

運輸省港湾技術研究所

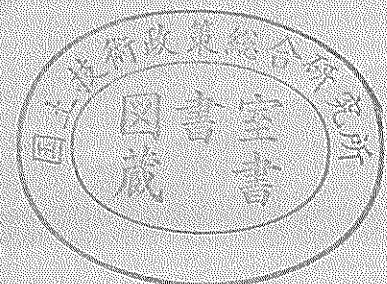
港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

VOL.38 NO.2 June 1999

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第38巻 第2号 (Vol.38, No.2), 1999年6月 (June 1999)

目次 (CONTENTS)

1. 潮位変動および密度の非一様性を考慮した砂浜海岸地下水の非定常過程に関する数値解析
.....内山雄介..... 3
(Numerical Analysis on Groundwater Flow in Sandy Beaches Considering Tidal Fluctuation and Density Distribution
.....Yusuke UCHIYAMA)
2. 久里浜湾の流れ特性と生態系に関する研究
.....日比野忠史・豊田政史・西守男雄・細川恭史・鶴谷広一..... 29
(Current Field Characteristics and Ecosystem Investigations in Kurihama Bay
...Tadashi HIBINO, Masashi TOYOTA, Dan-o NISHIMORI, Yasushi HOSOKAWA and Hiroichi TSURUYA)
3. 海水交換型防波堤の透過量評価手法の提案
.....西守男雄・日比野忠史・豊田政史・細川恭史・石原弘一・森下正志・鶴谷広一..... 63
(Estimation of Water Mass Exchanged through Water Exchangeable Breakwater
.....Dan-o NISHIMORI, Tadashi HIBINO, Masashi TOYOTA, Yasushi HOSOKAWA,
Hirokazu ISHIHARA, Masashi MORISHITA and Hiroichi TSURUYA)
4. 粘性土のセメンテーションによる強度発現メカニズム
.....土田 孝・湯 怡新..... 99
(Strength Mobilization due to Cementation of Clay
..... Takashi TSUCHIDA and Yi Xin Tang)
5. 港湾空港事業における軽量混合処理土工法の開発と適用事例
.....土田 孝..... 131
(Development and Use of Foamed Treated Soil in Port and Airport Project
..... Takashi TSUCHIDA)
6. 海洋環境 (酒田港20年) に暴露したコンクリート梁の材料劣化が梁の力学性能に及ぼす影響
.....横田 弘・秋山哲治・濱田秀則・三上 晃・福手 勤..... 169
(Effect of Degradation of Concrete on Mechanical Properties of Reinforced Concrete Beams
Exposed to Marine Environment (for 20 years in Sakata)
.....Hiroshi YOKOTA, Tetsuji AKIYAMA, Hidenori HAMADA, Akira MIKAMI and Tsutomu FUKUTE)
7. 鋼直杭式棧橋の地震時保有耐力に関する実験および解析
.....横田 弘・川崎 進・菅原 亮・Hazem El-Bakry・川端規之..... 223
(Ultimate Structural Performance of Steel-Pile Supported Wharves
... Hiroshi YOKOTA, Susumu KAWASAKI, Ryo SUGAWARA, Hazem El-Bakry and Noriyuki KAWABATA)
8. 防波堤ケーソンの自動設置システムの開発 (第二報) - アンカーワイヤ方式の水力模型実験による検討 -
.....米山治男・白石 悟・名里健吾・高橋英俊..... 257
(Development of Automatic Installation System of Breakwater Caisson (2nd Report)
- Evaluation of Anchor Wire System by Hydraulic Model Experiments -
..... Haruo YONEYAMA, Satoru SHIRAIISHI, Kengo NAZATO and Hidetoshi TAKAHASHI)
9. RC港湾構造物の塩害に係わる環境要因の定量的評価に関する研究
.....濱田秀則..... 299
(Quantitative Evaluation of Environmental Factors Related to Chloride Attack of RC Harbor Structures
.....Hidenori HAMADA)

