報告では、これら2方式のうち、引船方式によるシステムについて水理模型実験を実施し、本システムの制御アルゴリズムの有効性を検証した。その結果、本システムを使用すればケーソンを自動的にかつ十分な精度で設置できることが確認できた。

キーワード：ケーソン、海洋工事、据付作業、ウインチ、自動化、計測施工、動揺

---

<sup>\*</sup> 構造部海洋構造研究室  
<sup>\*\*</sup> 構造部海洋構造研究室長  
<sup>\*\*\*</sup> 第二港湾建設局横浜機械整備工事務所所長

# Development of Automatic Installation System of Breakwater Caisson (1st Report)

## — Evaluation of Tugboat Support System by Hydraulic Model Experiments —

Haruo YONEYAMA \*  
Satoru SHIRAISHI \*\*  
Kengo NAZATO \*  
Hidetoshi TAKAHASHI \*\*\*

### Synopsis

This report describes an automatic installation system of offshore structures such as breakwater caissons which has been developed for the purpose of reducing labor during caisson installation work and the cost of construction, maintaining the safety of workers, improving construction efficiencies and so on. The system consists of an Engineering Work Station (EWS) with A/D and D/A converters, winches operated by control signals from the EWS and an observation system used to measure wave height, caisson motion and so on, and it enables automatic construction of offshore breakwaters. As a caisson is installed, the system obtains data on caisson position and motion, wave height, and wire tension and displacement through the observation system in order to predict the motions of the caisson by use of the EWS. Control signals are then output from the EWS to each of the winches for causing the caisson to move to the optimum position for installation. This procedure is repeated, and the caisson is finally installed at the target position near the side of a breakwater. By use of the automatic installation system, the present winch operation which is directly hand-operated by several operators on a floating crane is able to be automated, and the working conditions on offshore constructions are expected to be improved. The EWS includes a program allowing installation work to be performed using two associated units. One is a tugboat support system and the other is an anchor wire system. In this paper, hydraulic model experiments for the tugboat support system is reported, and the validity of the control algorithm of the automatic installation system is confirmed. It is then certified from the experimental results that this system is able to automatically install breakwater caissons with good accuracy.

**Key Words :** Caisson, Offshore construction, Installation work, Winch, Automatization,  
Measuring execution, Caisson motions

---

\* Member of the Offshore Structures Laboratory, Structural Engineering Division

\*\* Chief of the Offshore Structures Laboratory, Structural Engineering Division.

\*\*\* Chief of the Yokohama Machinery Improvement Office, The Second District Port Construction Bureau

目 次

要 旨

1. まえがき	41
2. 現在の防波堤ケーソンの据付手法	42
2. 1 防波堤ケーソン据付時の波浪条件	42
2. 2 現在のケーソン据付手法	43
3. 防波堤ケーソンの自動設置システム	44
3. 1 自動設置システムの構成	44
3. 2 自動設置システムのアルゴリズム	46
3. 3 ケーソンの位置予測計算方法	50
4. ケーソン自動設置システムの水力模型実験	52
4. 1 自動設置システム実験模型	52
4. 2 データ計測および制御システム	56
4. 3 実験ケースおよび実験状況	58
5. 水力模型実験結果	60
5. 1 制御信号出力結果	60
5. 2 ケーソンの重心点の軌跡	62
5. 3 ケーソンの動揺の時刻歴	63
5. 4 ウインチデータの時刻歴	66
5. 5 ケーソンの最大動揺量	69
5. 6 ケーソンの設置誤差	70
6. 結論	72
7. あとがき	73
謝 辞	73
参考文献	73
主要記号表	74

## 1. まえがき

従来、港湾は東京湾、大阪湾、伊勢湾などの湾内あるいは半島や島しょによる遮蔽効果の高い比較的静穏な海域に立地していた。ところが高度成長期には、沿岸域における大規模工業地帯の拠点として位置づけられる港湾として、鹿島港などに代表される外洋に面した港湾の建設が進められるようになった。また近年では、エネルギー港湾や国際流通港湾としての役割をもつ港湾の建設が外洋域で進められている。

これらの太平洋に面した外洋性港湾の建設においては、厳しい気象・海象条件のもとで防波堤ケーソンの据付作業が実施される。現在、このような海域における据付作業の安全化、効率化対策が緊急の課題として建設現場より要請されている。例えば、ケーソン上での作業は防波堤建設海域の波浪状態によっては危険を伴う場合もあり、実際に、据付作業中のワイヤの切断による死傷事故が発生している。したがって、ウインチおよび緊張したワイヤの直近における作業を回避することなど、ケーソンの据付作業における作業員の安全性の向上が求められている。また、現在のケーソンの据付方法では直接据付工事に携わる人員は約30名であり、その他、監督測量船、警戒船、引船、起重機船の要員が加わり約50～100人の体制で据付工事が実施されている。これに対し、将来的には作業員の高齢化あるいは減少が予想されることから、多数の熟練技術者の勘と経験に大きく依存している従来のケーソンの据付作業を省力化することも望まれている。そして、現在の港湾工事においては、建設工費の縮減が最重要課題とされているが、ケーソン据付における作業要員の数を大幅に減らすことができれば、工費の縮減につながる可能性も大きい。なお、本研究において開発した新しいケーソン据付方法では、直接据付工事に携わる要員が現在の約30名から約15名へと半減できるものと推算されており<sup>1)</sup>、建設工費の縮減につながる事が期待される。さらに、現在の防波堤ケーソンの据付手法では、外洋性港湾においてはその厳しい波浪環境ゆえに作業が中断あるいは中止されることも多く、建設工事が可能な十分な静穏日数を確保することができない。したがって、防波堤ケーソンの設置限界波高の見直しを図り、ケーソン据付の稼働率を向上させることも要求されている。また、今後、外洋でのケーソン据付工事において、大型ケーソンあるいは特殊な形状のケーソンの開発が進められていくものと考えられるが、これらのような新しい構造のケーソンの据付が可能となる汎用的な据付手法の開発

も要請されている。

以上のことから、現状では熟練技術者の勘と経験により行われている防波堤ケーソンの据付作業の改善、改良を施すために、防波堤ケーソン等の海洋構造物の設置作業を自動的に行う自動設置システムを開発した。本システムは、防波堤ケーソンの据付作業の省力化および工費の縮減、作業員の安全性の確保、施工能率の向上、異形あるいは大型ケーソンの安全な据付等に寄与することが期待される。

本報告で示す自動設置システムでは、まず、ケーソンを据付ける際にケーソンの位置および動揺量データ、ワイヤの張力データ、ケーソン設置海域の波高データなどを計測する。次に、これらのデータに基づき作業船に搭載したエンジニアリングワークステーション（Engineering Work Station, EWS）を用いてケーソンの位置および動揺を予測する。そして、各ウインチに対してEWSからワイヤの巻上げ・繰出しの操作命令を出力してケーソンの位置制御を行い、最終的には目標としたケーソン設置位置にケーソンを据付ける。以上の手順による本システムを用いることにより、現在、作業船上で作業員が直接手動で行っているウインチ操作作業を自動化することができ、海上工事における作業環境の改善が期待できる。

本システムを構築するにあたり、事前に防波堤ケーソン据付作業の事例調査を実施し、据付手法の分類を行っている。それらの調査結果を整理、検討した結果、ワイヤの配置状況、アンカーおよび引船の使用法により、引船を使用した引船方式、引船を使用せずアンカーを用いたアンカーワイヤ方式の2種類のケーソン据付手法に大別できることが判明した。本システムにはこれら2方式に対して制御プログラムが組み込まれており、どちらの方式でもケーソンの据付作業を行うことが可能である。

本研究では、開発した自動設置システムのうち、まず、引船方式によるシステムに関して、水理模型実験によりその妥当性を検証することとした。本報告では、自動設置システムの構成、ケーソンの位置制御アルゴリズム、水理模型実験の実施方法等について解説するとともに、水理模型実験結果について考察、検討を行っている<sup>2)~6)</sup>。また、アンカーワイヤ方式によるシステムの水理模型実験も既に実施しており、今後、第二報として報告する予定である。

## 2. 現在の防波堤ケーソンの据付手法

### 2.1 防波堤ケーソン据付時の波浪条件

防波堤ケーソンの据付工事はケーソン設置海域の気象・海象状態，特に波浪条件に大きく左右される。本研究では，運輸省第二港湾建設局管内の太平洋に面した5港湾で実施されたケーソンの据付工事を調査し，16の事例において工事日における波浪状態を取りまとめた<sup>7)</sup>。

表-1はその調査結果の中の一例を示したものである。表中の○はケーソンの据付が行われたことを示し，×は波浪条件が悪かったために，前日または実施日当日の朝にケーソンの据付の中止が決定されたことを示す。表中の上段に示された平成3年12月3日～12月6日までのケースでは，始めの3日間は現場の波浪状態が悪くケーソンの据付が実施されず，4日目にやっとケーソンが設置されたことを表している。また下段に示されたケースでは，最初の6日間はケーソンの据付が実施されず，結局7日目にケーソンが設置されたことを表している。ケーソン据付の中止・実施の判断は，前日夕刻における翌日の現場海域の気象・海象予報や実施日当日朝の波浪状態の目視により決定されたものである。なお，表中の有義波高，有義波周期は作業日の朝に測定された値を示している。そのため，本調査での据付作業の実施・中止の波浪条件は，据付作業の中止決定日と波浪観測日の相違に関連してある程度のばらつきを持っていることに留意する必要がある。

図-1は，前述の16事例において，ケーソンの据付が実施あるいは中止されたときの有義波高，有義波周期を示している。●および△は，それぞれケーソンの据付の

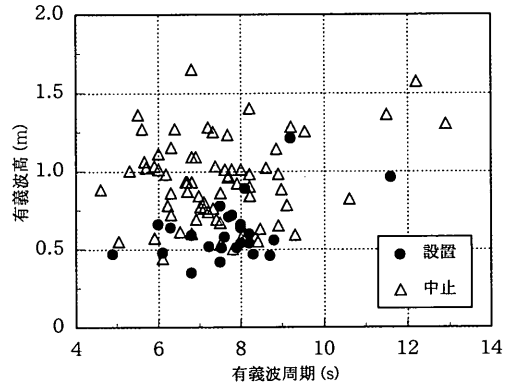


図-1 ケーソン据付作業時の有義波高・有義波周期

実施および中止を表す。この図より一部の例外を除き，おおむね有義波高0.8m以下，有義波周期9.0s以下の波浪条件でケーソンの据付が実施されていることがわかる。有義波高0.8m以下，有義波周期9.0s以下の波浪条件でもケーソンの据付が行われていない場合もある。これは，前述したように，現場海域の気象・海象予報により実施日前日に据付作業の中止を決定しても，当日朝の波浪状況が良くなることもある，また，朝の気象・海象条件が良くても，海象条件が悪化することが予想されるときにはそれを見こして据付中止の決定をする，といった要因によるものと考えられる。したがって，この図からケーソン据付作業の限界波浪条件を有義波高0.8m，有義波周期9.0sとし，この条件を防波堤ケーソンの自動設置システムの水理模型実験上での検証条件として採用した。

表-1 防波堤ケーソン据付作業時における波浪状態の例

日付	有義波高 (m) $H_{1/3}$	有義波周期 (s) $T_{1/3}$	据付の可否
平成3年12月 3日	1.36	11.5	×
12月 4日	1.57	12.2	×
12月 5日	1.30	12.9	×
12月 6日	0.96	11.6	○
平成3年12月 8日	1.11	6.0	×
12月 9日	0.88	4.6	×
12月10日	1.02	5.7	×
12月11日	0.44	6.1	×
12月12日	1.27	5.6	×
12月13日	1.01	6.0	×
12月14日	0.35	6.8	○

×：ケーソン据付作業の中止・延期を示す。  
○：ケーソン据付作業の実施を示す。

## 2.2 現在のケーソン据付手法

防波堤ケーソンの自動設置システムの構築に先立ち、ケーソン据付作業の実態を2.1で示した16事例について調査している。この調査結果をもとに、引船、アンカーの配置およびワイヤの配置状況を分類し、またケーソン据付作業におけるウインチ操作の基本パターンを整理し、防波堤ケーソン自動設置システムのアルゴリズム設計の際の参考とした。

まず、16事例のケーソン据付作業の調査結果を整理し、取りまとめた結果、ワイヤの配置状況、アンカーおよび引船の使用形態により、引船を使用した引船方式、引船を使用せずアンカーを用いたアンカーワイヤ方式の2種類のケーソン据付手法に大きく分類できることがわかった。引船方式は、既設のケーソンがある場合、アンカーワイヤ方式は、防波堤において最初の据付ケーソンである場合あるいは大型ケーソンである場合に比較的好く用いられる方法である。本研究で開発した自動設置システムでは、これら2方式に対してケーソンの据付作業を行うことができるように制御プログラムの作成を行った。

次に、据付作業におけるウインチ操作の状況を調査、整理した。図-2は八戸港の八太郎地区北防波堤において調査した事例を示したものである。調査は平成3年12月6日および12月14日に実施し、その調査内容は、

- (a)ケーソンの据付の全体状況
- (b)ケーソン据付における作業指揮者の指示
- (c)ウインチ操作のブロックダイアグラム
- (d)ケーソンの位置および動揺量と作業命令の関係
- (e)既設ケーソンと据付ケーソン間の距離

等であり、特にウインチ操作状況の把握に重点を置いて調査を実施した。

八戸港におけるケーソン据付作業は引船方式で行われ、図-2にはその引船方式によるケーソン据付作業時の作業船、ウインチ、ワイヤ等の配置が示されている。また、図中には据付作業調査時における観測体制も示してある。据付ケーソンの大きさは幅9.0m、長さ15.0m、高さ12.0mで、重量は1,177tfである。引船は3隻用いられており、引船1により据付ケーソンの縦方向の位置保持を、引船2および引船3で横方向の位置保持を行う。ウインチは起重機船上に5台搭載されており、それぞれ引寄せワイヤ、クロスワイヤおよび引付けワイヤに接続されている。観測体制に関しては調査員が起重機船上に5名、既設ケーソン上に1名おり、ワイヤの状態、ウインチの作動状況およびケーソンの動揺等を調査している。また、ビデオ撮影も行っており、ウインチの作動状態およびケーソンの据付状況を記録している。

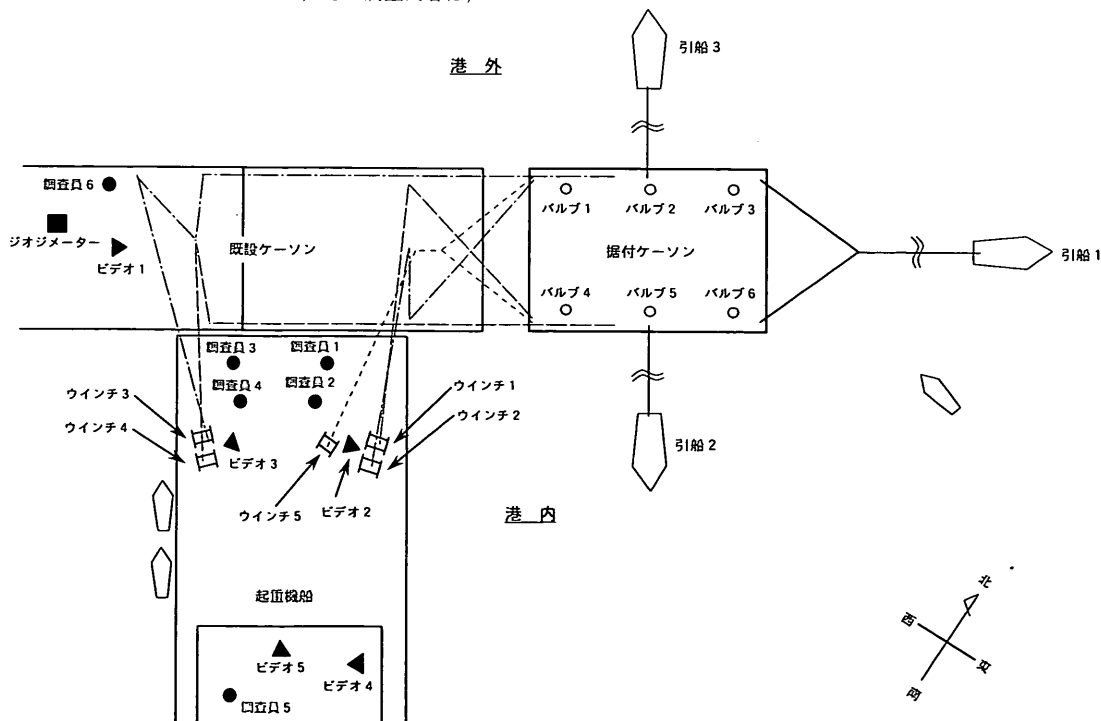


図-2 ケーソン据付作業の状況（八戸港八太郎地区北防波堤）



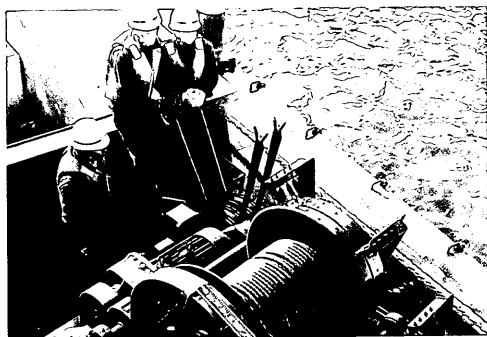


写真-1 ケーソン据付作業時のウインチ操作の状況

本調査結果よりケーソン据付作業は、(a)引寄せ作業、(b)接近作業、(c)設置作業の3段階に分類されることがわかった。ケーソン据付手順は、まず、引寄せ作業において、ウインチ5に対応した引寄せワイヤにより、据付ケーソンを既設ケーソンから数十メートルの位置から数メートルの位置まで引寄せる。次に、接近作業において、ウインチ1・ウインチ2に対応したクロスワイヤおよびウインチ3・ウインチ4に対応した引付けワイヤで、据付ケーソンを既設ケーソンから2～3メートルの位置まで接近させる。そして、最後に設置作業において、クロスワイヤおよび引付けワイヤで数十センチまで近づけた後、最終的には目標とするマウンド上のケーソン設置位置にケーソンを着底させる。なお、据付作業中においてはケーソンを徐々に沈め、完全に着底させるために、ケーソン上の6箇所には設けられたバルブを用いて注水が行われた。

写真-1は現在のケーソン据付作業時のウインチ操作の状況を示す。ウインチ操作員は作業指揮者の指示に従ってウインチを操作しているが、操作員はワイヤの直近で作業しなければならないため、しばしば危険にさらされる。作業員の安全性の確保のため、このような作業は今後、回避して行くべきであり、本システムを使用すればウインチ操作を自動化できるためワイヤ付近での作業を省力化できる。