10. 破壊確率を考慮した防波堤のライフサイクルコストと許容破壊確率
.....長尾 毅・松渕 知..... 395
(Studies on Life-Cycle Cost and Allowable Failure Probability of Breakwaters
..... Takashi NAGAO and Satoru MATSUBUCHI)
11. 係留施設のライフサイクルコスト発生と維持管理意志決定支援システムの構築に関する基礎的研究
.....松渕 知・横田 弘..... 423
(Life-Cycle Cost Analysis of Berthing Facilities and Development of A Decision Support System
during their Maintenance Work
..... Satoru MATSUBUCHI and Hiroshi YOKOTA)
12. 大規模地震時におけるコンテナクレーンの脚の浮き上がりに関する模型実験
.....江頭隆喜・山本俊介・田邊俊郎・中島 晋・菅野高弘・宮田正史・柏崎昭宏・金山維史..... 475
(Experiment on Uplifting of Legs of Container Cranes under Strong Earthquakes
..... Takaki ETOU, Shunsuke YAMAMOTO, Toshiro TANABE, Susumu NAKASHIMA・
Takahiro SUGANO, Masafumi MIYATA, Akihiro KASHIWAZAKI and Tadafumi KANAYAMA)

防波堤ケーソンの自動設置システムの開発(第二報) —アンカーワイヤ方式の水理模型実験による検討—

米山治男^{*}・白石 悟^{**}・名里健吾^{***}・高橋英俊^{****}

要 旨

本報告では、現状では作業員が直接手動で実施しているウインチ操作作業を自動化することにより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、自動設置システムについて述べる。本システムを開発した目的は、ケーソンの据付作業におけるウインチおよび緊張したワイヤラインの直近における作業の回避等の安全性対策、将来の作業員の高齢化あるいは減少に備えた据付作業の省力化、さらにはケーソンの設置限界波高の向上による据付作業の稼働率の向上等を実現することにある。

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。

第一報においては、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することにより、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、引船方式による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実験的に確認できた。

そこで、本報告では、引船方式によるシステムと比較して、より安定的で高精度なケーソン据付が可能と考えられる、アンカーワイヤ方式によるシステムについて水理模型実験を実施した。その実験結果から、アンカーワイヤ方式によるシステムの制御アルゴリズムの妥当性が確認され、また第一報で報告した引船方式によるシステムとの比較から、アンカーワイヤ方式によるシステムは、ケーソン据付作業の安定性および最終的なケーソン設置精度において、引船方式によるシステムよりも効果的であることが明らかとなった。

キーワード：ケーソン、海洋工事、据付作業、ウインチ、自動化、動揺、引船、アンカー

*構造部主任研究官(動揺解析担当)

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1, TEL: 0468-44-5032, FAX: 0468-44-4161, E-mail: yoneyama@cc.phri.go.jp

**構造部海洋構造研究室長

***前構造部海洋構造研究室(現第四港湾建設局長崎港湾空港工事事務所)

****元第二港湾建設局横浜機械整備事務所長(現特別研究官(防災担当))

**Development of Automatic Installation System
of Breakwater Caisson (2nd Report)**
- Evaluation of Anchor Wire System by Hydraulic Model Experiments -

Haruo YONEYAMA^{*} · Satoru SHIRAISHI^{**}
Kengo NAZATO^{***} · Hidetoshi TAKAHASHI^{****}

Synopsis

This report describes an automatic installation system that enables automatic construction of offshore structures such as breakwater caissons by automating a present winch operation, which is directly hand-operated by several operators on a floating crane. The development of the automatic installation system aims at realizing mainly the following three things: a countermeasure to maintain the safety of workers such as evasion of works in the vicinity of winches and taut wires during caisson installation work, labor-saving offshore constructions for the purpose of preparing increases of aged workers and decreases in the total labor force in the future, and an improvement of construction efficiencies of caisson installation work by improving the limit wave height condition for caisson installation. The automatic installation system includes a program that manages caisson installation work using two associated units: a tugboat support system and an anchor wire system. In the 1st Report, by conducting hydraulic model experiments for the tugboat support system of these two systems, it was attempted to confirm the validity of the control algorithm of the system. It was then certified from the experimental results that the tugboat support system is able to automatically install breakwater caissons with good accuracy. Accordingly, in the 2nd Report, hydraulic model experiments for the anchor wire system, which can be considered to be able to manage caisson installation work more stably and accurately than the tugboat support system, is reported. As a result, the propriety of the control algorithm of the system is certified. It is simultaneously made clear that the anchor wire system is more effective than the tugboat support system with respect to the stability of caisson installation work and the accuracy of final caisson installation, as compared with the experimental results of the tugboat support system shown in the 1st Report.

Key Words: Caisson, Offshore construction, Installation work, Winch, Automatization, Caisson motions, Tugboat, Anchor

^{*}Senior Research Engineer, Structural Engineering Division

Address: Port and Harbour Research Institute, MOT, 3-1-1, Nagase, Yokosuka 239-0826, Japan

Tel: +81-468-44-5032, Fax: +81-468-44-4161, E-mail: yoneyama@cc.phri.go.jp

^{**}Chief of the Offshore Structures Laboratory, Structural Engineering Division

^{***}Former Member of the Offshore Structures Laboratory, Structural Engineering Division

(Nagasaki Port and Airport Construction Office, The Fourth District Port Construction Bureau)

^{****}One-time Chief of the Yokohama Machinery Improvement Office, The Second District Port Construction Bureau
(Director of the Special Research in charge of Disaster Prevention Issues)

目 次

要 旨	257
1. まえがき	261
2. 現在の防波堤ケーソンの据付作業状況	261
3. 防波堤ケーソンの自動設置システム	262
3.1 自動設置システムの構成	262
3.2 引船方式およびアンカーワイヤ方式によるケーソン据付作業	264
3.3 アンカーワイヤ方式による自動設置システムのアルゴリズム	266
3.4 ケーソンの位置予測計算方法	267
4. アンカーワイヤ方式による自動設置システムの水理模型実験	270
4.1 自動設置システム実験模型	270
4.2 データ計測および制御システム	273
4.3 実験ケースおよび実験状況	275
5. 水理模型実験結果	277
5.1 制御信号出力結果	277
5.2 ケーソンの重心点の軌跡	280
5.3 ケーソンの動揺の時刻歴	282
5.4 ウインチデータの時刻歴	285
5.5 ケーソンの最大動揺量	288
5.6 ケーソンの設置誤差	291
6. 結論	293
7. あとがき	294
謝 辞	296
参考文献	296
記号表	297

1. まえがき

太平洋に面した外洋性港湾においては、従来より、厳しい気象・海象条件のもとで防波堤の築造が実施されてきた。このような海域での防波堤ケーソンの据付作業は、ケーソン上で作業する作業員および緊張するワイヤの直近でのウインチ操作を行う作業員にとって危険を伴う場合もあり、『ウインチおよび緊張したワイヤラインの直近における作業の回避などの安全性対策』が求められている。また、現在のケーソンの据付作業は多数の熟練技術者の勘と経験への依存度が大きいため、『長期的な視点から将来の作業員の高齢化あるいは減少に備えたケーソン据付作業の省力化』も必要とされている。さらに、外洋性港湾においてはその厳しい波浪環境のために建設工事が可能な十分な静穏日数を確保することがなかなか困難であり、据付作業が中断あるいは中止されることも多い。それゆえ、『防波堤ケーソンの設置限界波高の向上によるケーソン据付作業の稼働率の向上』も望まれている。こういったケーソン据付作業の省力化および稼働率の向上は、結果的に、防波堤築造工事における建設工費の縮減に寄与することも期待される。また他方では、外洋での防波堤建設に際して、今後使用されることが多くなると考えられる大型ケーソンあるいは台形ケーソン等の特殊形状ケーソンの据付が可能な汎用的な据付手法の開発も要求されている。