### 3. 防波堤ケーソンの自動設置システム

#### 3.1 自動設置システムの構成

本研究で開発した自動設置システムは、ケーソンを据付ける際にケーソンの位置および動揺量データ、ワイヤの張力データ、波高データ等を計測し、これらのデータ

を基にEWS(本研究ではAS4050GX 東芝製を使用)を用いて次タイムステップにおけるケーソンの位置および動揺量を予測し、EWSから各ウインチに対してワイヤの巻上げ・繰出しの操作命令を出力して、目標とする設置位置からのケーソンのずれを修正する位置制御を行うものである。

図-3に本システムの全体概要をブロック図で示す。この図からわかるように、ケーソンの自動設置システムは以下の5つの機能から構成される。

#### (a)計測による情報検出部

外力情報(波, 風, 流れ等), ケーソンの位置および動揺量, ワイヤの張力および巻上げ・繰出し量, アンダーキールクリアランス(ケーソンとマウンド間の距離)等を計測する。

#### (b)信号入出力プロセス部

(a)の計測による情報検出部で計測されたデータおよびEWSから発信されるウインチの制御信号(ワイヤの巻上げ・繰出しの操作命令)をA/D・D/A変換装置でデジタル信号およびアナログ信号に変換する。

#### (c)制御システム部

計測データ転送の時間遅れおよびウインチの作動の遅れを考慮してケーソンの位置および動揺を予測する。予測においては6元2階微分運動方程式を時間領域で計算する。そして、ケーソンの位置および動揺の予測値に基づき、ウインチの制御信号を出力する。なお、本システムにおけるケーソンへの注水の制御は、キーボードから注水バルブの開閉の指示を入力する手動制御である。

#### (d)画面表示部

ケーソンの位置および動揺をEWSのディスプレイ上に視覚的かつリアルタイムに表示する。同時にケーソンの重心位置座標, ワイヤ張力等の数値出力もディスプレイ上に表示する。また、計測されたケーソンの動揺量, 波高, ワイヤ張力等のデータを時刻歴グラフとして画面上に表示する機能もある。

#### (e)処理指示部

作業前にケーソンの諸元等, 据付に必要な情報を入力する。本システムではウインチ操作の自動および手動の切り換えが可能であるが、手動制御の場合にはキーボードから作業開始命令を入力する。

これら5つの機能は、(a)計測による情報検出部が観測データ計測機器に関連し、(b)信号入出力プロセス部がA/D・D/A変換装置に、そして(c)制御システム部、(d)画面表示部および(e)処理指示部はEWSに組み込まれている。

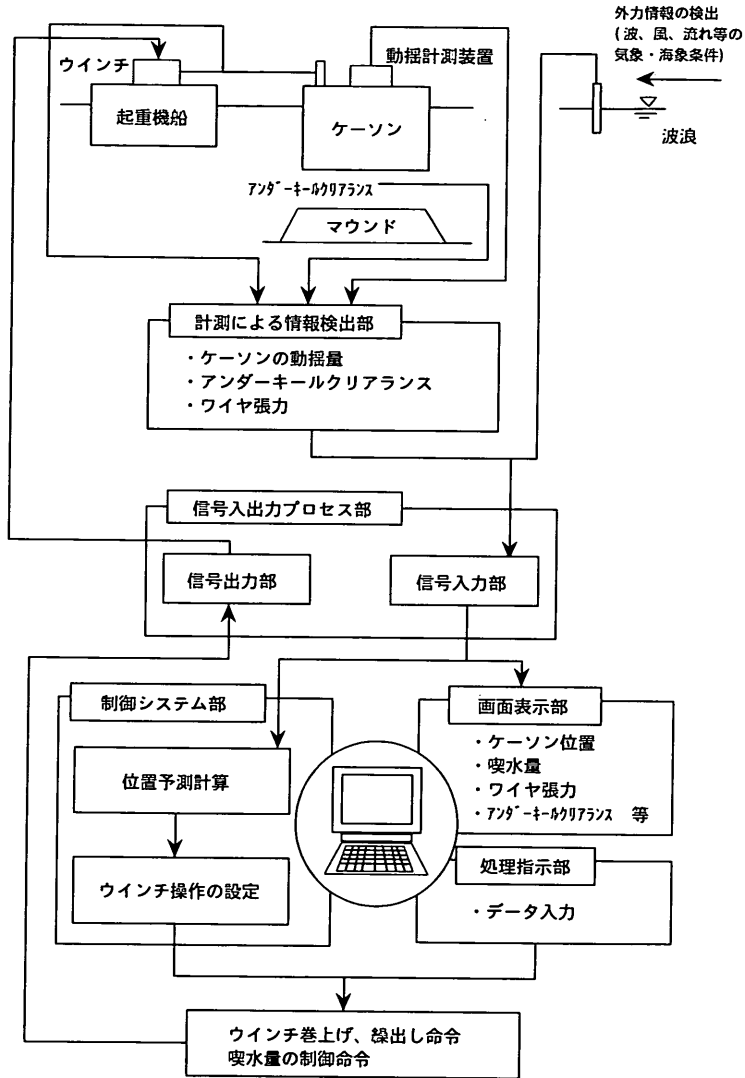


図-3 自動設置システムの概要図

図中には起重機船が示されているが、本システムでは起重機船は係留、固定されており動揺しないものと仮定しているため、起重機船の動揺を考慮したシステムとはなっていない。しかし、図-2に示したように、一般的な防波堤の築造では起重機船は既設ケーソンの背後に係留されることが多いため、その動揺の影響は小さいことから、本システムにおいて起重機船を固定としたことについては特に問題はないと考えられる。

また、先に述べたように外洋に面した海域におけるケーソンの据付手法は引船を使用した引船方式、アンカーを用いたアンカーワイヤ方式の2つに大きく分類できる。図-4(1)~(2)は、それぞれ引船方式およびアンカーワイヤ方式の引船およびアンカーの配置とワイヤの配置状況を示している。本システムでは、引船方式、アンカーワイヤ方式のどちらの方式でもケーソンの据付作業を行うことが可能である。アンカーワイヤ方式に関しては3

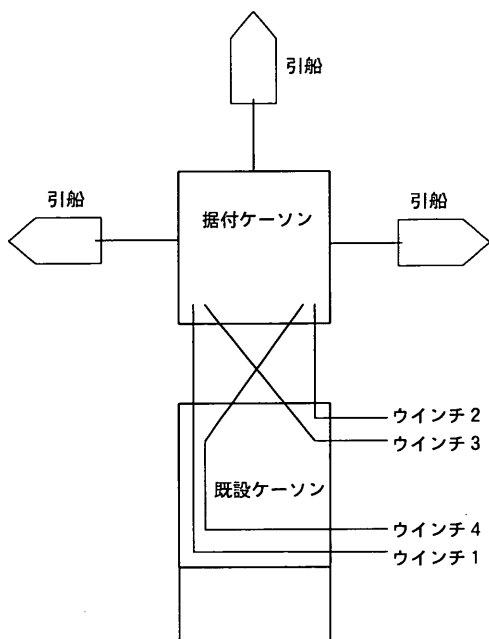


図-4 (1) 引船方式の掘付作業

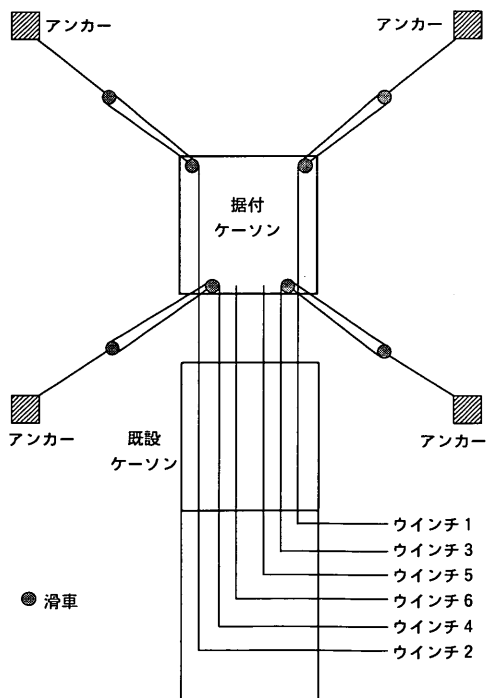


図-4 (2) アンカーワイヤ方式の掘付作業

種類のワイヤ配置パターンに対して制御アルゴリズムが組み込まれているが、ここではそれら3パターンのうち1つを図に示している。

引船方式ではケーソンの位置保持のため、引船を3隻使用する。引船は、そのけん引力を変動させることにより、ケーソンが風および流れなどの力によって流されることを減少させ、より安定的に掘付作業を実行する助けとなっている。ケーソンの位置制御に用いるウインチは4台であり、2本の引付けワイヤ（ケーソンの引付けおよび回転の制御に使用）および2本のクロスワイヤ（ケーソンの法線直角方向の位置制御に使用）の巻上げ・繰出しを行う。ここで、回転とはケーソンの水平面内の回転すなわちヨウを表す。また、法線とは防波堤の中心軸に沿った線を指し、法線直角方向とはこの中心軸に垂直な方向すなわちケーソンのスウェイ方向を表す。本システムの機能上、直接、引船の制御まで行うことはできないため、本システムを用いた実際のケーソン掘付作業時には、現在の掘付作業においても用いられる無線等で引船に指示を送る必要がある。すなわち、作業指揮者がEWSのディスプレイを見ながら、引船に対してけん引力の増減に対する指令を無線によって送るものとする。水理模型実験上では、引船模型を用いて引船に対する無線での指示を再現することは困難であることから、今回の実験においては後述するように引船を架台によってモデル化し、引船への無線指示はモデル化していない。

一方、アンカーワイヤ方式では引船の代わりに4つのアンカーを用い、ケーソンの位置を保持する。ウインチは6台であり、クロスワイヤは使用しないが滑車を用いてワイヤリングを行いワイヤを4方向に展張させているため、引船方式よりもケーソンの安定性は向上したものとなる。なお、引船方式、アンカーワイヤ方式ともに実際の現場に適用する場合、作業員のいない掘付ケーソン上におけるワイヤリング手法については新たに開発する必要がある。

### 3.2 自動設置システムのアルゴリズム

本システムは引船方式およびアンカーワイヤ方式の2方式でケーソンの掘付作業を行うことが可能であるが、本研究では引船方式の水理模型実験を実施していることから、引船方式の制御アルゴリズムに関して説明をする。

本システムでは、引船方式の自動設置システムによるケーソン掘付作業を2.2で示した引寄せ作業、接近作業、設置作業の3つの制御フェイズに分類し、それぞれのフェイズに対して制御アルゴリズムを作成している。ただし、水理模型実験においては3つの制御フェイズのうち、

防波堤ケーソンの自動設置システムの開発（第一報）

引寄せ作業を除いた接近作業と設置作業について実施した。その理由は、引寄せ作業と接近作業を連続して実験すると、ケーソン据付作業の途中でワイヤの配置状態が変化するため、模型実験においてその状態を再現することが困難であったからである。したがって、本報告においても主として接近作業、設置作業の制御アルゴリズムに関して説明する。

図-5は本システムの接近作業、設置作業の各制御フェイズの概要を示したものである。その内容は以下に示すとおりである。

(a)接近フェイズ

- (1)接近速度の上限を設定してケーソンを接近させる
- (2)ワイヤと引船でケーソンを姿勢制御しながら、据付位置まで接近させる

(3) ケーソンの制御方法

- ・回転を抑える（クロスワイヤ・引付けワイヤ）
- ・引付け速度を維持する（引付けワイヤ）
- ・法線上を維持する（クロスワイヤおよび引船）
- ・引付ける（引付けワイヤ）

(b)設置フェイズ

- (1)ケーソンを法線上に移動させる

- (2)ワイヤでケーソンを姿勢制御しながら、据付位置に移動させる

(3)ケーソンの制御方法

- ・手前側中心点を法線上に移動させる（クロスワイヤ）
- ・先端側中心点を法線上に移動させる（引付けワイヤおよび引船）
- ・引付ける（引付けワイヤ）

各制御フェイズごとの制御アルゴリズムのフローチャートを図-6(1)~(2)に、また主な制御モードと制御動作を図-7に示す。各制御フェイズの制御動作は、次タイムステップのケーソン位置予測計算により予測されたケーソンの位置および動揺に対して行われる。具体的には、各ステップにおいてワイヤの巻上げ、繰出し、停止に対応した制御信号がEWSから出力され、それに応じてウインチが一定時間動作するようになっている。図-6(1)~(2)のフローチャート中の①~⑥の番号は、図-7の各制御モードの番号に対応している。図-7より制御モードは、主としてケーソンの水平面内の回転角の制御、ケーソンの法線直角方向位置の制御の2つに分けられることがわかる。基本的には、ケーソンの水平面内の

	位置範囲	制御項目
接近フェイズ	<p>クロスワイヤ・引付けワイヤでケーソンを引付け、既設ケーソンに接近するまで</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ケーソン引付け</li> <li>制限制御項目として <ul style="list-style-type: none"> <li>③ケーソン回転抑制</li> <li>⑤ケーソン速度</li> <li>⑥法線直角方向位置制御（手前側、先端側）</li> </ul> </li> </ul>
設置フェイズ	<p>クロスワイヤ・引付けワイヤでケーソンを法線上に移動させ、着底させるまで</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ケーソン引付け</li> <li>・着底</li> <li>制限制御項目として <ul style="list-style-type: none"> <li>⑥法線直角方向位置制御（手前側、先端側）</li> </ul> </li> </ul>

図-5 制御フェイズおよび制御項目

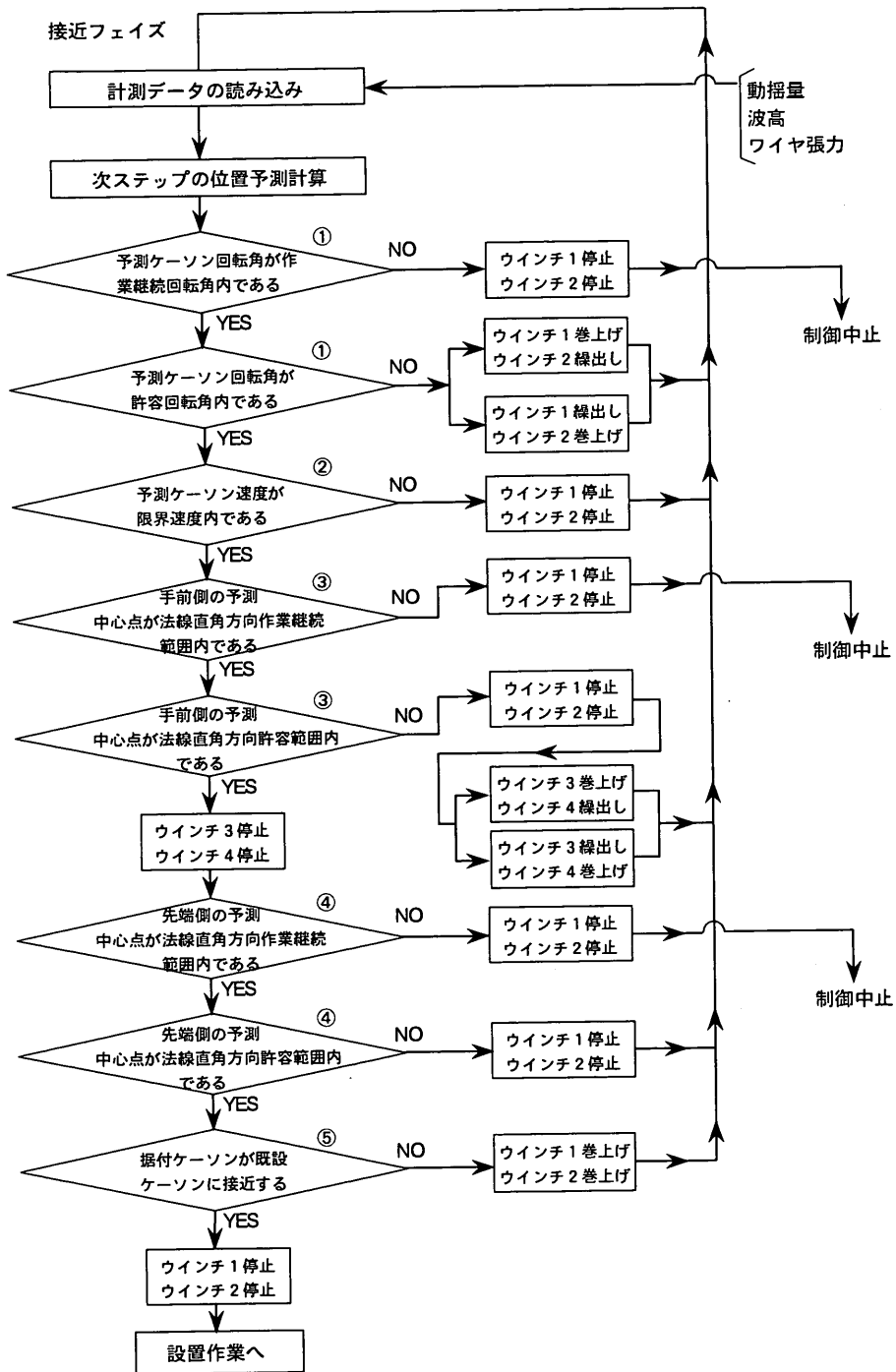


図-6 (1) 制御アルゴリズムのフローチャート (接近フェイズ)