そこで、筆者らは、以上のような諸問題を解決するために、防波堤ケーソン等の海洋構造物の据付作業を自動的に行う自動設置システムを開発した^{1)~10)}。本システムは、現状では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したものであり、ケーソン据付作業における作業員の安全性の確保、省力化および施工能率の向上等に資することが期待される。

本システムには、引船を使用した引船方式^{2)~5)}、引船を使用せずアンカーを用いたアンカーワイヤ方式^{6)~10)}の2種類のケーソン据付手法に対する制御プログラムが導入されており、これらのうちの1方式を用いてケーソンの自動据付作業を行うことが可能である。現在のケーソン据付作業では、引船方式は既設のケーソンがすでに存在する場合、アンカーワイヤ方式は防波堤の築造工事において最初の据付ケーソンである場合あるいは大型のケーソンである場合に一般的によく採用されている方法である。引船方式によるシステムは、ケーソンの据付作業において3隻の引船を使用するが、現場への適用性の問題から、引船によるケーソンの位置制御まで自動化したシステムとはなっていない。したがって、この方式のシ

ステムを実際のケーソン据付作業に使用する際には、現在のケーソン据付作業で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、引船方式によるシステムでは、気象・海象条件によっては、引船によるケーソンの位置制御の良否がケーソン据付作業の安定性に影響する場合もあると考えられる。一方、アンカーワイヤ方式によるシステムは、引船を用いず、海底に沈設されたアンカーとアンカーに対して展張されたワイヤを使用してケーソンの据付作業を行うため、ケーソンの位置制御に関連する機能のすべてを自動設置システムに組み込んだ自動据付作業が可能となる。したがって、アンカーワイヤ方式によるシステムは、引船方式によるシステムと比較して、より安定したケーソンの据付を行うことができると期待される。

筆者らは、第一報⁹⁾において、主として引船方式による自動設置システムに関して、システムの構成、据付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を概説するとともに、その実験結果について検討した。その結果、引船方式の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、据付ケーソンの据付作業を自動的かつ安定的に行え、既設ケーソン前の設置目標位置に十分な精度で設置できることが検証された。

そこで、本研究では、引船方式と比較して、より安定的で高精度なケーソン据付が可能と考えられるアンカーワイヤ方式による自動設置システムに関して、水理模型実験により、その妥当性を検討することとした。本報告では、アンカーワイヤ方式によるシステムに関して、引船方式との大きな相違点であるケーソンの位置制御アルゴリズムを中心に説明を行うとともに、その水理模型実験結果について考察している。なお、以下の論文では、第一報にて報告した引船方式によるシステムとの比較参照を容易にするために、両方式の違いを明確にしながら、第一報とおおむね同じ構成にして記述を行っている。

2. 現在の防波堤ケーソンの据付作業状況

本章では、第一報においてケーソン据付作業時のウインチ操作状況を調査した八戸港八太郎地区の北防波堤工事の事例を用いて、現状における防波堤ケーソンの据付作業の状況を説明する。なお、この地区でのケーソン据付作業は引船方式で実施されている。

写真-1はケーソン据付作業時のウインチ操作の様子を示している。ウインチ操作員は、起重機船上のウイン



写真-1 ケーソン据付作業時のウインチ操作の様子

チを手動で操作してケーソン据付作業を行っている。この状況から、ウインチ操作員は緊張したワイヤの直近で作業しなければならないため、ケーソン据付海域の波浪状態によっては危険な状況にさらされる場合もあることが推察される。しかしながら、ウインチ操作を自動化したケーソンの自動設置システムを用いれば、そのような事態を回避し、作業員の安全性の確保に寄与することが可能となる。なお、この写真では、ワイヤのごく近傍に2名および手前に1名の作業員が写っているが、これらの作業員はケーソン据付作業におけるウインチ操作の状況を調査している調査員である。

写真-2はケーソン据付作業時の据付ケーソンおよび既設ケーソン上の作業員の作業状況を示している。現状では約10名ほどの作業員がケーソン上で作業をしていることがわかる。作業員は、波浪により動揺している据付ケーソン上において緊張したワイヤ付近での作業を強いられるために、場合によっては危険な状況下に置かれると想像できる。自動設置システムを用いたケーソン据付手法ではケーソン上の作業員を無人化することが可能であるから、作業員は危険な海上作業から解放されると同時にケーソン据付作業の省力化をも達成できることになる。

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

第一報で概説した防波堤ケーソンの自動設置システムは、以下の手順にしたがって目標とするケーソン設置位置にケーソンを据付けるものである。本システムにおいては、引船方式およびアンカーワイヤ方式ともに同じ手順でケーソン据付作業を行うようにシステムが構築され

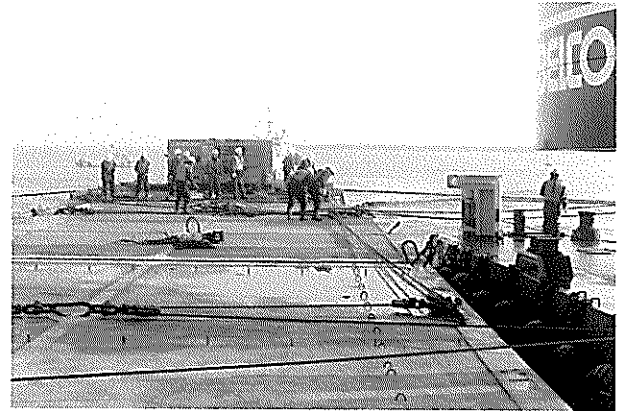


写真-2 ケーソン据付作業時の据付ケーソンおよび既設ケーソン上の作業員の作業状況

ている。

- 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、ケーソン設置波高データ等を計測する。
- ②計測データに基づいて、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）を用いて次タイムステップにおけるケーソンの位置および動揺を予測する。
- ③EWS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自動的に修正する位置制御を行う。
- ④以上の①～③の手順を繰り返すことにより、最終的に目標としたケーソン設置位置にケーソンを据付ける。

ここで、自動設置システムを使用したケーソン据付作業が現状でのケーソン据付作業と異なる点は、据付作業中のウインチ操作をEWS等のコンピュータを用いて完全に自動化している点である。自動化のためには、ケーソンの位置および動揺量、波高等のデータを取得するための計測機器を配備すること、自動設置システムプログラムを組み込んだEWSを設置すること、EWSからの制御信号に対応した自動制御ウインチを製作すること等が必要となる。また、引船方式およびアンカーワイヤ方式によるシステムは同一の手順で自動据付作業を行うものであるが、両者のケーソンの位置制御アルゴリズムは大きく異なっている。この相違は、ワイヤの配置状態およびウインチの台数等の違いによるものである。これら制御アルゴリズムの内容については3.3において詳述する。なお、本研究ではEWSとして東芝製AS4050GXを使用している。