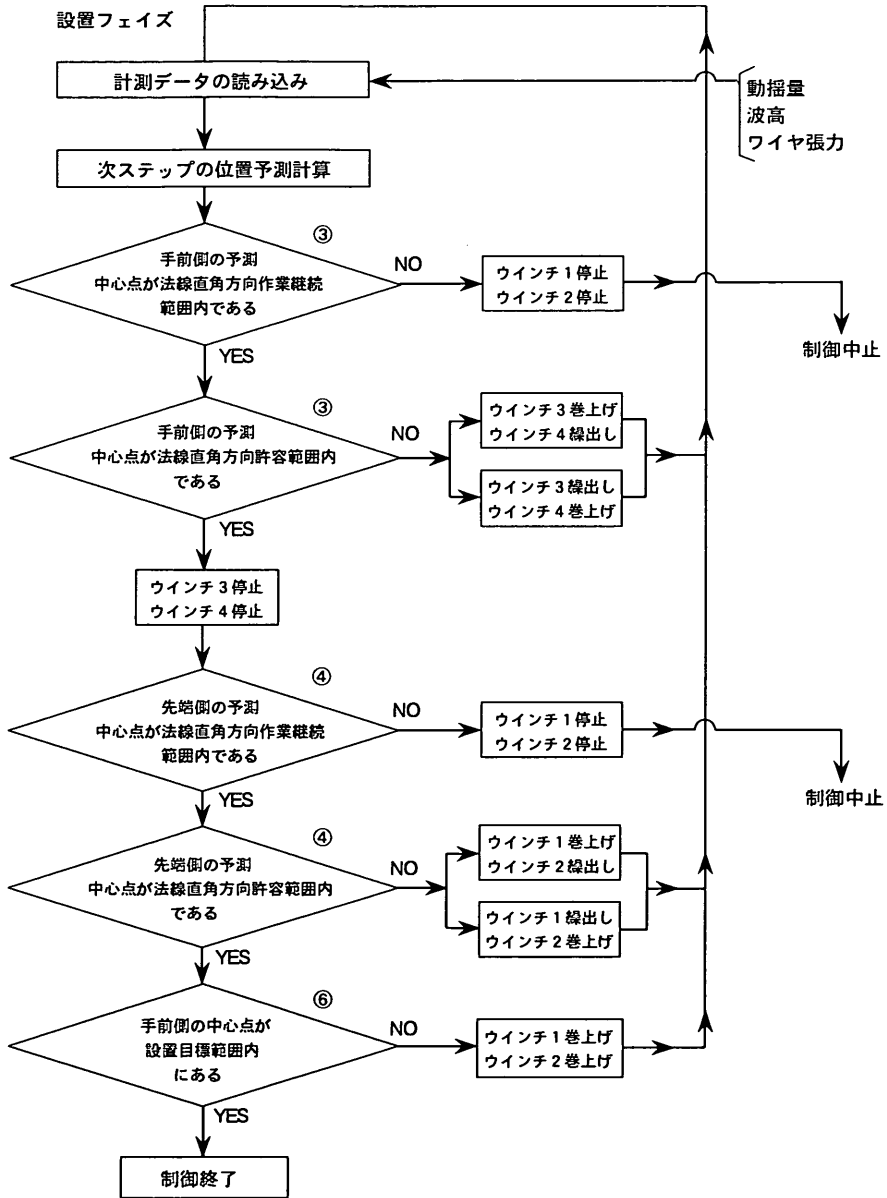


図-6 (2) 制御アルゴリズムのフローチャート（設置フェイズ）

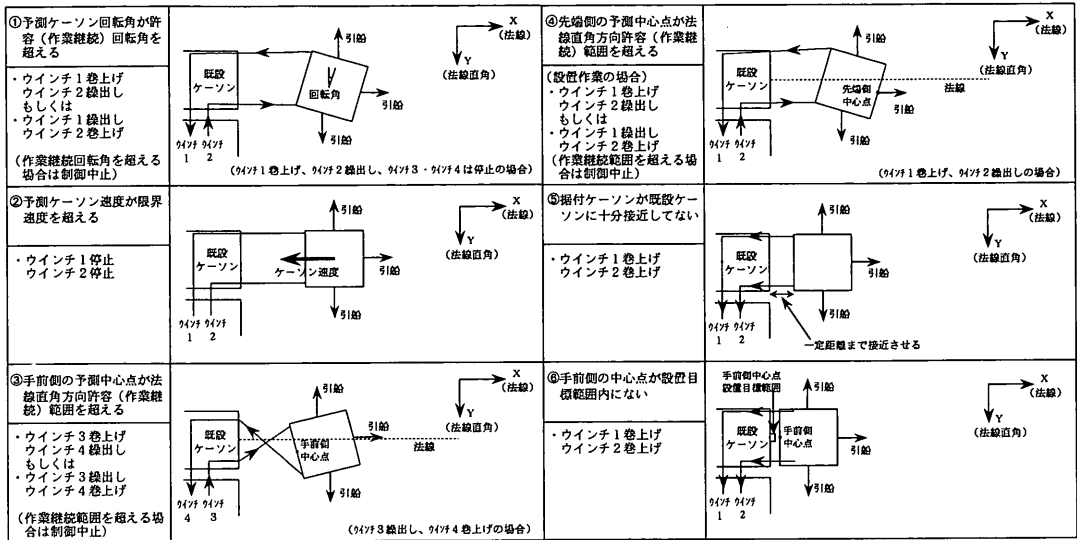


図-7 主要な制御モードと制御動作

回転に対する制御はウインチ1およびウインチ2が行い、ケーソンの法線直角方向の位置制御にはウインチ3およびウインチ4が対応する。ここで、先に述べたようにケーソンの水平面内の回転とはケーソンのヨウを表し、ケーソンの法線直角方向とはケーソンのスウェイ方向を意味する。したがって、本システムはケーソンの動揺6成分のうち、スウェイとヨウに対してのみ制御を行う機能をもっていることになる。

図-8(1)はEWSのディスプレイ上の画面表示であり、引船方式のケーソン据付作業の作業開始状態を示している。ただし、図中のアンダーラインで示された語は説明のために書き加えたものであり、実際にはディスプレイ上に表示されない。ケーソン据付作業中、ディスプレイ上には計測データから得られたケーソンの位置および動揺が時々刻々と一定の時間間隔で表示される。大画面にはケーソンの平面図が表示され、右上の小画面にはケーソンの鉛直図が表示される。平面図中の既設ケーソン上部の破線より上側の領域は作業継続範囲を示し、ケーソンがこの範囲を超えると据付作業は強制的に中止される。また、既設ケーソン上部の中心から伸びた2本の点線の内側は法線直角方向のケーソンの動揺の許容範囲であり、図-7に示したようにケーソンの手前側中心点あるいは先端側中心点がこの範囲をはずれるとケーソンに対して法線直角方向の位置制御が行われる。

図-8(2)は、図-8(1)の平面図中の既設ケーソン上部の小さな矩形範囲の部分を拡大したものである。この

矩形範囲はケーソンの手前側中心点の設置目標範囲であり、ケーソンの手前側中心点が最終的にこの範囲内に入るように制御が実行される。一方、ケーソンの水平面内の回転に関しては、許容回転角がEWS内のプログラム中に設定されており、ケーソンの回転角が許容回転角を超えると回転制御が行われる。

また、小画面の下方には計測データが数値として出力される。この数値は過去の一定時間における最大値あるいは平均値を示している。表示項目は、(1)ケーソンの重心位置座標、(2)経過時間、(3)計測地点における波高、(4)喫水、(5)ワイヤ張力、(6)ウインチ巻上げ・繰出し量である。

### 3.3 ケーソンの位置予測計算方法

時々刻々と観測される波高、ケーソンの位置および動揺量、ワイヤの張力を基に次のタイムステップのウインチ操作信号を設定するために、ケーソンの位置および動揺の予測計算をEWS内で行っている。予測計算においては浮体の動揺解析に一般的に用いられる運動方程式を使用し、この運動方程式をRunge-Kutta法を用いて時間領域で解くことでケーソンの位置および動揺を予測している。また、予測計算中には計測データ転送の時間遅れおよびウインチの作動の遅れ、そして予測計算時間の遅れを補正している。すなわち、本システムではこれらのタイムラグを考慮の上でケーソンの位置および動揺の予測を行って、ウインチに対する制御信号を出力している。

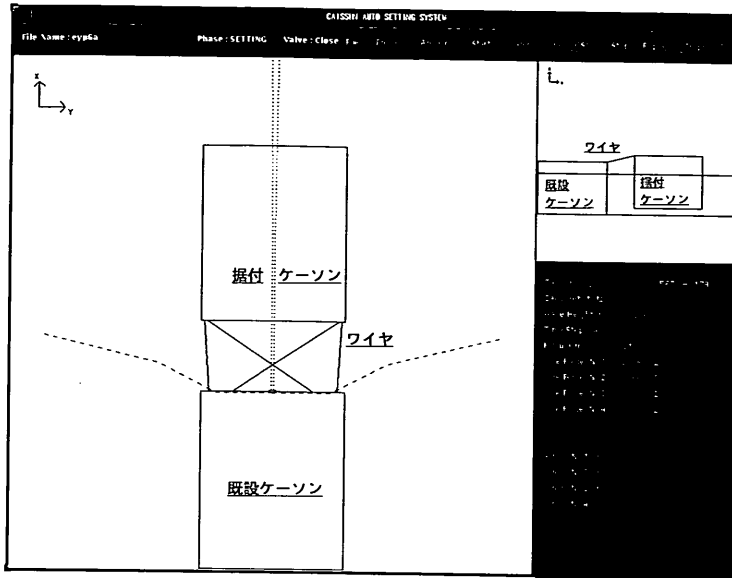


図-8 (1) EWS のディスプレイ上の画面表示（据付作業開始前）

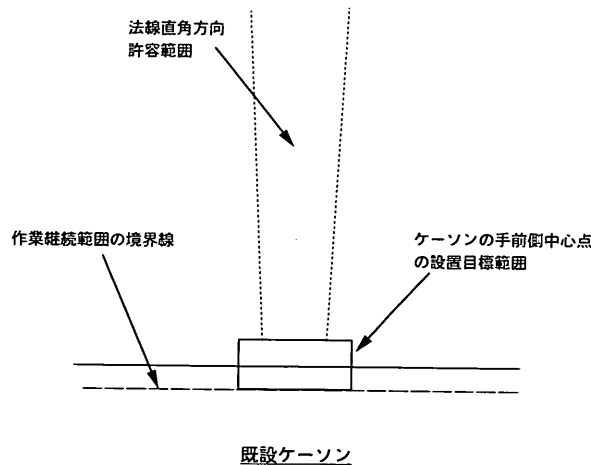


図-8 (2) 既設ケーソン上側部分の拡大図

一般にケーソンの運動方程式は以下の6元2階微分運動方程式で表される。

$$(M + K)\ddot{x} + N\dot{x} + C\dot{x}|x| + Bx = F + R \quad \dots(1)$$

ここに、

- $M$ : 質量および慣性モーメント
- $K$ : 付加質量係数および付加慣性モーメント係数
- $N$ : 線形減衰係数
- $C$ : 非線形減衰係数
- $B$ : 静水圧的復元力係数
- $F$ : 作用荷重（波浪荷重, 風荷重, 流れによる荷重）

$R$ : ワイヤ張力

$\ddot{x}$ : 加速度

$\dot{x}$ : 速度

$\dot{x}|x|$ : 速度の自乗ベクトル

$x$ : 変位, ただし,  $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$  であり,  $x_1$ =サージ,  $x_2$ =スウェイ,  $x_3$ =ヒープ,  $x_4$ =ロール,  $x_5$ =ピッチ,  $x_6$ =ヨウ, である。

ただし, 本研究においては非線形粘性減衰のケーソンの動揺に与える影響は小さいとし, 非線形減衰項  $C\dot{x}|x|$  は考慮していない。また, 水理模型実験においてはケーソンに作用する外力として波浪荷重のみを取り



扱い、風荷重および流れによる荷重等は考慮していない。よって、ここでは波浪荷重すなわち波力のみについて考えるものとする。波力は浮体に作用する入射波によるフルードクリロフの力と、浮体が存在することにより入射波が散乱させられるために生じる散乱波による力の和として求められる。また、浮体の動揺に伴って発生するラディエーション流体力から付加質量係数および付加慣性モーメント係数、線形減衰係数が求められ、これらは流体力係数と呼ばれる。なお、制御プログラムは風荷重あるいは流れによる荷重も評価することができるので、本システムを実際の据付工事において使用する場合には、これらの荷重も同時に評価して予測計算を行うものとする。

ここで、式(1)を用いてケーソンの位置および動揺の予測計算をするためには、まず、運動方程式の各係数を制御プログラム内に設定しておく必要がある。

波力、流体力係数、質量および慣性モーメント、復元力係数の値はケーソンの喫水量により変化することから、これらのデータに関しては EWS 内にデータベースを作成している。本システムでは、波力、ラディエーション流体力は三次元特異点分布法<sup>8), 9)</sup>により求めている。三次元特異点分布法を用いたのはケーソンの形状が箱型でなく任意の形状となっても計算できる利点を有するためである。しかしながら、この方法では計算時間がかかるため、注水により刻々と喫水量が変わることによる波力、ラディエーション流体力の変化をダイレクトに計算することは困難である。さらに、波力は入射波の波周期、波向によって、また、ラディエーション流体力は波周期によってその値が変化する。したがって、あらかじめいくつかの喫水量、波周期、波向に対して波力、ラディエーション流体力を計算しておく必要がある。また、質量および慣性モーメント、復元力係数の値は、ケーソンの形状、質量等から喫水量ごとの計算値を簡単に求めることができる。

このようにして事前に計算した波力、ラディエーション流体力を復元力係数、質量および慣性モーメントの計算値とともにデータファイルとして EWS 内に登録している。これらの計算値はケーソンの位置および動揺の予測計算をするときに、ケーソンの喫水量が変化するとともに運動方程式の各係数項を変えるために使用される。ケーソンの喫水量の変化に関係するデータファイルとして、①注水時間-喫水量関係ファイル、②波力-喫水量関係ファイル、③流体力係数-喫水量関係ファイル、④質量項-喫水量関係ファイルがある。

流体力係数は上述のように喫水量以外に波周期の関数

でもあり、入射波が不規則波の場合、運動方程式の係数として有義波周期に対する数値を用いる。しかし、データファイルの中にその有義波周期に対する値が無いときはその波周期前後の流体力係数を線形補間して用いる。

一方、波力は上述したように喫水量以外に入射波の波周期、波向の関数でもある。水理模型実験の場合はあらかじめ入射波の波周期（不規則波の場合は有義波周期）、波向がわかっている所以他们の値に対する波力を使用する。必要な波周期、波向における波力がデータファイルにない場合は、流体力係数を求めるときと同様に線形補間する。

波力の時刻歴は、波高計から取得された波高データを用いて、データファイルに登録されている規則波単位振幅あたりの波力と波高との積で求められる。このとき用いる波高の時刻歴データは、ケーソン重心点位置のものを用いる必要がある。そこで、計測された波高データに波高計の位置とケーソン重心点間の距離による波の到達時間遅れの補正を施し、ケーソン重心点位置の波高データに換算している。具体的には、波速を式(2)に示す波の分散関係式と式(3)とから計算し、ケーソン重心点と波高計間の距離と波速から時間遅れを算出して、補正をしている。

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad \dots\dots(2)$$

$$c = L/T \quad \dots\dots(3)$$

ここに、

$\omega$  : 波の角周波数

$g$  : 重力加速度

$k$  : 波数

$h$  : 水深

$c$  : 波速

$L$  : 波長

$T$  : 波周期、である。

## 4. ケーソン自動設置システムの水理模型実験

### 4.1 自動設置システム実験模型

#### (1) 概要

引船方式による自動設置システムの水理模型実験を港湾技術研究所の平面水槽（長さ25m × 幅10m × 深さ1m）で実施した。造波機は2台使用し、造波機の背後には消波砕石を、それ以外の平面水槽内の周囲には消波工を配置し、水槽側面からの反射波を抑えた。

自動設置システム実験模型は、据付ケーソン模型、既設ケーソン模型、マウンド模型、注水装置、引船を模擬

した架台、ウインチ模型およびウインチ制御装置から構成される。このうちウインチ制御装置は平面水槽内ではなく、平面水槽わきの計測小屋内に設置されている。なお、以下の論文の中では数値を模型値で表記し、必要に応じて（ ）内に実機換算値を合わせて示すものとする。

## (2) 据付ケーソン模型

据付ケーソン模型は常陸那珂港あるいは久慈港で建設されている防波堤相当のケーソンを参考にした。表-2は実機ケーソンおよび模型ケーソンの諸元を示している。実機ケーソンは7,500tf（型幅20.0m × 全長25.0m × 設置時喫水15.0m）のものであり、模型縮尺を1/40として模型ケーソンの寸法を決定した。模型縮尺は実験波高と平面水槽に設置された造波機の造波性能を勘案して設定している。水理模型実験における相似則はフルード相似則とした。

また、写真-2は据付ケーソン模型の外形を示す。据付ケーソンは透明アクリル製で、内部が仕切板により4つのセルに分割されている。ケーソン内部は注水可能で仕切板の下部に通水孔が空いており、ケーソン内の水が自由に移動できるようになっている。モデル化の参考にした実機ケーソンでは20ほどのセルに分割されているが、ケーソンへの注水はセルの数を増すほど困難になるため、水理模型実験ではセルの数を4とした。据付ケーソン模型上部にはケーソンの動揺量の回転成分（ロール、ピッチ、ヨウ）を計測するための慣性動揺計測装置を設置する天板が設けられている。慣性動揺計測装置については4.2で説明する。

## (3) 自動設置システム実験模型の全景

写真-3は水理模型実験における自動設置システム模型の設置状況を示す。また、写真-4は波浪実験中の様子を示す。写真中央部の人に乗っているグリーン色の模型が既設ケーソン模型であり、その回りを取り囲むように配置されたオレンジ色の模型がマウンド模型である。既設ケーソン模型およびマウンド模型はともに防水ベニヤ板製で、既設ケーソン模型は高さ60.0cm（24.0m）

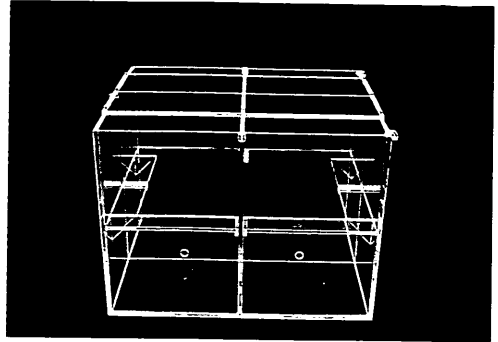


写真-2 据付ケーソン模型

幅50.0cm（20.0m）、一方、マウンド模型は高さ12.5cm（5.0m）である。既設ケーソン模型上には4台のウインチ模型が設置されている。また、既設ケーソン模型前方の水面上に浮いている透明なアクリル製箱形浮体は据付ケーソン模型である。据付ケーソンの初期喫水は31.5cm（12.6m）であり、据付ケーソン内に鉄製の重錘を設置して喫水の調整を行った。また、写真中央上部には注水装置の一部である透明アクリル製のタンクが見えるが、これはケーソンへの注水用水を蓄えておくために使用するものである。なお、模型実験は水深50.0cm（20.0m）で実施した。

## (4) 注水装置

水理模型実験における据付ケーソンへの注水は、注水装置を用いて行った。実際の現場での据付ケーソンへの注水は据付ケーソン上のバルブの開閉によって行われるが、模型実験においては据付ケーソン内に4本のホースを挿入し、このホースから注水を行うものとした。このホースは既設ケーソン模型の後方、水面上1.1mに設置された透明アクリル製のタンクに接続され、バルブを手動で開くことによりタンクに溜められた水が自然流下式で注水できるようになっている（写真-3）。

タンクと注水ホース間は剛なスチール製のパイプになっており、既設ケーソン模型上のボールに一定の高さで取り付けられている。このパイプは手動で水平面内を自由に動かすことが可能である。ゆえに、据付ケーソンの動揺にしたがって注水ホースの位置を変えることができる。ところが、据付ケーソンの動揺あるいは移動によって自動的に注水ホースの位置を変えることはできないため、実験中は既設ケーソン上に人が一名乗り、ケーソンの動揺に合わせて注水パイプを移動させ、注水ホースにより据付ケーソンが拘束されないようにしている（写真-4）。

表-2 ケーソンの諸元

項目	実機ケーソン	模型ケーソン
全長 (m)	25.0	0.625
型幅 (m)	20.0	0.500
型深 (m)	19.0	0.475
喫水 (m)	15.0	0.375
重量 (tf)	7500	0.117

なお、実際の現場でのケーソン据付作業では作業状態により注水速度を変更しているが、本水理模型実験においては注水速度を一定として実施した。

#### (5) ウインチ模型およびウインチ制御装置

引船方式の自動設置システムではウインチは4台使用する。写真-5に4台のウインチ模型を、写真-6にウインチ制御装置を示す。ウインチ模型は、ウインチ制御装置を通して EWS からの制御信号により作動するが、制御装置上の操作ボタンを押すことで手動でも作動可能である。

ウインチ模型には張力計（定格値10kgf のビーム型ロードセル）、変位計（10回転型ポテンシオメータ）が組み込まれており、ワイヤの張力および巻上げ・繰出し量が測定できるようになっている。ワイヤの最大巻上げ速度は $\pm 2.5\text{cm/s}$ （ $\pm 9.5\text{m/min}$ ）で、ウインチ制御装置上のダイヤルで速度調整ができる。模型実験におけるワイヤ巻上げ速度は、実際の現場でのウインチの巻上げ速度を参考に、フルード相似則を考慮して $0.15\text{cm/s}$ （ $0.57\text{m/min}$ ）とした。

また、現場でのワイヤの変位復元力特性を再現するた

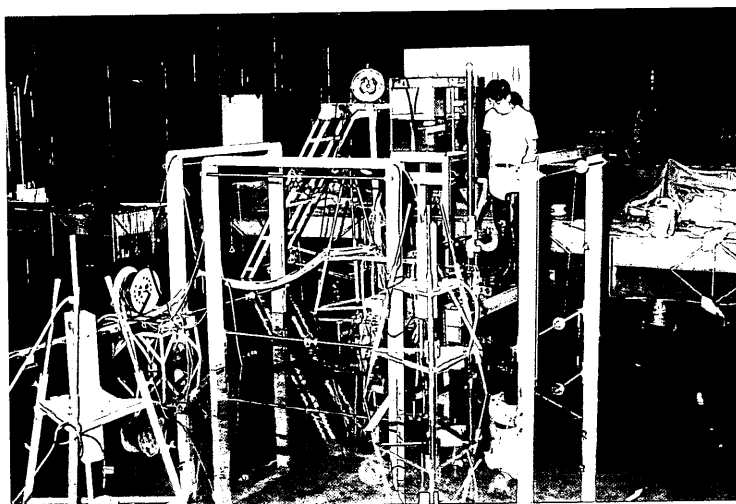


写真-3 自動設置システム模型の設置状況



写真-4 波浪実験中の様子

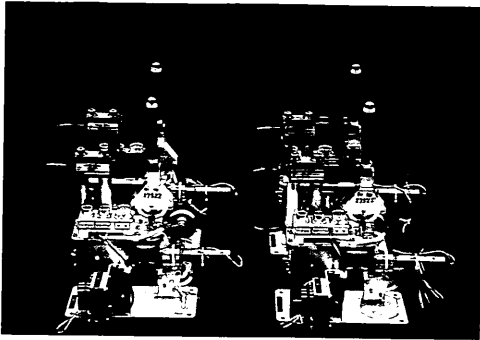


写真-5 ウインチ模型

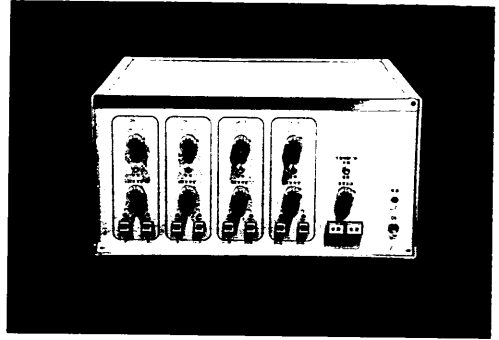


写真-6 ウインチ制御装置

めに、模型実験では据付ケーソン側のワイヤ先端にばね定数100kgf/m (1.6tf/cm) のばね (コイルスプリング) を取り付けている。さらに、ウインチ模型にはオーバーロード・たるみ防止機構が付いており、2kgf 以上の荷重がかかっているときワイヤの巻上げを行おうとした場合、あるいは全く荷重がかかっていないときワイヤの繰出しを行おうとした場合には、ウインチ制御装置上のランプが点灯し自動的にウインチが停止するようになっている。

(6) 架台

引船方式の場合、実際には3隻の引船を用いる必要があるが、模型実験では引船をそのまま再現することが困難なため、3台の架台によって引船を模擬することとした。図-9はこの架台の構造図を示したものである。

3台の架台は据付ケーソン模型を取り囲むように水槽底に設置されている。架台は2本の支柱で2本の丸棒を高さを変えて支持したものであり、棒にはそれぞれスライドプリーが取り付けられている。そして、プリーに据付ケーソン模型から伸びたワイヤを通し、ワイヤの先端に重錘を取り付けて、引船による引張力を一定となるようモデル化した。このワイヤにもクロスワイヤ、引付けワイヤに用いたばねと同じばねが取り付けられている。重錘の重量は最大2kgf まで変えることが可能であるが、模型実験においては0.1kgf とした。この荷重は実機換算で6.4tf になる。また、据付ケーソンの移動に追従するようにプリーは棒に沿って水平方向に移動でき、ケーソン側面に常に垂直に荷重が作用するようになっている。重錘の最大移動範囲は上下、左右ともに1.0m である。

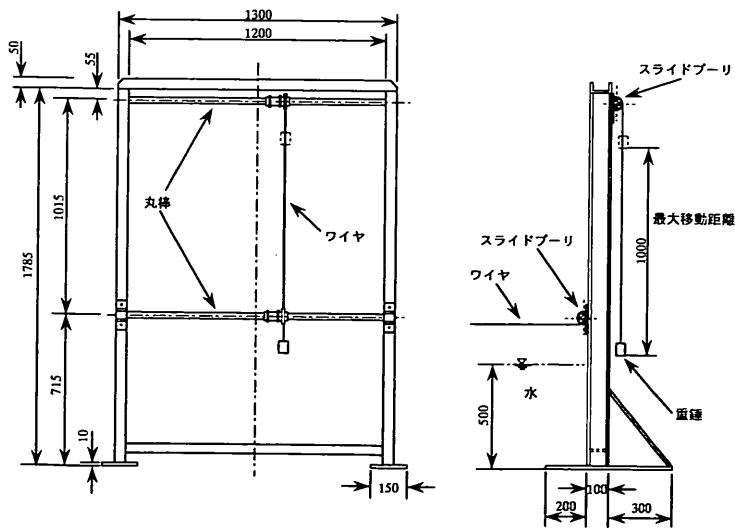


図-9 架台の構造図

## 4.2 データ計測および制御システム

### (1) 概要

図-10は、水理模型実験におけるデータ計測および制御システムと模型の配置の概略図を示す。また、図-11は、データ計測および制御システムのブロック図を示す。データ計測および制御システムにおいては、計測装置によって計測されたデータを A/D 変換装置でデジタル値に変換し、EWS 内でケーソンの位置および動揺の予測計算を実施した後、出力されたウインチの制御信号を D/A 変換装置でアナログ値に変換してウインチに送信し、ウインチの制御を行っている。ここで、計測データは波高、据付ケーソンの位置および動揺量、ワイヤ張力、ワイヤの巻上げ・繰出し量である。また、出力データはウ

インチの制御信号（ワイヤの巻上げ・繰出しの操作命令）である。なお、EWS、A/D・D/A 変換装置は、ウインチ制御装置と同じく平面水槽わきの計測小屋内に設置されている。

水理模型実験における接近作業から設置作業への制御フェイズの移行は、据付ケーソンが既設ケーソンから 5.0cm (2.0m) の位置にきたとき自動的に行われるようにした。また、3.2で説明した作業継続範囲、法線直角方向許容範囲、許容回転角、ケーソン手前側中心点の設置目標範囲は実験開始前に事前に設定しておく必要がある。本模型実験では図-8 (1)および(2)に示したように作業継続範囲は大きく取っており、法線直角方向許容範囲は平均幅1.0cm (0.4m) の細長い区間とした。許

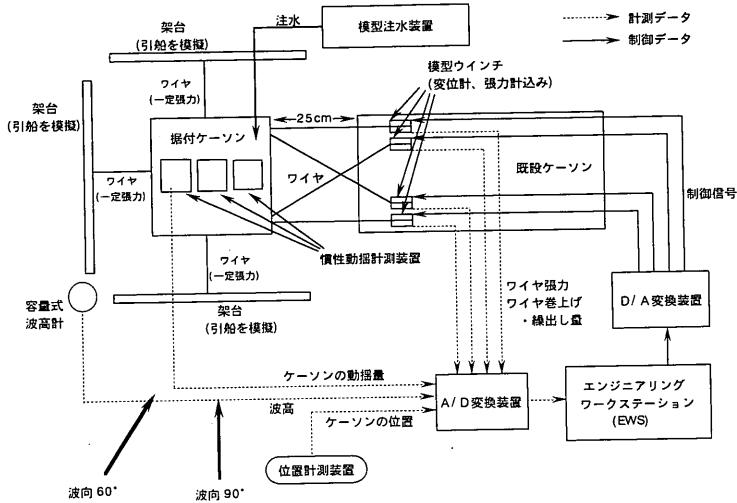


図-10 データ計測・制御システムの概略図

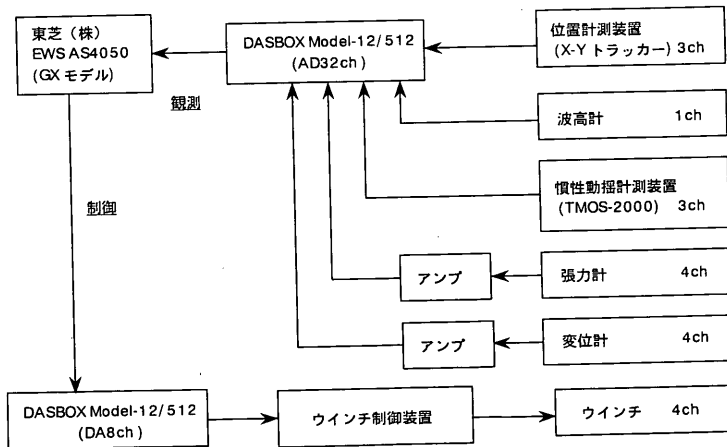


図-11 データ計測・制御システムのブロックチャート

容回転角は $2.0^\circ$ とし、ケーソン手前側中心点の設置目標範囲は縦 $1.0\text{cm}$ 、横 $2.0\text{cm}$ の矩形範囲とした。この設置目標範囲は実機換算すると縦 $0.4\text{m}$ 、横 $0.8\text{m}$ であることから、ケーソンの設置誤差の許容範囲は $0.4\text{m}$ となる。

### (2) ケーソンの動揺成分および座標系

図-12は、模型実験における据付ケーソンの動揺成分、座標系およびワイヤの配置状態を示す。据付ケーソンの動揺の回転運動成分（ロール、ピッチ、ヨウ）はケーソンの重心点に関して計測する。また、動揺の並進運動成分（サージ、スウェイ、ヒーブ）は絶対座標系で計測しており、図のように既設ケーソン端辺の中心を原点とし、模型実験で用いた計器の極性に合わせて  $X$  座標、 $Y$  座標および  $Z$  座標を設定している。

据付ケーソンの動揺6成分の計測には、位置計測装置（ $X - Y$  トラッカー C3162、浜松ホトニクス(株)製）と慣性動揺計測装置（TMOS - 2000、(株)トキメック製）<sup>10)</sup> <sup>11)</sup> を使用した。位置計測装置はケーソンの位置計測を行う装置であり、ケーソンの動揺6成分のうちサージ、スウェイ、ヒーブを計測する。一方、慣性動揺計測装置はケーソンの動揺計測を行う装置であり、ケーソンの動揺6成分のうちロール、ピッチ、ヨウを計測する。

図中に示したワイヤ1～4は、それぞれウインチ1～4により巻き上げ・繰出し制御が行われるワイヤを表している。ワイヤ1およびワイヤ2は接近フェイズにおけるケーソンの引付けおよび回転の制御に用いられ、また、ワイヤ3およびワイヤ4は設置フェイズにおけるケーソンのスウェイ方向（法線直角方向）の位置制御に用いられる。

### (3) A/D・D/A変換装置

A/D・D/A変換装置は DASBOX Model-12/512 (A/D 32ch, D/A 8ch, システムデザインサービス(株)製) を使用した。この装置は EWS からコマンドを発信することでデータの取り込み、送り出しが行えるため、EWS 内に搭載される制御プログラムに組み込み易く、容易にシステムを構築できる特徴がある。データの計測は自動設

置システムが稼働している間、自動的に行われ、各データファイルとして EWS のハードディスクに記録される。保存される計測データは、波高、ケーソンの位置および動揺量（動揺6成分）、ケーソン重心点加速度、ケーソン重心点角速度、ワイヤの張力、ウインチの制御信号、ワイヤの巻き上げ・繰出し量、およびデータのサンプリング周期（約 $0.45 \sim 0.48\text{s}$ ）である。

### (4) 慣性動揺計測装置

慣性動揺計測装置は据付ケーソン上に取り付けられており、ケーソンの動揺角（ロール、ピッチ、ヨウ）以外にケーソンの重心点3軸方向の加速度、3軸まわりの角速度を計測することができる。据付ケーソンの位置および動揺量の予測計算には、これらのデータうちケーソンの動揺角のみが使用される。

慣性動揺計測装置はセンサユニット、演算ユニット、磁気方位センサから構成され、センサユニット内には振動ジャイロおよび加速度計がそれぞれ3個づつ組み込まれている。そして、磁気方位センサによりケーソンの方位角が、振動ジャイロによりケーソンの動揺の回転角および角速度が、また加速度計により3軸方向の加速度が検出される。なお、加速度データを積分することによりケーソンの3軸方向の変位量（サージ、スウェイ、ヒーブ）を得ることも可能であるが、計算誤差が大きくなる可能性を考慮して、本模型実験では位置計測装置を使用してこれらの値を計測している。

### (5) 位置計測装置

位置計測装置は移動物体に取り付けられた豆電球の光の動きを CCD カメラで追跡し、その軌跡を計測する機器である。CCD カメラで捕らえられた光の点がモニター上に映し出され、移動した画素数を自動的にカウントし、計測前に校正したモニターの1画素分の長さを用いて物体の移動距離が換算される。

位置計測装置は、基本的には二次元平面内の物体の移動を計測する装置であるが、CCD カメラを2台使用することで三次元的な物体の挙動が計測可能である。模型実験においてはケーソン重心点の3軸方向の動揺を測定するために CCD カメラを2台用いている。1台はケーソンの水平平面（ $X - Y$  平面）での位置を計測するため、平面水槽上の天井に取り付けた。また、もう1台はケーソンの鉛直平面（ $X - Z$  平面）上の位置を計測するため、水槽底に立てた三脚上に設置した。追跡する豆電球はケーソン上の慣性動揺計測装置の上に取り付けた。求めたいのはケーソンの重心点の位置変化（サージ、スウェイ、ヒーブ）なので、ケーソン上の位置計測点での計測値を重心点での計測値に変換し、同時に位置計測に

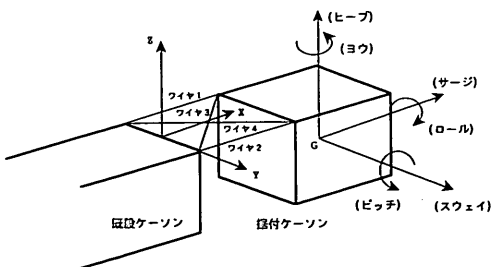


図-12 ケーソンの動揺6成分および座標系

おける回転成分（ロール、ピッチ、ヨウ）の影響を除去するといった処理を EWS 内で行っている。なお、位置計測装置は光点を追跡するシステムであるため、周囲が明るいとうまく目標が追跡できない。よって、実験中は電灯を消し周囲を暗くして計測を行った。

(6) 波高計

容量式波高計はケーソンの動揺に伴う散乱波の影響を受けず、かつ、なるべくケーソンの近傍に設置しており、3.3で述べた手法で計測した波高をケーソン重心点における波高に換算している。

(7) ウインチ模型

ウインチ模型は既設ケーソン上に4台設置され、それぞれ引付けワイヤおよびクロスワイヤの巻上げ・繰出しを行う。先に示したようにウインチ模型には張力計および変位計が組み込まれており、ワイヤの張力およびワイヤの巻上げ・繰出し量が測定可能となっている。

ケーソンの位置および動揺の制御を行うためのウインチの動作は、ワイヤの巻上げ、ワイヤの繰出し、停止、ワイヤのたるみ巻上げの4種類である。よって、EWSから出力されるウインチの制御信号も、それぞれのウインチの動作に対応して4種類あり、0が停止、1が巻上げ、-1が繰出し、そして2がたるみ巻上げとなっている。ここで、ワイヤのたるみ巻上げとは、ウインチが繰出し操作命令を受けてもワイヤがたるんでいるとワイヤは繰出されないため、ワイヤに一定張力がかかる状態までワイヤのたるみを巻取る機能である。ただし、ウインチ1およびウインチ2は基本動作が巻上げであるため、たるみ巻上げ機能は導入していない。EWSから上記の4種類の制御信号のいずれかが出力されれば、その信号に対応した制御動作を各ウインチが実行し、ケーソンの位置および動揺の制御が行われる。

4.3 実験ケースおよび実験状況

水理模型実験は静水中、不規則波中で実施した。模型実験では、図-10に示すように据付ケーソンと既設ケーソン間の初期距離はすべてのケースにおいて25.0cm (10.0m)とした。また、不規則波中実験における波向は、ケーソンに真横から入射する場合を波向90°とし、斜め後方から入射する場合を波向60°とした。ただし、本実験で用いた造波機では斜波を発生させられないため、造波板に対して60°の角度になるように模型を再配置し、波向60°の場合の模型実験を実行した。なお、水理模型実験は規則波中에서도行っており、不規則波中と同様に規則波中においても、ケーソンを目標位置に設置できることが確認されている。しかし、本報告では、より現地の

波浪条件を再現できていると考えられる不規則波中での実験結果にしぼって報告する。

水理模型実験では本システムの制御アルゴリズムの有効性の検証のため、実験終了時に据付ケーソンと既設ケーソンとのずれ（設置誤差）をスケールにより測定した。すなわち、本システムを用いたときのケーソンの設置誤差が、現在のケーソン据付作業におけるケーソンの設置誤差と比較して同じくらいかあるいは小さければ、現在のケーソン据付手法に代えて本システムによりケーソン据付作業が行えることが実験的に実証できる。