図-1は、上述した①～④の手順にしたがってケーソ

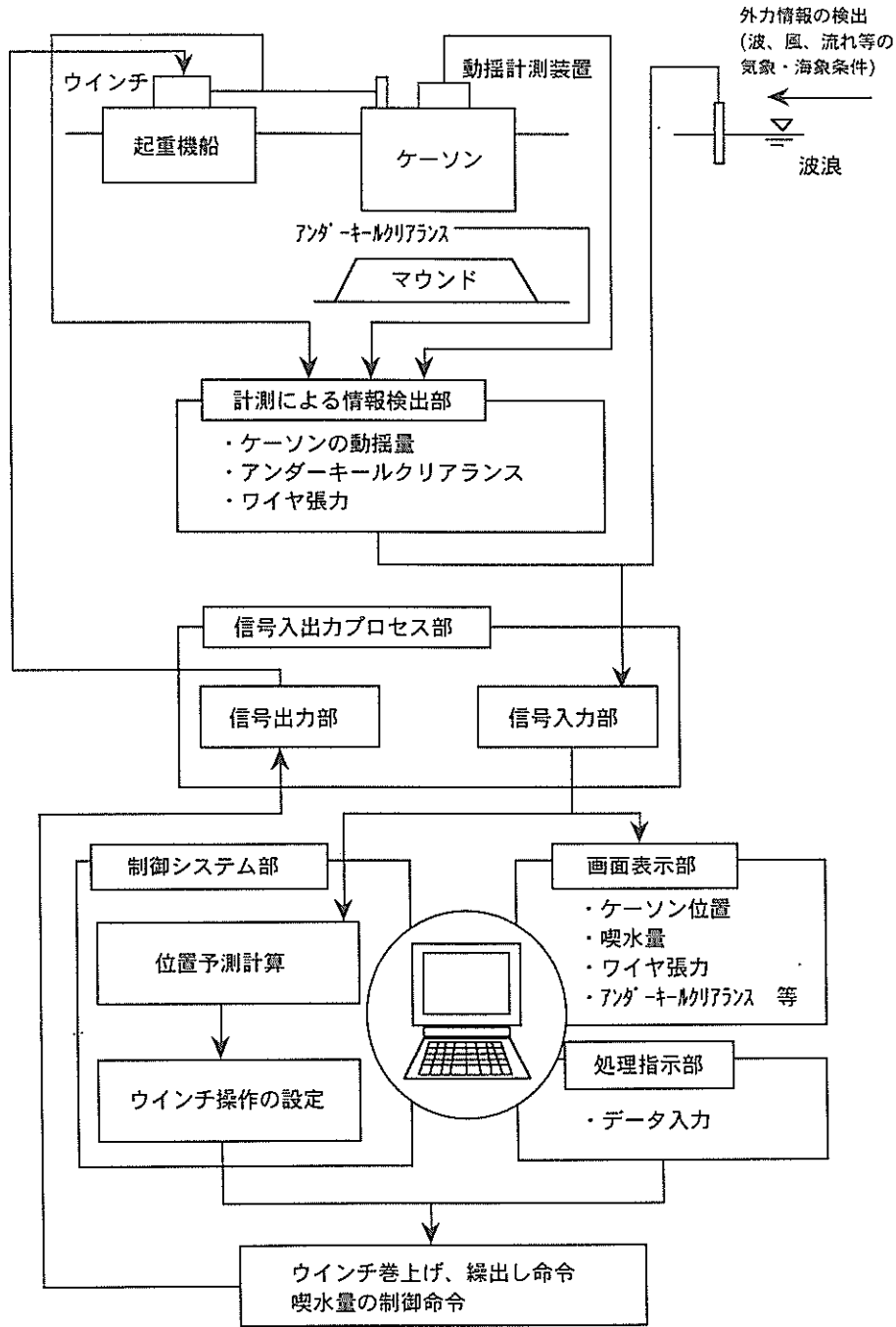


図-1 自動設置システムの概要図

ンの位置制御および据付作業の工程を実行する、ケーソンの自動設置システムの全体概要図を示している。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

ケーソンの位置および動揺量、波高、ワイヤの張力および巻上げ・繰出し量等を計測する。

(b) 信号入出力プロセス部

計測データおよびEWSからの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変換装置を通してデジタルおよびアナログ信号に変換する。

(c) 制御システム部

計測データを用いたケーソンの運動方程式の時間領域計算からケーソンの位置および動揺を予測し、その予測値に基づいてウインチへの制御信号を出力する。

(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。

(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。

これら5つの機能のうち、自動設置システムの核となるものは、(c)制御システム部、(d)画面表示部および(e)処理指示部を組み込んだEWSであるが、ケーソンの高精度な位置制御を行うためには、(a)計測による情報検出部が非常に重要なものとなる。すなわち、ケーソンの位置および動揺の予測をより正確に行うためには、正確で迅速な各種計測データの収集、処理が必要となるからである。水理模型実験では、ケーブルを用いてケーソンの位置および動揺、波高、ワイヤ張力等のデータを計測しているが、実際の現場に適用する際には、据付ケーソンと作業船上のEWSまでの距離が遠くなるため、テレメトリー・テレコントロール・システム（無線によるデータ送受信）を用いることが必須となる。