(1) 静水中実験ケース

静水中における実験ケースを表-3に示す。静水中実験は据付ケーソンの初期位置、初期回転角をそれぞれ3種類変え、合計9ケースについて行った。初期位置において、法線外側ずれとは既設ケーソン中心軸延長上にケーソンの重心点があるケース、法線外側ずれとは港外側にケーソンの重心点があるケース、法線内側ずれとは港内側にケーソンの重心点があるケースである。ここで、初期位置のずれは+3.2cm (1.28m)あるいは-3.2cm (-1.28m)とした。また、初期回転角10°とはケーソンにヨウが10°生じていることを表している。なお、位置のずれおよび回転角の符号は図-12に示した方向が正である。

(2) 不規則波中実験ケース

不規則波中における実験ケースを表-4に示す。不規

表-3 実験ケース（静水中実験）

初期位置	初期回転角 (°)
法線外側ずれ (-3.2cm)	+10、0、-10
法線上 (0.0cm)	
法線内側ずれ (+3.2cm)	

(注) 数値は模型値である。

表-4 実験ケース（不規則波中実験）

波向 (°)	有義波高 (cm)	有義波周期 (s)
90	1.25 (50.0)	0.95, 1.27, 1.58, 1.90 ( 6, 8, 10, 12 )
	2.50 (100.0)	0.95, 1.27, 1.58, 1.90 ( 6, 8, 10, 12 )
	3.75 (150.0)	0.95, 1.27 ( 6, 8 )
60	1.25 (50.0)	0.95, 1.27, 1.58, 1.90 ( 6, 8, 10, 12 )
	2.50 (100.0)	0.95, 1.27, 1.58, 1.90 ( 6, 8, 10, 12 )
	3.75 (150.0)	0.95, 1.27 ( 6, 8 )

(注) 数値は模型値であり、( ) 内は実機換算値を示す。

則波中実験では波向90°および波向60°の2種類の波向に対して有義波高を1.25cm (0.5m), 2.5cm (1.0m), 3.75cm (1.5m) の3種類, また有義波周期を0.95s (6.0s) ~1.90s (12.0s) までの最大4種類変化させ、波向、有義波高および有義波周期の影響を評価した。不規則波中実験においては再現性の確認のため、同じケースを2回行っている。また、実験開始前の据付ケーソンの初期状態は、静水中実験ケースでの初期位置が法線にかつ初期回転角0°とした。なお、不規則波の生成にはプレットシュナイダー・光易型の波浪スペクトルを用いた。

なお、波高3.75cm (1.5m) に対して、波周期1.58s (10.0s) 以上のケースはケーソンの動揺が大きくなりすぎるため、ケーソンの据付作業が困難であると判断し実験ケースから除外した。図-1にも示したように、現実の据付作業においても、このような高波高、長周期の

波浪状況下ではケーソンの据付が困難である。

### (3) 水理模型実験の状況

写真-7および写真-8は波浪実験中の様子であり、それぞれ据付作業中および据付作業後の据付ケーソン模型とウインチ模型の状況を示している。本システムを用いることにより、据付ケーソンは最終的に写真-8に示されているような状態に設置される。

据付ケーソン上の3つの箱の中には慣性動揺計測装置のセンサユニット、演算ユニットおよび磁気方位センサが内蔵されており、ケーソンの動揺の回転成分（ロール、ピッチ、ヨウ）を検出する。これらの装置の全体重量は約3kgであり、据付ケーソン模型の重量98.4kgに比して約3%と小さく、ケーソンの動揺へはほとんど影響しない。一番左の箱の上に取り付けられた豆電球は、位置計測装置によるケーソンの位置計測の追跡点として使用

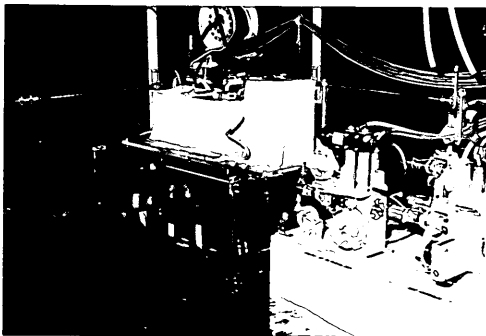


写真-7 据付作業時のケーソン模型とウインチ模型  
(不規則波中実験)



写真-8 据付作業終了後のケーソン模型とウインチ模型  
(不規則波中実験)



される。なお、中央の箱上の電池ボックスは豆電球の電源である。

## 5. 水理模型実験結果

本章では水理模型実験の結果を述べる。まず、5.1では、静水中および不規則波中におけるウインチへの制御信号出力結果について調べ、波浪条件が本システムの制御に及ぼす影響について述べる。次に、5.2では、据付作業中のケーソンの重心点の軌跡について調べ、波浪条件の差によってケーソンが設置目標位置に到達するまでの状況の差異について述べる。5.3では、据付作業中のケーソンの動揺の時刻歴について調べ、波浪条件および喫水変化による動揺特性の変化について述べる。5.4では、ウインチの制御信号およびワイヤ張力等のウインチデータの時刻歴を示し、ケーソンが設置目標位置に到達するまでの制御状況、ワイヤ張力の変化等について示す。5.5では、据付作業中のケーソンの最大動揺量を調べることによって、波浪条件とケーソンの動揺量の関係を明らかにする。最後に、5.6において、据付終了時のケーソンの設置誤差を調べ、有義波高、有義波周期による本システムの有効性の範囲について検討する。

なお、以下の説明中に、短周期波、長周期波という用語が頻出する。本報告では、有義波周期0.95s (6.0s)、1.27s (8.0s)の波浪を短周期波、また、有義波周期1.58s (10.0s)、1.90s (12.0s)のうねり性の波浪を長周期波と呼称する。したがって、近年、漂砂による海浜変形や船舶の長周期動揺の原因として注目されている周期数分の波浪成分を指しているわけではないことに注意を要する。

### 5.1 制御信号出力結果

#### (1) 概要

すべての実験ケースにおいて EWS からウインチへの制御信号出力を時系列データとして計測しており、この制御信号を解析することでケーソンの位置制御がどのように行われたかを知ることができる。制御信号の時刻歴に関する考察は5.4で行うものとし、ここでは制御信号の出力回数に注目して分析する。

制御信号出力回数は単位タイムステップごとに出力されるワイヤの巻上げあるいは繰出しの命令をカウントしたもので、ウインチ停止およびワイヤのたるみ巻上げの命令はカウントしていない。ここで、引付け位置制御信号とは、ケーソンの引付けおよび回転の制御を行うウインチ1およびウインチ2への指令信号を示している。ま

た、法線直角方向位置制御信号とは、ケーソンのスウェイ方向の位置制御を行うウインチ3およびウインチ4への指令信号を示している。

#### (2) 静水中実験の制御信号出力回数

図-13(1)は静水中実験における制御信号出力回数の総数を示す。この図より初期位置のずれがあり、かつ初期回転角のあるケースは全制御信号出力回数が多くなっていることがわかる。これは、初期回転角のない場合と比較して、ケーソンの回転の制御の分だけ制御信号出力が増えているからである。

初期位置が法線上かつ初期回転角0°のケースは、実際には信号出力回数が最も少ないはずであるが、初期位置が法線上かつ初期回転角があるケースとほぼ同じ信号出力回数を示している。この原因は、ケーソンの位置を初期に設定した時のワイヤの張力のアンバランスにより、実験開始直後にケーソンが初期設定位置に対してずれてしまったためであると考えられる。このケースを除いた全体の傾向を考えると、初期回転角があるケースほど信号出力回数が多くなり、その反対のケースでは信号出力回数が少なくなるということが言える。

図-13(2)および図-13(3)は、それぞれ全制御信号出力回数に対する引付け位置制御信号の割合および法線直角方向位置制御信号の割合を示す。引付け位置制御信号の割合と法線直角方向位置制御信号の割合の和は1.0となる。

これらの図より初期位置が法線上かつ初期回転角0°のケースを除き、引付け位置制御信号の割合はおおむね0.8~0.9の範囲内にあることがわかる。つまり全位置制御のうち、約8~9割がケーソンの引付けおよび回転の制御を行っているのである。このことは、逆に言えば全位置制御のうち約1~2割がケーソンの法線直角方向位置制御であることを意味する。法線直角方向位置制御信号の割合が小さい原因は、前述したように据付ケーソンが既設ケーソンから5.0cm (2.0m)の位置にきたとき接近作業から設置作業に移行し、その時点ではじめてウインチ3およびウインチ4による法線直角方向の位置制御が開始されるためである。据付ケーソンと既設ケーソン間の初期距離25.0cm (10.0m)に対して、この5.0cm (2.0m)という距離は割合にして2割であり、全制御信号に対する法線直角方向位置制御信号の割合とおおむね一致している。

#### (3) 不規則波中実験の制御信号出力回数

図-14(1)は波向90°および60°で有義波高2.5cm (1.0m)の不規則波中実験における制御信号出力回数の総数を有義波周期に対して示したものである。図の縦軸は制

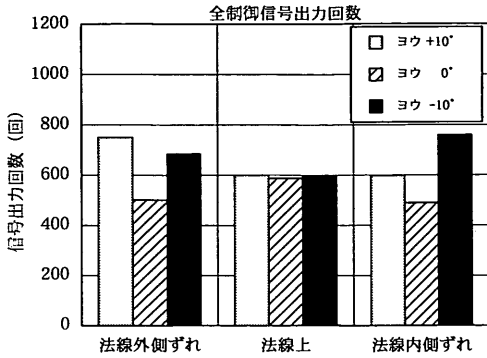


図-13(1) 制御信号出力回数の総数（静水中実験）

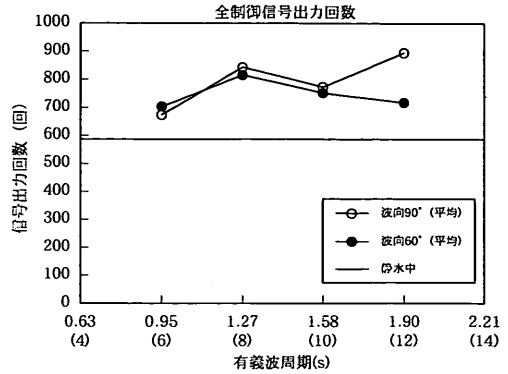


図-14(1) 制御信号出力回数の総数（不規則波中実験）

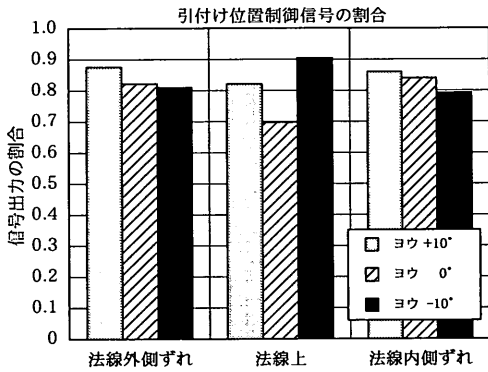


図-13(2) 引付け位置制御信号の割合（静水中実験）

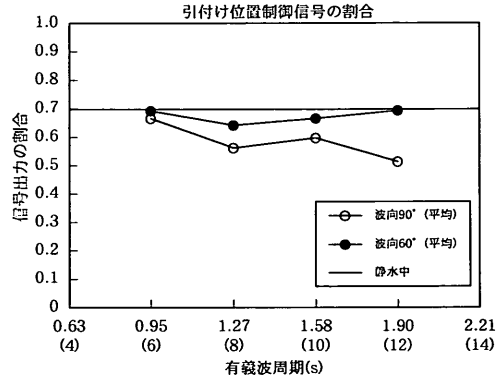


図-14(2) 引付け位置制御信号の割合（不規則波中実験）

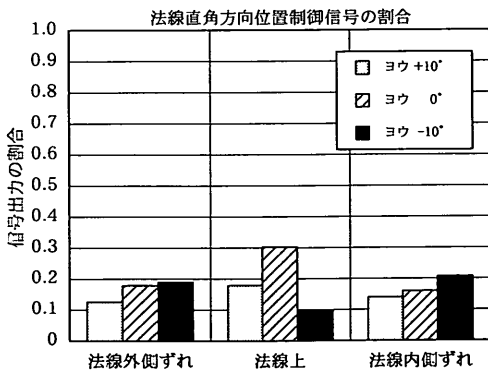


図-13(3) 法線直角方向位置制御信号の割合（静水中実験）

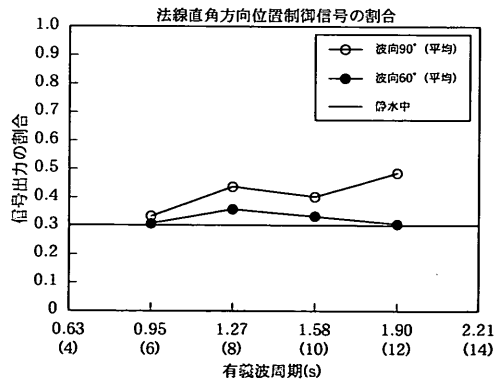


図-14(3) 法線直角方向位置制御信号の割合（不規則波中実験）

御信号出力回数を表し、横軸は水理模型実験における有義波周期を表している。不規則波中実験は全ケースについて2回実施しているため、図中には2回の実験結果の平均値を載せている。なお、図中の（ ）内の数値は実験換算値を示す。また、図には静水中実験のうち、初期

位置が法線上かつ初期回転角0°のケースの制御信号出力回数も載せている。

この図から有義波周期1.90s (12.0s) の場合を除き、波向に関わらず信号出力回数は変わらないことがわかる。すなわち、制御信号出力回数の総数は波向にあまり影響

されないといえる。ここで、有義波周期1.90s (12.0s) のときには、波向90°の場合は波向60°の場合よりも信号出力回数が多い。この理由としては、波向90°においては波向60°のときよりも長周期波浪の影響をより受けやすく、ケーソンの動揺（特にスウェイ、ロール）が大きかったことが挙げられる。また、どちらの波向においても有義波周期1.27s (8.0s) のときに信号出力回数がピークを示している。ケーソンの動揺が大きくなるとケーソンの位置制御信号出力回数も増加することから、おそらく有義波周期1.27s (8.0s) 付近にケーソンの固有振動周期があるものと考えられる。さらに、静水中実験における信号出力回数よりも、すべての有義波周期において不規則波中実験での信号出力回数が多くなっている。これは不規則波中実験では波浪によりケーソンが動揺するため、静水中実験と比較してケーソンの位置および回転角が法線直角方向許容範囲あるいは許容回転角を超える場合が多くなるからである。

図-14(2)および図-14(3)は、それぞれ全制御信号出力回数に対する引付け位置制御信号の割合および法線直角方向位置制御信号の割合を有義波周期に対して示したものである。これらの図から引付け位置制御信号の割合は、波向90°の場合が波向60°の場合より小さいことがわかる。これは逆に言えば、法線直角方向位置制御信号の割合が波向90°の場合が波向60°の場合より大きいことを表している。その理由は、波向90°はケーソンのスウェイがより大きくなる波向であるため、波向60°の場合より法線直角方向の位置制御を多くする必要があるからである。また波向60°においては波向90°の場合に比較してケーソンのヨウがより発生しやすくなるため、引付け位置制御の割合が多くなるものと考えられる。

## 5.2 ケーソンの重心点の軌跡

### (1) 概要

ケーソンの据付作業中には、ケーソンの位置および動揺が EWS のディスプレイ上にリアルタイムに表示され、また同時にケーソンの重心点の軌跡も表示される。ここではケーソン据付作業終了後のディスプレイ画面のハードコピーを取っているため、その図を用いてケーソン重心点の軌跡について考察する。

図-15(1)～(4)は有義波高2.5cm (1.0m) の不規則波中実験におけるケーソンの重心点の軌跡を示している。このうち、図-15(1)～(2)は波向90°で有義波周期0.95s (6.0s) および1.90s (12.0s) のケースを、また図-15(3)～(4)は波向60°で有義波周期0.95s (6.0s) および1.90s (12.0s) のケースを図示したものである。不規則

波中実験は各ケースとも2回試行しているが、ここではそのうちの1回の実験結果を示している。なお、注水が進むにつれてケーソンの喫水量が変化してケーソンの重心高さが変わるため、便宜上、ケーソンの重心はケーソン全長の1/2、型幅の1/2、型深の1/2の位置にあるものとした。

### (2) 波周期に関する考察

図-15(1)および図-15(2)を比較してみると、有義波周期0.95s (6.0s) では（以下、短周期波中と表記）ケーソンの動揺は小さく、有義波周期1.90s (12.0s) では（以下、長周期波中と表記）、ケーソンの動揺のうち特にスウェイとヒープが大きくなるのがわかる。また波向60°に関する図-15(3)および図-15(4)の比較からも同様なことが言える。

短周期波中では波漂流力によりケーソンが少し波下側に漂流する（以下、この現象をドリフトと表記）が、スウェイはあまり大きくなく、ヒープもほとんど発生していない。図-15(1)および図-15(3)をみると、先に述べたように、据付ケーソンが既設ケーソンに5.0cm (2.0m) まで接近したときスウェイ方向の位置修正が行われて法線上にケーソン重心点が移動しており、位置制御が正しく機能していることがわかる。また、最終的には目標としたケーソン設置位置にケーソンを据付けることができています。以上のように、短周期波中では波漂流力の影響によるケーソンのドリフトが長周期波中に比べ大きいですが、ケーソンの動揺量自体はさほど大きくないためケーソンの据付を安定して行うことができる。

これに対し長周期波中では、図-15(2)および図-15(4)から、ケーソンの動揺量が大きく、短周期波中と比較すればケーソンの据付を安定して行うことは難しいと言える。図-1で示したように現在のケーソン据付作業における限界波浪条件は、実機値で有義波高0.8m、有義波周期9.0s であるから、今考察している有義波高2.5cm (1.0m)、有義波周期1.90s (12.0s) のケースにおいて、ケーソンの据付を安定的に実施することが困難であることは理解できる。

また、ケーソンへ注水を進めていくとヒープの動揺が低減していくのに対し、スウェイの動揺に関しては注水が進んでもあまり低減が見られない。これは、ケーソン手前側中心点が設置目標範囲内に到達しても、ケーソンがまだ十分な重量を持って着底していないことを表している。本実験では注水速度を一定としているが、実際の据付工事においてはケーソンの着底前に注水速度を上げるため、この注水状況を再現すれば着底前のスウェイの動揺を抑えることは可能であると考えられる。

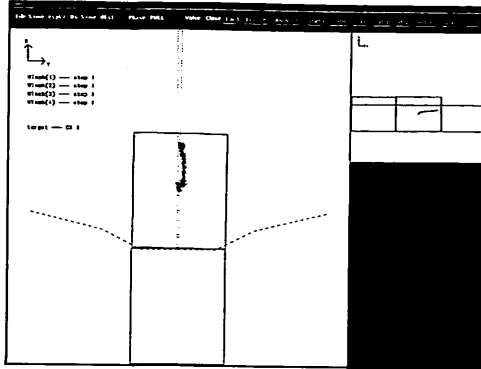


図-15(1) ケーソンの重心点の軌跡 (不規則波中)  
(有義波周期0.95s(6.0s),有義波高2.5cm(1.0m), 波向90°)

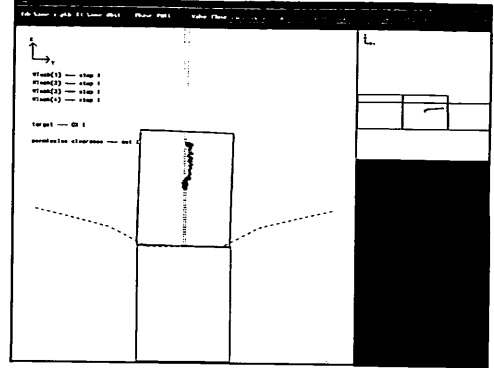


図-15(3) ケーソンの重心点の軌跡 (不規則波中)  
(有義波周期0.95s(6.0s),有義波高2.5cm(1.0m), 波向60°)

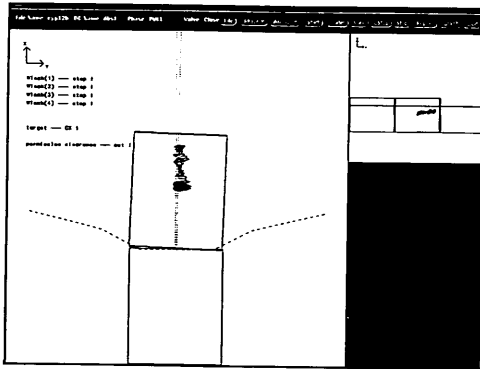


図-15(2) ケーソンの重心点の軌跡 (不規則波中)  
(有義波周期1.90s(12.0s),有義波高2.5cm(1.0m), 波向90°)

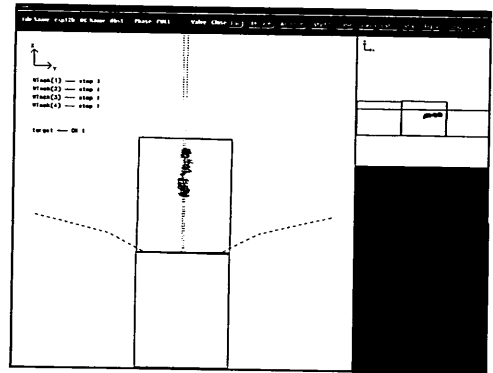


図-15(4) ケーソンの重心点の軌跡 (不規則波中)  
(有義波周期1.90s(12.0s),有義波高2.5cm(1.0m), 波向60°)

### (3) 波向に関する考察

図-15(1)および図-15(3)を比較すると、短周期波中では波向に対してあまり顕著な差異がみられない。しかし、図-15(2)および図-15(4)の比較より、長周期波中では波向60°の場合と比べ波向90°の方がスウェイが大きくなる傾向にあることがわかる。これは、波向90°においてはスウェイの動揺に大きく影響しやすいケーソンの真横から波が作用するのに対して、波向60°においてはケーソンの斜め後方から波が作用するため、スウェイに対する波力が小さいことによる。このように、長周期波中においては波向90°の場合は波向60°の場合に比較してケーソンのスウェイの動揺量が大きいので、波向90°の長周期波中においては安定した状態でケーソンの据付を実施することがより難しいと言える。

ここで示したケースでは、波向90°の場合がより現実

的な防波堤の据付状況に近いと考えられるため、この波向の長周期波側においても、より効率的なケーソンの据付を実施するためには、スウェイの動揺を低減させる必要性が生じてくる。引船方式の場合においては、ウインチの位置制御のみでケーソンの動揺を低減させることはワイヤの配置状態やウインチの能力から判断しても難しいことから、引船による制御を強化することが最も簡単かつ効果的にスウェイの動揺を抑制できる方法と考えられる。

### 5.3 ケーソンの動揺の時刻歴

#### (1) サージ、スウェイ、ヒープの時刻歴

図-16(1)~(4)は有義波高2.5cm(1.0m)の不規則波中実験におけるケーソンが着底するまでの動揺の時刻歴を示したものである。これらの図には、ケーソンの6

つの動揺成分のうち、並進運動成分であるサージ、スウェイ、ヒープの3成分を上、中、下段の順に図示している。図-16(1)~(2)は波向90°で有義波周期0.95s (6.0s) および1.90s (12.0s) のケースを、また図-16(3)~(4)は波向60°で有義波周期0.95s (6.0s) および1.90s (12.0s) のケースをそれぞれ示す。図の縦軸および横軸は模型値で表しており、それぞれ各成分の動揺量と経過時間を表している。

これらの図は前出のケーソンの重心点の軌跡の図である図-15(1)~(4)にそれぞれ対応している。なお、図の座標は図-12で示した絶対座標系を用いているため、サージとヒープの動揺量に関してはそれぞれ X 軸および Z 軸方向のケーソンの重心点の絶対位置の変動を示したものとなっている。また、以下の論文に示す動揺振幅とは、絶対座標系におけるサージ、スウェイ、ヒープの動揺量をケーソン重心点における動揺量に変換したときの動揺の片振幅を表すものとする。

#### a) サージ

図-16(1)~(4)の上段に示したサージの時刻歴について考察する。サージは最初の約60s 間ほとんど変わらず一定であるが、これは初期造波時における波浪の過渡現象を除去するために平面水槽内の波浪場の状態が定常となるのを見計らい、実験開始後約60s 経過してケーソンの位置制御を開始しているからである。実験開始後約60s 以降はサージは徐々に減少していく。これは、据付ケーソンがウインチにより少しずつ引付けられ、既設ケーソンに接近していくことを表している。最終的にサージは約31~32cm (12.4~12.8m) の一定値を示しており、このとき据付ケーソンは既設ケーソンに接触している。また、サージの動揺振幅に関しては、短周期波中と長周期波中においてあまり違いが見られない。

#### b) スウェイ

図-16(1)~(4)の中段に示したスウェイの時刻歴について考察する。スウェイに関しては短周期波中と長周期波中の動揺量に大きな相違が見られる。短周期波中ではスウェイの動揺振幅はあまり大きくないが波漂流力によるドリフトが発生している。その反対に、長周期波中ではスウェイの動揺振幅が大きくドリフトはあまり観察されない。

先に述べたようにスウェイ方向の位置制御は既設ケーソンに据付ケーソンが5.0cm (2.0m) まで近づいたとき開始されるため、それまでは短周期波中におけるスウェイのドリフト成分は除去されない。しかし、スウェイ方向の位置制御が始まれば短周期波中におけるスウェイの動揺量はほぼゼロに近づいてきて、効果的にケーソン

の位置制御が行われていることがわかる。一方、長周期波中ではスウェイの動揺振幅が大きく、スウェイ方向の位置制御を開始した直後にスウェイの動揺をうまく制御することは難しい。しかしながら、短周期波中の場合より時間をかけることで、最終的にはスウェイの動揺をおおむねゼロにすることができる。

また、波向に関して見てみると、長周期波中では波向60°の場合と比べて波向90°の方がスウェイの動揺振幅が大きくなる傾向にある。これは、先にも示したように、波向90°の場合はスウェイの動揺に大きく影響しやすいケーソンの真横側に波力が作用するためである。

#### c) ヒープ

図-16(1)~(4)の下段に示したヒープの時刻歴について考察する。これらの図より、実験開始後約60s 経過すると、サージと同様にヒープは徐々に減少していくことがわかる。これは、注水が進んでいくにつれて、ケーソンの喫水が増加していることを表している。また、最終的にヒープは約-24cm (-9.6m) の一定値を示しており、これはケーソンとマウンド間のアンダーキールクリアランスがゼロになったことを意味している。

動揺振幅に関しては、ヒープはスウェイと同様に短周期波中では動揺振幅が小さく、長周期波中では動揺振幅が大きくなる傾向にあると言える。注水を進めていくにつれて、ヒープの動揺振幅は徐々に減少していく傾向がみられるが、これはケーソンの喫水量が増し、アンダーキールクリアランスが小さくなるほどヒープの動揺振幅が低減することを意味している。このような現象は、ケーソン据付中の動揺の現地観測においても報告されている<sup>7), 12)</sup>。

一方、図-16(2)および図-16(4)の長周期波中における400s 以降のスウェイとヒープの動揺振幅を比較すれば、ヒープの動揺振幅の減少の度合いに比較して、スウェイの動揺振幅は注水を進めてもあまり小さくならないことがわかる。これは、5.2でも述べたようにヒープの動揺はアンダーキールクリアランスがおおむねゼロの状態になればほぼ収まるが、スウェイの動揺はケーソンが十分な重量を持ってマウンド上に着底しなければ低減しないことが原因であると考えられる。

#### (2) ロール、ピッチ、ヨウの時刻歴

図-17(1)~(2)は波向90°、有義波高2.5cm (1.0m) の不規則波中実験におけるケーソンが着底するまでの動揺の時刻歴を示したものである。これらの図には、ケーソンの6つの動揺成分のうち、回転運動成分であるロール、ピッチ、ヨウの3成分を上、中、下段の順に図示している。図-17(1)および図-17(2)はそれぞれ有義波周

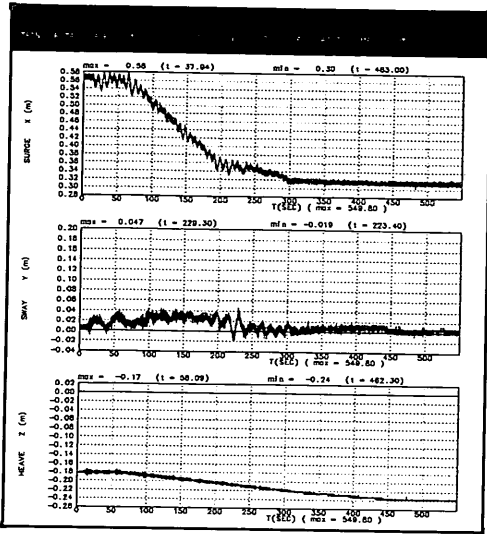


図-16(1) サージ, スウェイ, ヒープの時刻歴(不規則波中)  
(有義波周期0.95s(6.0s),有義波高2.5cm(1.0m), 波向90°)

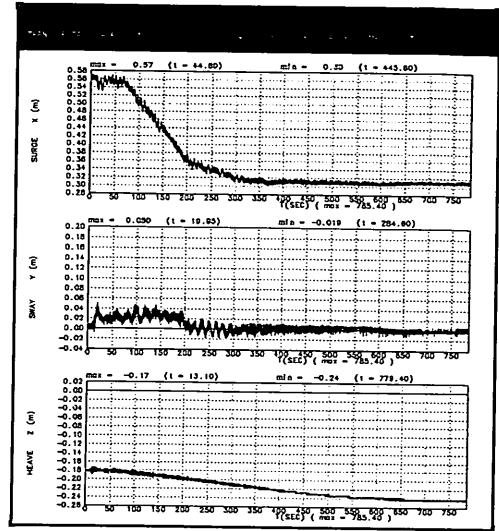


図-16(3) サージ, スウェイ, ヒープの時刻歴(不規則波中)  
(有義波周期0.95s(6.0s),有義波高2.5cm(1.0m), 波向60°)

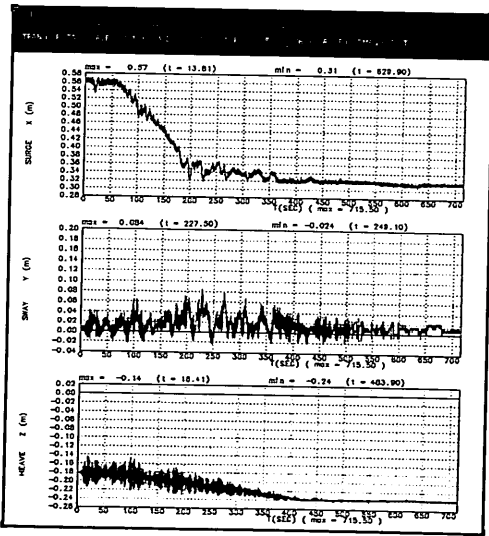


図-16(2) サージ, スウェイ, ヒープの時刻歴(不規則波中)  
(有義波周期1.90s(12.0s),有義波高2.5cm(1.0m), 波向90°)

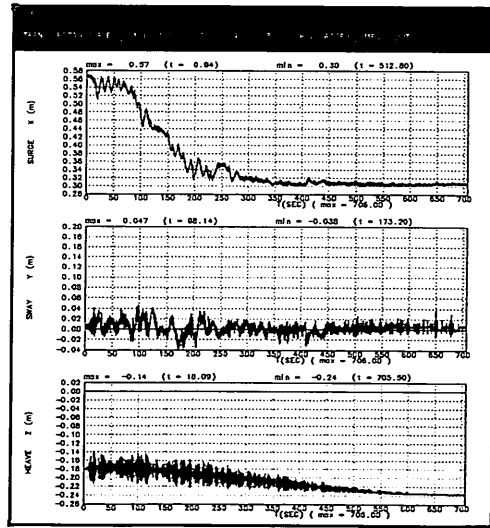


図-16(4) サージ, スウェイ, ヒープの時刻歴(不規則波中)  
(有義波周期1.90s(12.0s),有義波高2.5cm(1.0m), 波向60°)

期0.95s (6.0s) および1.90s (12.0s) のケースを示している。図の縦軸および横軸は模型値で表しており、それぞれ各成分の動揺量と経過時間を表している。

a) ロール

図-17(1)~(2)の上段に示したロールの時刻歴について考察する。これらの図より、ロールの動揺振幅は図-

16(1)~(2)で示したスウェイと同様に、短周期波中に比べ長周期波中で大きいことがわかる。これはロールとスウェイが互いに連成していることが要因の一つであると考えられる。

3.2で述べたように本システムの制御アルゴリズムでは、スウェイに対する制御を行うことは可能であるが、

ロールに対しては制御することができない。したがって、長周期波中におけるケーソンのロールの動揺を低減させるためには、引船による制御を強化する、あるいはケーソン自体に減揺装置を付加してロールを起こしにくいようにするなどの対策が必要である。

b) ピッチ

図-17(1)~(2)の中段に示したピッチの時刻歴について考察する。これらの図より、ピッチに関しては短周期波中の動揺振幅と長周期波中の動揺振幅の大きさは、ほとんど同じであることがわかる。また、長周期波中においては、ピッチの動揺振幅はロールの動揺振幅の約1/4とかなり小さい値を示している。

ピッチの動揺振幅が小さい理由は、波向90°においてはケーソンの真横側に波浪が作用するため、ピッチの動揺に対して波浪がほとんど影響しないからである。3.2で述べたとおり、ピッチに関してもロールの場合と同じく動揺制御が行えないため、法線方向の引船による制御を強化することがケーソンの動揺低減に効果的であると考えられる。

c) ヨウ

図-17(1)~(2)の下段に示したヨウの時刻歴について考察する。これらの図を見ると、ヨウに関しては短周期波中では動揺振幅が小さく、長周期波中では動揺振幅が大きいことがわかる。また、ヨウの時刻歴波形と図-16(1)~(2)の中段に示したスウェイの時刻歴波形を比較してみると、スウェイとよく似た傾向でヨウの波形が推移しているのがわかる。この理由は、ロールとスウェイが互いに連成しているのと同様に、ヨウとスウェイも互いに連成しており、スウェイの動揺がヨウの動揺に影響しているからであると考えられる。

5.4 ウインチデータの時刻歴

(1) 概要

模型実験においては、ウインチデータとしてワイヤ張力、ウインチの制御信号、ワイヤの巻上げ・繰出し量を計測している。図-4(1)に示したように、4本のワイヤの中でウインチ2およびウインチ4に対応するワイヤ2およびワイヤ4は、既設ケーソン側から見て据付ケーソンの向かって右側すなわち波下側に取り付けられている。ゆえに、ワイヤ1およびワイヤ3と比較してワイヤ2およびワイヤ4のワイヤ張力が大きくなると考えられる。したがって、ここでは4台のウインチのうちウインチ2およびウインチ4に関する計測データについて考察する。

図-18(1)~(4)は波向90°、有義波高2.5cm(1.0m)

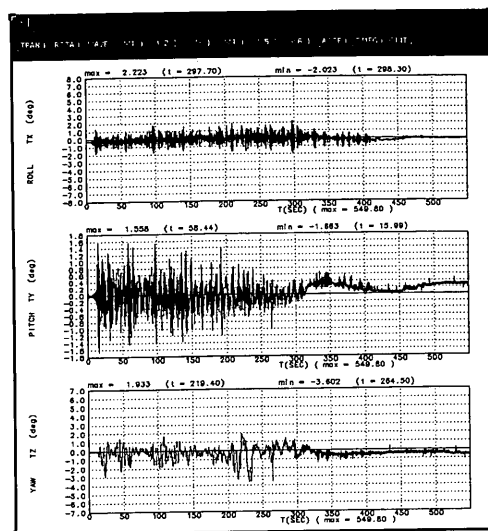


図-17(1) ロール、ピッチ、ヨウの時刻歴(不規則波中)  
(有義波周期0.95s(6.0s),有義波高2.5cm(1.0m),波向90°)

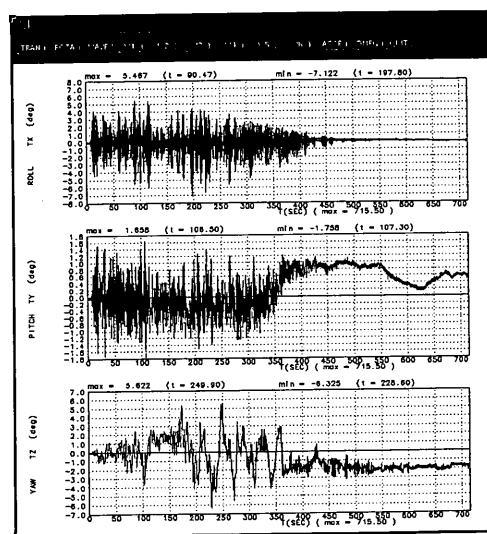


図-17(2) ロール、ピッチ、ヨウの時刻歴(不規則波中)  
(有義波周期1.90s(12.0s),有義波高2.5cm(1.0m),波向90°)

の不規則波中実験におけるケーソンが着底するまでのウインチデータの時刻歴を図示したものである。図-18(1)および図-18(2)は有義波周期0.95s(6.0s)および1.90s(12.0s)のケースのウインチ2の計測データを、また図-18(3)および図-18(4)は有義波周期0.95s(6.0s)および1.90s(12.0s)のケースのウインチ4の計測データをそれぞれ示す。図の縦軸および横軸は模型値で表しており、上、中、下段の順にそれぞれワイヤ張力、

制御信号出力、ワイヤの巻上げ・繰出し量と経過時間との関係を表している。

## (2) ワイヤ張力

図-18(1)～(4)の上段に示したワイヤ張力について考察する。これらの図を見ると、ワイヤの荷重はほとんどパルス的に発生していることがわかる。これは、ケーソンの動揺成分のうち特にスウェイおよびロールの動揺あるいはウインチによるワイヤの巻上げ動作のいずれかの原因により、瞬間的にワイヤが緊張するからである。

また、全体的な傾向として、ワイヤ2は長周期波中より短周期波中の方で、ワイヤ4は短周期波中より長周期波中の方で大きな荷重が発生しており、その回数も多い。ワイヤ2に短周期波中で大きな荷重が発生しているのは実験中のワイヤの状態に原因があり、ワイヤ4がたるんでいたため、ワイヤ4で分担すべき荷重をワイヤ2が支持しているからである。一方、長周期波中の場合は短周期波中の場合の逆であり、ワイヤ2で分担すべき荷重をワイヤ4が支えているからであると考えられる。これは、実験開始前のケーソンの初期位置設定時において、実験ケースごとにワイヤ1～4の初期張力を必ずしも均等にセッティングできていなかったことに原因があると推測される。

ウインチ2に関しては、据付ケーソンが既設ケーソンに接触した後、短周期波中では約350sから、長周期波中では約500sから急激にワイヤ2の荷重が増加し始めていることがわかる。この現象の原因は、ワイヤの据付ケーソン側の接続方法にあると考えられる。つまり、ばねの伸びがウインチの動作に影響を及ぼさないようにワイヤがばねを介して据付ケーソン内側に接続されており、そのばねの取付方向が鉛直方向であるため、注水が進むにつれてワイヤに荷重がかかるからである。実際の据付作業では模型実験と同様なワイヤ接続方法は行わないため、このような現象は起こらないと考えられる。

最終的な荷重増加部分を除いたウインチにかかる最大荷重は、長周期波中においてワイヤ4に発生した約1.4 kgfであり、実機換算すると90tfと非常に大きな荷重となる。実際の現場でのケーソン据付作業においては、このように大きなワイヤ張力に対応するウインチを製作するのは過大投資となる。したがって、ウインチに過大荷重が発生しないようにワイヤの自動リリース（ワイヤの繰出し）機構を導入する、引船の能力を強化して引船に負担させる荷重を増加させるなどの処置が必要となる。

## (3) 制御信号

図-18(1)～(4)の中段に示した制御信号について考察する。前述したようにウインチの制御信号は、0が停止、

1がワイヤの巻上げ、-1がワイヤの繰出し、そして2がワイヤのたるみ巻上げを表しているが、図中においてはそれぞれの制御信号値は整数値ではなく、実数値で示している。これらの図は制御信号出力の時刻歴を明示しているため、ワイヤ巻上げ（信号値1.0）からワイヤ繰出し（信号値-1.0）あるいはワイヤ繰出し（信号値-1.0）からウインチ停止（信号値0.0）などへの信号値の変化も直線で結ばれて示されていることに注意する必要がある。

まず、ウインチ2に関して見ると、経過時間約60sから制御信号が出力され、短周期波中、長周期波中ともにほとんど巻上げ信号かあるいは停止信号を出力していることがわかる。一方、繰出し信号の出力は、長周期波中の方が短周期波中と比べ若干多くなっている。ウインチ1およびウインチ2における繰出し信号は、ケーソンのヨウの制御を行うために出力する信号であるから、長周期波中においては短周期波中に比較してヨウの制御を多く行っていることになる。これは、図-17(1)～(2)で示したヨウの時刻歴において、短周期波中よりも長周期波中の場合にヨウの動揺振幅がより大きいことと一致している。

また、ウインチ4に関して見ると、制御初期はたるみ巻上げ信号の出力が多いが、200s付近からは巻上げ信号および繰出し信号の出力が多くなることがわかる。これは、先に述べたように、経過時間約200sにおいて据付ケーソンが既設ケーソンから5.0cm（2.0m）の位置に接近し、ウインチがケーソンのスウェイ方向制御を開始したことを表している。経過時間200s以前においては、ウインチ4による位置制御は行われなかったため、据付ケーソンが既設ケーソンに接近することによりワイヤ4がたるんでしまうので、たるみ巻上げ信号の出力が多いと考えられる。また、巻上げ信号および繰出し信号の出力が長周期波中で多くなることから、短周期波中より長周期波中の方がスウェイ方向の制御回数が多いこともわかる。これは、図-16(1)～(2)で示したスウェイの時刻歴において、短周期波中よりも長周期波中の場合にスウェイの動揺振幅が大きくなっていることと一致している。

## (4) ワイヤの巻上げ・繰出し量

図-18(1)～(4)の下段に示したワイヤの巻上げ量・繰出し量について考察する。図の縦軸の正方向は巻上げ量を表し、負方向は繰出し量を表している。

まず、ウインチ2に関して見ると、短周期波中で約25.5cm（10.2m）、長周期波中で約23.5cm（9.4m）の最大巻上げ量があることがわかる。ウインチ2の最大巻上げ量は、実際は据付ケーソンと既設ケーソン間の初期



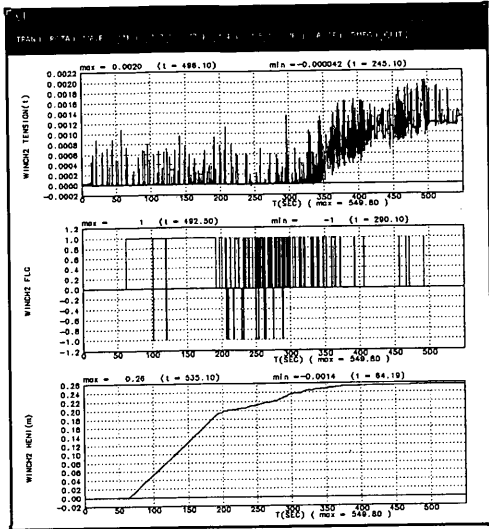


図-18(1) ウインチ2のウインチデータの時刻歴  
(不規則波中)

(有義波周期0.95s(6.0s),有義波高2.5cm(1.0m), 波向90°)

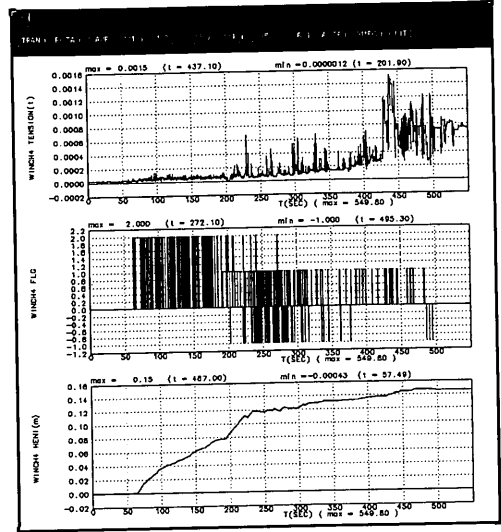


図-18(3) ウインチ4のウインチデータの時刻歴  
(不規則波中)

(有義波周期0.95s(6.0s),有義波高2.5cm(1.0m), 波向90°)

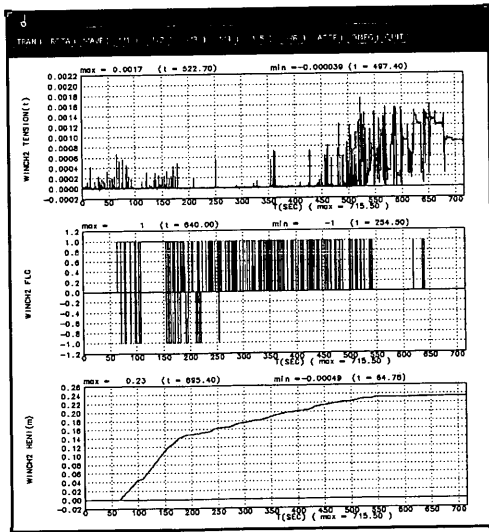


図-18(2) ウインチ2のウインチデータの時刻歴  
(不規則波中)

(有義波周期1.90s(12.0s),有義波高2.5cm(1.0m), 波向90°)

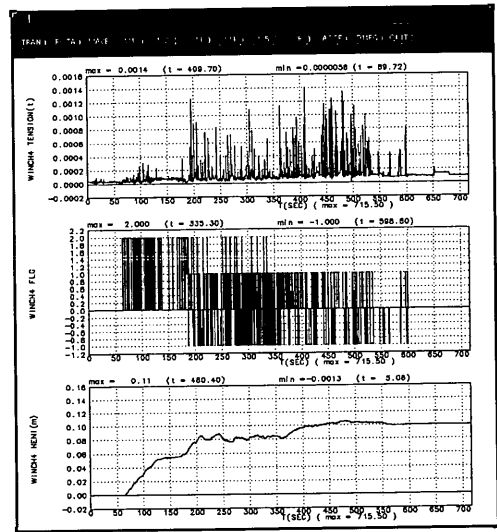


図-18(4) ウインチ4のウインチデータの時刻歴  
(不規則波中)

(有義波周期1.90s(12.0s),有義波高2.5cm(1.0m), 波向90°)

距離である25.0cm (10.0m) とほぼ等しくなるはずである。その様にならなかった理由は、実験開始前のケーソンの初期位置設定時において、実験ケースごとにワイヤの初期張力の設定がそれぞれ多少異なっていたこと、

ケーソンの初期位置が既設ケーソンから正確に25.0cm (10.0m) の距離になかったことなどが考えられる。

また、先に述べたように、約200s までは短周期波中では長周期波中と比較してヨウの制御があまり行われず、

ワイヤの繰出し制御が少ない。それゆえ、約200s までのワイヤの巻上げ量は、短周期波中で約20cm (8.0m)、長周期波中で約15cm (6.0m) と短周期波中の方が多くともわかる。さらに、長周期波中の方が短周期波中よりもケーソンが完全に着底するまでにスウェイ方向の位置制御に時間がかかっているため、約200s 以降のワイヤの巻上げ量は短周期波中で約5.5cm (2.2m)、長周期波中で約8.5cm (3.4m) と長周期波中の方が多くなっている。

ウインチ4に関して見ると、短周期波中で約14.5cm (5.8m)、長周期波中で約10cm (4.0m) の最大巻上げ量があることがわかる。ウインチ4はウインチ2よりもワイヤの巻上げ量が少ないけれども、これはウインチ4がクロスワイヤに対する制御を行っているためであり、据付ケーソンと既設ケーソン間の初期距離分の長さまでワイヤを巻上げる必要がないからである。

## 5.5 ケーソンの最大動揺量

### (1) 概要

据付ケーソンの動揺6成分のうち、ここでは波向90°の場合において最も波浪の影響を受けやすいと考えられるスウェイおよびロールの動揺周期特性について考察する。

図-19(1)および図-19(2)は、不規則波中実験におけるスウェイおよびロールの最大動揺量と有義波周期との関係を有義波高をパラメータとして図示したものである。また、図-20(1)および図-20(2)は、それぞれ有義波高2.5cm (1.0m) の不規則波中実験におけるスウェイおよびロールの最大動揺量と有義波周期との関係を波向をパラメータとして図示したものである。

各図においてはスウェイおよびロールの最大動揺量を各波周期に対して表示しているが、ここでの最大動揺量とは原点に関する動揺片振幅のうち、絶対値の大きいものを指している。また、計測された動揺量の時系列データの初期値が原点からずれている場合には、データの初期値を原点に合わせる補正を行い、最大動揺量を算出している。不規則波中実験はすべてのケースについて2回実施しているため、図中には2回の実験結果の平均値を載せている。なお、図の縦軸および横軸は模型値で表しており、図中の( )内の数値は実機換算値を示している。

### (2) 波高に関する比較

#### a) スウェイ

図-19(1)のスウェイの最大動揺量を見ると、有義波高が増加するにつれてスウェイの動揺量も増加する傾向

にあることがわかる。すなわち、有義波周期1.27s (8.0s) のときの動揺量と比較すると、有義波高3.75cm (1.5m) の場合は最大動揺量が11.7cm (4.7m) であり、有義波高1.25cm (0.5m) のときの3.3倍、有義波高2.50cm (1.0m) のときの1.5倍となる。したがって、スウェイの最大動揺量は有義波高の大きさにほぼ比例しているといえる。

有義波高1.25cm (0.5m) の場合では、スウェイの動揺量は短周期波側に比べ長周期波側で若干大きくなっている。また、有義波高2.50cm (1.0m) の場合では、長周期波になるほどスウェイの動揺量が大きくなるが、有義波周期1.27s (8.0s) のときに動揺量が小さなピークを示している。このグラフの形状は、図-14(1)および図-14(3)に示した波向90°における制御信号出力回数のグラフの形状と良く似ている。先に述べたようにスウェイの動揺量が大きくなるほどケーソンのスウェイ方向の位置制御回数が増加することは明らかであり、ケーソンのスウェイの動揺量と制御信号出力回数との間には強い相関関係があることが理解できる。

#### b) ロール

図-19(2)のロールの最大動揺量を見ると、スウェイの場合と同様に有義波高が増加するにつれてロールの動揺量も増加する傾向にあることがわかる。すなわち、有義波周期1.27s (8.0s) のときの動揺量と比較すると、有義波高3.75cm (1.5m) の場合は最大動揺量が6.9°であり、有義波高1.25cm (0.5m) のときの2.5倍、有義波高2.50cm (1.0m) のときの1.3倍となる。これから、波高の比ほどにはロールの動揺量の比は大きくなっていないことがわかる。また、ロールの最大動揺量の有義波高に対する応答倍率は、スウェイの場合に比べて小さい。これは、ロールの動揺は、スウェイの動揺に比べて粘性による動揺量の減衰効果が大きいことが原因であると考えられる。

有義波高1.25cm (0.5m) および有義波高2.50cm (1.0m) の場合では、長周期波になるにつれてロールの動揺量がほぼ単調増加する。図-19(1)と比較すると、ロールの動揺周期特性はスウェイのそれとおおむね似通っている。この理由は、先に述べたように、スウェイとロールが互いに連成している動揺成分であるからである。

### (3) 波向に関する比較

#### a) スウェイ

図-20(1)のスウェイの最大動揺量を見ると、有義波周期1.27s (8.0s) 以下の短周期波側においては波向に対するスウェイの動揺量に差異はほとんどないが、有義波周期1.58s (10.0s) 以上の長周期波側においては波向

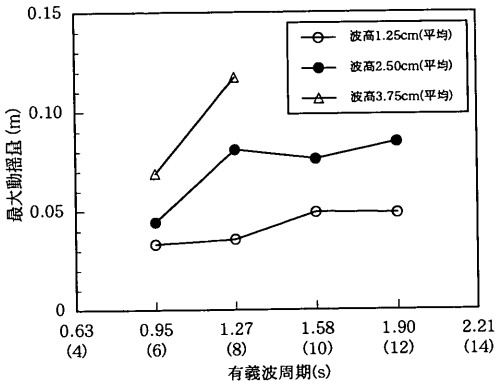


図-19(1) ケーソンの最大動揺量 (スウェイ)  
(不規則波, 波向90°)

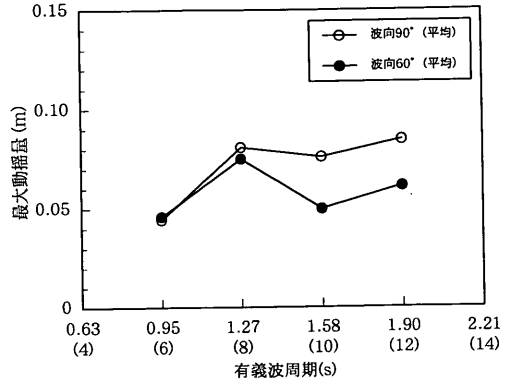


図-20(1) ケーソンの最大動揺量 (スウェイ)  
(不規則波, 有義波高2.5cm(1.0m))

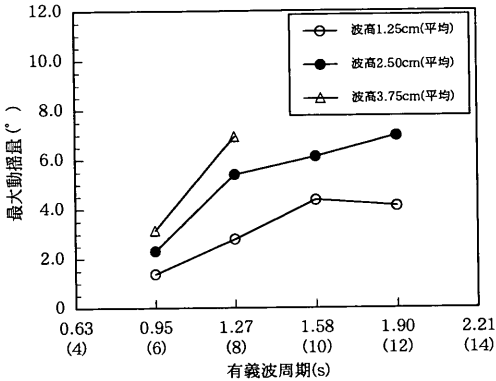


図-19(2) ケーソンの最大動揺量 (ロール)  
(不規則波, 波向90°)

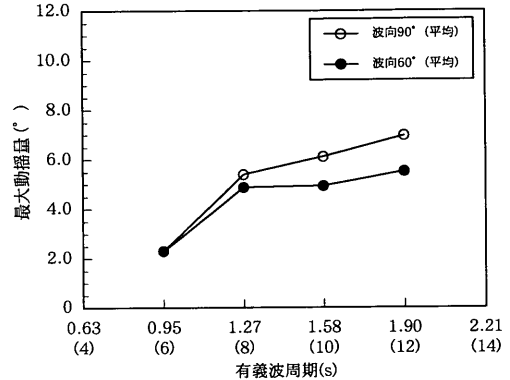


図-20(2) ケーソンの最大動揺量 (ロール)  
(不規則波, 有義波高2.5cm(1.0m))

90°の場合が波向60°の場合よりも動揺量大きいことがわかる。これは図-16(1)~(4)のスウェイの時刻歴からも理解することができる。波向90°の場合が波向60°のときよりも長周期波浪の影響をより受けやすいのは、波向90°ではケーソンの真横から波浪が作用するため、波向60°の場合に比べてスウェイをより励起させやすいからである。また、波向60°においては有義波周期1.27s(8.0s)のときにスウェイの動揺量がピークを示しており、前述のようにケーソンのスウェイに関する固有振動周期がこの波周期付近にあることを示唆している。

b) ロール

図-20(2)のロールの最大動揺量を見ると、スウェイの場合と同様な傾向がうかがえる。すなわち、有義波周期1.27s(8.0s)以下の短周期波側においては波向に対するロールの動揺量にほとんど差異はないが、有義波周期1.58s(10.0s)以上の長周期波側では波向90°の場合

が波向60°の場合よりも動揺量大きい。これは、スウェイとロールが互いに連成している動揺成分であることから容易に理解できる。また、波向60°におけるロールの動揺量はスウェイの場合のように明確なピークを持たず、長周期波になるにつれて動揺量が単調増加し、長周期波になるほどロールの動揺量が大きくなることがわかる。

5.6 ケーソンの設置誤差

(1) 概要

水理模型実験においては各々のケースの終了後、ケーソンの設置誤差をスケールを用いて測定している。ここで示すケーソンの設置誤差とは、着底後の据付ケーソンの端部と既設ケーソン端部間の距離を法線方向および法線直角方向について計測したものであり、それぞれ据付ケーソンのX軸方向(サージ方向)およびY軸方向(ス

ウェイ方向)への既設ケーソンからのずれを表している。

図-21は据付ケーソンの設置誤差の測定方法を図示したものである。(a)図は水平面内における $X-Y$ 座標を示しており、図-12で示した絶対座標系と同じ座標である。また(b)~(e)図は4種類の据付ケーソンのずれの状態を表している。実際には、この4種類のケーソンのずれの状態に対応した $X$ 軸に対称なずれの状態があるため、ケーソンのずれの状態は全部で8種類となる。

これらの図からケーソンのずれの状態は、動揺6成分の中のスウェイとヨウから基本的に構成されることがわかる。(b)図はスウェイ方向のずれのみが発生した場合、(c)図はヨウ方向のずれのみが発生した場合、(d)図および(e)図はスウェイ方向とヨウ方向のずれが発生した場合を示している。図中の太線はケーソンの設置誤差をスケールで測定した位置を指しており、各図の下に設置誤差の表記方法も示している。例えば、(d)図では $\Delta X=3\text{cm}$ かつ $\Delta Y=5\text{cm}$ であり、この設置誤差は $(+3.0, +5.0)$ と表すものとする。符号の付け方は(a)図の座標系に準じている。

なお、ここで用いた設置誤差の表記方法ではケーソンの回転を表示していないため、ケーソン設置後のヨウの状態(例えば、(d)図および(e)図におけるヨウの向き)を表すことができない点に注意する必要がある。

(2) ケーソンの設置誤差の計測結果

表-5は不規則波中実験における据付ケーソンの設置誤差を示す。不規則波中実験は全ケースについて2回実施しているため、表には2回の実験結果を載せている。また、表において設置誤差0.0とは、ケーソンのずれが

全く計測されなかったことを示している。

この表から、短周期波あるいは低波高の場合にはケーソンの設置誤差は小さいが、長周期波あるいは高波高の場合にはケーソンの動揺の増大に対応して設置誤差も大きくなる傾向にあることがわかる。例えば、波向 $90^\circ$ において、有義波高 $2.50\text{cm}$  ( $1.0\text{m}$ )の場合には有義波周期 $1.27\text{s}$  ( $8.0\text{s}$ )以上で設置誤差が $1.0\text{cm}$  ( $0.4\text{m}$ )を超えることがあり、また、有義波高 $3.75\text{cm}$  ( $1.5\text{m}$ )の場合にはすべてのケースにおいて設置誤差が $1.0\text{cm}$  ( $0.4\text{m}$ )以上である。一方、波向 $60^\circ$ の場合においても、有義波高 $2.50\text{cm}$  ( $1.0\text{m}$ )の場合には有義波周期 $1.90\text{s}$  ( $12.0\text{s}$ )のときに、また、有義波高 $3.75\text{cm}$  ( $1.5\text{m}$ )の場合にはほとんどのケースで設置誤差が $1.0\text{cm}$  ( $0.4\text{m}$ )以上になることがある。

さらに、 $Y$ 軸方向(防波堤法線直角方向)の設置誤差に比較して、 $X$ 軸方向の設置誤差が小さいこともわかる。これは波向 $90^\circ$ の場合に特に顕著であり、この波向では $X$ 軸方向の設置誤差は全く計測されていない。これに対し、波向 $60^\circ$ の場合には、長周期波あるいは高波高のときに $0.3\sim 0.5\text{cm}$  ( $0.12\sim 0.2\text{m}$ )の $X$ 軸方向の設置誤差が生じており、同時に $Y$ 軸方向の設置誤差も生じている。これは、据付ケーソンが回転した状態、すなわちヨウが発生した状態で設置されたことを表している。ケーソンが回転して設置されたのは、波向 $60^\circ$ の場合においては波向 $90^\circ$ の場合に比較して、ケーソンのヨウの動揺が生じやすいことが原因であると考えられる。逆に、波向 $90^\circ$ の場合には、ヨウよりもスウェイの動揺が発生しやすい波向であるため、ケーソンの $X$ 軸方向の位置制

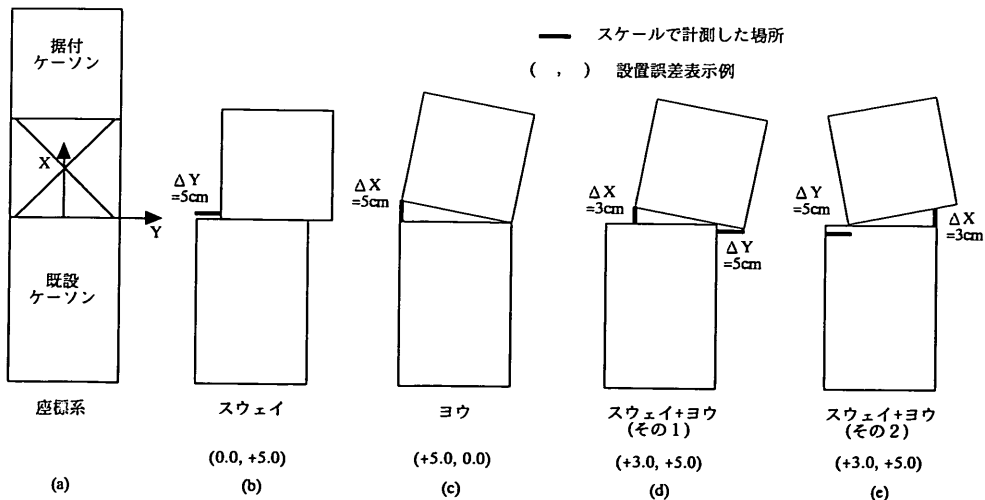


図-21 ケーソンの設置誤差の測定方法

表-5 ケーソンの設置誤差 (不規則波中実験)

不規則波		90						60					
波 向 (°)		1.25 (50.0)		2.50 (100.0)		3.75 (150.0)		1.25 (50.0)		2.50 (100.0)		3.75 (150.0)	
有義波高 (cm)													
設置誤差 (cm)		ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY
有義 波周期 (s)	0.95 (6.0)	0.0	-0.5	0.0	0.0	0.0	+1.0	0.0	+1.1	0.0	0.0	+0.5	+1.6
		0.0	-0.4	0.0	-0.3	0.0	+1.5	0.0	+0.8	0.0	0.0	+0.4	+0.5
	1.27 (8.0)	0.0	+0.5	0.0	-0.5	-	-	0.0	+0.3	0.0	0.0	0.0	+1.2
		0.0	0.0	0.0	+2.4	0.0	+1.8	0.0	-0.5	0.0	+0.8	+0.3	+2.2
1.58 (10.0)	0.0	+0.3	0.0	+0.3	/		0.0	-0.6	0.0	+0.4	/		
	0.0	+0.6	0.0	+2.0			0.0	0.0	+0.3	+0.6			
1.90 (12.0)	0.0	+0.3	0.0	+1.0	/		0.0	0.0	+0.5	+0.3	/		
	0.0	+0.6	0.0	+0.6			0.0	+0.5	+0.4	-2.1			

(注) - は欠測を示す。また表中の上段は実験1回目、下段は実験2回目の計測値を示す。設置誤差は模型値で表示している。なお( )内の数値は、実機換算値を示す。

御はうまく行われ、その結果、ケーソンの Y 軸方向の設置誤差のみが計測されたのであると考えられる。

現在のケーソンの据付作業では、設置誤差の許容範囲は約0.2~0.5mである。この数値は模型スケールに換算すると、約0.5~1.25cmになる。したがって、本自動設置システムを用いれば、有義波高1.25cm(0.5m)の場合は全ての波周期に対してケーソンを目標位置に設置可能であることがわかる。一方、有義波高2.50cm(1.0m)かつ有義波周期1.26s(8.0s)以上の場合には、ケーソンの設置誤差はしばしば限界値を超える。これは、先にも示したように、水理模型実験においては注水速度が一定であることに原因がある。水理模型実験において注水速度を可変とし、実際のケーソン据付作業を再現すれば、ケーソンの設置誤差はより小さくなるものと考えられる。水理模型実験は注水速度が一定の状態で行っているが、図-1に示した据付限界波浪条件である有義波高0.8m以下、有義波周期9.0s以下の条件においては、ケーソンの設置誤差が許容範囲以下に収まること、さらに、注水方法の改良により据付限界波浪条件の向上が期待できることから、ケーソン据付作業の稼働率の向上が期待できる。

## 6. 結 論

本報告では、防波堤ケーソン等の海洋構造物の設置作業を自動的に行う自動設置システムを開発し、このシステムを新たな防波堤ケーソンの据付手法として提案した。この新システムは、現在の熟練技術者の経験と勘に大きく依存したケーソンの据付手法を改善することにより、

防波堤ケーソンの据付作業に関して、作業の省力化および工費の縮減、作業員の安全性の確保、施工能率の向上、新しい形状のケーソンの据付への効率的対応等に資する。本システムは、引船を使用した引船方式、引船を使用せずアンカーを用いたアンカーワイヤ方式の2方式でケーソンの据付作業を行うことが可能であるが、本報告ではこれら2方式のうち、引船方式によるシステムの有効性を水理模型実験により検証した。そして、本システムを用いれば、現在のケーソン据付作業時における限界波浪条件内(有義波高0.8m以下、有義波周期9.0s以下)においては、防波堤ケーソンを目標位置に安定的に自動誘導し、十分な精度で設置できることが確認できた。

以下に水理模型実験におけるケーソンの動揺およびウインチの制御信号等についての主要な性状をとりまとめて示す。

1) 不規則波中におけるケーソンの動揺量は、スウェイ、ヒープ、ロール、ヨウが短周期波中に比較して長周期波中において大きく、サージ、ピッチに関しては短周期波中と長周期波中とであまり差異がない。また、短周期波中では波漂流力の影響により波の進行方向にケーソンのドリフトが発生するのに対し、長周期波中ではケーソンのドリフトはほとんど現れない。

2) 波向90°および60°の不規則波に対するスウェイおよびロールの動揺量は、短周期波中においてはほとんど差異はないが、長周期波中においては波向90°の場合が波向60°の場合よりも大きくなる。これは、波向90°の長周期波浪中においては、スウェイおよびロールの動揺に大きく影響するケーソンの真横からの波力が增大するためである。

3) 短周期波中ではケーソンのドリフトが生じるものの、動揺量自体はさほど大きくないため、本システムを使用してケーソンの据付を安定して行うことができる。一方、長周期波中あるいは高波高中においては、ケーソンの動揺量が大きくなるため、ケーソンの据付を安定して行うことは困難になる。

4) 長周期波中あるいは高波高中においてケーソン据付作業を安定して実施するためには、ケーソンの動揺を抑制する必要がある。これには、引船によるケーソンの位置制御を強化すること、あるいはケーソン着底前の急速注水により動揺をできるだけ早くに低減させることなどの対策が考えられる。

5) 不規則波中実験におけるケーソンの位置制御信号出力回数は、実験したすべての波周期に対して静水中実験の場合よりも増加する傾向にある。これは、波浪によりケーソンが動揺し、ケーソンの位置および回転角が法線直角方向許容範囲あるいは許容回転角を超える回数が増加するため、ウインチがケーソンの位置制御を行う回数が多くなるからである。

6) 不規則波中実験におけるウインチの制御信号出力結果によると、本システムは短周期波中に比較して長周期波中においてケーソンのスウェイおよびヨウの制御を多く実行していることが確認された。これは、短周期波中よりも長周期波中の場合に、ケーソンのスウェイおよびヨウの動揺量が大きくなることと一致している。

7) 不規則波中実験においてウインチに作用する最大荷重は非常に大きな値を示したため、本システムを実際の現場でのケーソン据付作業に適用するためには、ウインチに作用する荷重に対するワイヤの自動リリース（ワイヤの繰出し）機構を導入する、引船の能力を強化して引船に負担させる荷重を増加させるなどの処置が必要となる。

8) 短周期波あるいは低波高の場合にはケーソンの設置誤差は小さいが、長周期波あるいは高波高の場合にはケーソンの動揺量が大きくなるため、結果的に設置誤差も大きくなる傾向にある。本実験では一定速度で注水を行ったが、ケーソンへの注水速度を可変とし、ケーソン着底前の急速注水を行うなどの実際のケーソン据付作業を再現すれば、ケーソンの設置誤差はより小さくなるものと考えられる。

## 7. あとがき

防波堤ケーソンの自動設置システムを開発し、引船方式によるシステムの有効性に関して水理模型実験により

検証した。アンカーワイヤ方式によるシステムの水理模型実験も既に行っており、第二報として報告する予定である。また、将来的には、本システムの実用化に関する検証を目的とした現地実証実験も行いたいと考えている。

今後の課題としては、本システムにより制御が行えない動揺成分（ヒープ、ロール等）の動揺を低減させる方法の開発があげられる。これは、厳しい波浪条件下で防波堤ケーソンの据付作業をより安全に効率的に実施するためには、ケーソンの動揺の低減化が重要な問題となるからである。また、本システムの実用化に向けては、作業員を必要としないワイヤリング手法の開発、据付ケーソンへの自動注排水システムの開発、引船との相互通信手段の確立等が課題となる。

## 謝辞

本研究は、運輸省港湾技術研究所と運輸省第二港湾建設局横浜機械整備事務所が共同して実施した。この研究は、構造部海洋構造研究室長であった上田茂氏（現鳥取大学教授）の指導のもとに、平成3年度より開始されたものである。研究の実施にあたっては、当所機械技術部計測施工研究室との共同で行った。元計測施工研究室長である松井創氏（現第四港湾建設局前任港湾工事検査官）、東俊夫氏（現佐賀県港湾課長）とは、研究の遂行において討議を重ねた。さらに、本システムを開発するにあたっては、現場におけるケーソンの据付工事の現状を把握し、より現実的な自動据付システムを構築するために社団法人日本埋立淡濠協会に『海洋構造物自動設置システム開発調査委員会』を設置し、各委員の方々に数多くの貴重な御助言を頂いた。以上の方々に、ここに記して深甚なる謝意を表する。（1996年9月30日受付）

## 参考文献

- 1) 運輸省第二港湾建設局，運輸省港湾技術研究所：防波堤ケーソン自動設置システム設計の手引，1996年3月，83p.
- 2) Shiraishi, S., H. Yoneyama, H. Matsui, S. Ueda and Y. Okayama : Experimental Study for Automatic Installation System of Offshore Structures, *Proc. of International Workshop on Floating Structures in Coastal Zone, Port and Harbour Research Institute*, 1994, 10, pp.430 ~ 441
- 3) 米山治男，白石悟，名里健吾，上田茂，松井創，岡山義邦，高橋英俊：引き船方式による防波堤ケーソンの自動設置システムの開発および水理模型実験による評価，第13回海洋工学シンポジウム論文集，日本造船

- 学会, 1995年7月, pp.459~466
- 4) 白石悟, 米山治男, 高橋英俊: (特集) 施工の自動化・合理化技術「防波堤ケーソンの自動設置システム」, 土木施工, 第36巻第10号, 山海堂, 1995年9月, pp.77~82
- 5) Shiraishi, S., H. Yoneyama, K. Nazato, S. Ueda and H. Takahashi: Experimental Study for Automatic Installation System of Offshore Structures, *Proc. of 20th Joint Meeting UJNR Marine Facilities Panel*, 1995.9, pp.210 ~ 217
- 6) Yoneyama, H., S. Shiraishi, K. Nazato, S. Ueda and H. Takahashi: Experimental Study on Automatic Installation System of Offshore Breakwaters, *Proc. of the 6th International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers*, 1996.5, pp.523 ~ 530
- 7) 石見剛, 白石悟, 名里健吾: 外洋に面した港湾における防波堤ケーソンの据付時の動揺特性および作業限界条件, 港湾技研資料, No.850, 1996年12月
- 8) Faltinsen, O.M. and F.C. Michelsen: Motions of Large Structures in Waves at Zero Froude Number, *Proc. of International Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, Institute of Mechanical Engineers London*, 1974, pp.91 ~ 106
- 9) Garrison, C.J.: Hydrodynamic Loading of Large Offshore Structures: Three Dimensional Source Distribution Method, *Numerical Method in Offshore Engineering, John Wiley & Sons*, 1978
- 10) 上田茂, 白石悟, 米山治男, 谷口武志, 伊藤公明, 小斉弥祐: 作業船の動揺計測装置の開発および現地実船実験, 海洋開発論文集, Vol.10, 1994年6月, pp.337 ~ 342
- 11) 白石悟, 米山治男, 上田茂, 谷口武志, 伊藤公明, 小斉弥祐: 作業船の動揺計測装置の開発及び実船観測, 港湾技研資料, No.799, 1995年3月, 38p.
- 12) 上田茂, 白石悟, 板生考司, 内藤了二: 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, 港湾技研資料, No.754, 1993年6月, 46p.
- $g$  : 重力加速度
- $H$  : 波高, または有義波高 (cm または m)
- $H_{1/3}$  : 有義波高 (cm または m)
- $h$  : 水深
- $K$  : 付加質量係数および付加慣性モーメント係数
- $k$  : 波数
- $L$  : 波長
- $M$  : 質量および慣性モーメント
- $N$  : 線形減衰係数
- $R$  : ワイヤ張力 (kgf または tf)
- $T$  : 経過時間または波周期 (s)
- $T_{1/3}$  : 有義波周期 (s)
- $TX$  : ロールの動揺量 (°)
- $TY$  : ピッチの動揺量 (°)
- $TZ$  : ヨウの動揺量 (°)
- $t$  : 動揺量の最大値あるいは最小値の発生した時刻 (s)
- $X$  : 既設ケーソンに固定した絶対座標系の  $X$  軸, またはサージの動揺量 (cm または m)
- $x$  : 変位, ただし,  $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$  であり,  $x_1 =$ サージ,  $x_2 =$ スウェイ,  $x_3 =$ ヒープ,  $x_4 =$ ロール,  $x_5 =$ ピッチ,  $x_6 =$ ヨウ
- $\dot{x}$  : 速度
- $\ddot{x}$  : 加速度
- $\dot{x}|\dot{x}|$  : 速度の自乗ベクトル
- $Y$  : 既設ケーソンに固定した絶対座標系の  $Y$  軸, またはスウェイの動揺量 (cm または m)
- $Z$  : 既設ケーソンに固定した絶対座標系の  $Z$  軸, またはヒープの動揺量 (cm または m)
- $\Delta X$  : ケーソンの  $X$  軸方向の設置誤差 (cm)
- $\Delta Y$  : ケーソンの  $Y$  軸方向の設置誤差 (cm)
- $\theta$  : 波向 (°)
- $\omega$  : 波の角周波数

#### 主要記号表

- $B$  : 静水圧的復元力係数
- $C$  : 非線形減衰係数
- $c$  : 波速
- $F$  : 作用荷重 (波浪荷重, 風荷重, 流れによる荷重)