3.2 引船方式およびアンカーワイヤ方式によるケーソン据付作業

ケーソンの自動設置システムにおける制御アルゴリズムは、現在行われているケーソンの据付手法を詳細に調査・分析して開発した。この調査・分析により、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つに大別できることが分かり、本システムもこれら2方式に対して制御アルゴリズムを構築している。

図-2は引船方式によるシステムの引船およびワイヤの配置状況を示す。また、図-3(1)~(3)はアンカーワイヤ方式によるシステムのアンカーおよびワイヤの配置状況を示す。アンカーワイヤ方式に関しては、3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システムに組み込まれているが、本研究で実施した水理模型実験では、最も安定的なケーソンの位置制御が可能と考えられる図-3(2)のワイヤ配置パターンを採用して実験を実施している。しかし、アンカーワイヤ方式のうち、他の2種類いずれかのワイヤ配置パターンを選択してケーソン据付作業を行うことも可能なようになっている。

図-2に示した引船方式は3隻の引船および4台のウインチから構成されており、一方、図-3(1)~(3)に示したアンカーワイヤ方式は2個あるいは4個のアンカーと6台のウインチおよび動滑車・定滑車から構成されている。図-3(1)のワイヤ配置パターン1と図-3(2)のワイヤ配置パターン2は外観上類似の形式であるが、ワイヤ配置パターン2の方は据付ケーソン上の定滑車を介してワイヤがウインチへ接続されている点が異なる。また、図-3(3)のワイヤ配置パターン3は、ワイヤ配置パターン2のウインチ3およびウインチ4に対応するワイヤをクローズにして既設ケーソン側のアンカーの設置

を行わないものである。ただし、制御アルゴリズムは、ワイヤ配置パターン2とワイヤ配置パターン3が同一のアルゴリズムを用いており、ワイヤ配置パターン1はこれと異なっている。

引船方式においては、引船のけん引力によって風や流れによるケーソンの漂流が妨げられ、ケーソンの動揺に対する安定性が向上したものとなる。しかしながら本自動設置システムは、先にも述べたように引船の制御まで自動的に行うものではないため、統一的にケーソン据付作業の安定性を維持することは難しい。実際に第一報では、模型実験結果によると、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増大し、ケーソンの据付を安定して行うことが困難になることが指摘されている。これに対して、アンカーワイヤ方式は、海底に沈設されたアンカーを用いてケーソンの位置保持をするもので、滑車を用いたワイヤリングにより据付ケーソンに接続されたワイヤを海底方向に斜めに展張させているために、引船方式よりも安定的にケーソンの据付作業を行うことが可能となる。

また、引船方式によるシステムは、アンカーワイヤ方式の場合と比較してワイヤの配置状態がより単純になるため、システムの実用化に際して、作業員を必要としないワイヤリング手法を適用し易い長所がある。事実、防波堤ケーソン自動設置システムの設計の手引¹⁾においても、引船方式による自動設置システムを現実のケーソン据付作業に用いることを前提として解説がなされており、引船方式に対応した自動ワイヤリングシステムを提案している。これに対し、アンカーワイヤ方式によるシステムは、ワイヤの配置状態が引船方式と比較してより複雑になり、滑車も随所に使用していることから、引船方式のような自動ワイヤリングシステムを開発することはやや困難であると考えられる。

このように引船方式によるシステムは、実際の現場への適用性において期待が持てるが、据付ケーソンの位置制御の有効性という点ではアンカーワイヤ方式に劣ると考えられる。それと対照的に、アンカーワイヤ方式によるシステムは、実際の現場への適用性において引船方式よりも劣ると予想されるが、据付ケーソンの位置制御の有効性という点ではより効果的な方法であると言える。

なお、第一報においても述べたが、自動設置システムにおけるケーソンの位置制御とは、ケーソンの水平面内の回転すなわちヨウと、防波堤の中心軸に沿った線である法線に垂直な方向（法線直角方向）すなわちスウェイ方向の制御を行うものである。すなわち、ケーソンの水平面内の位置の制御のみを行い、ケーソンのすべての動

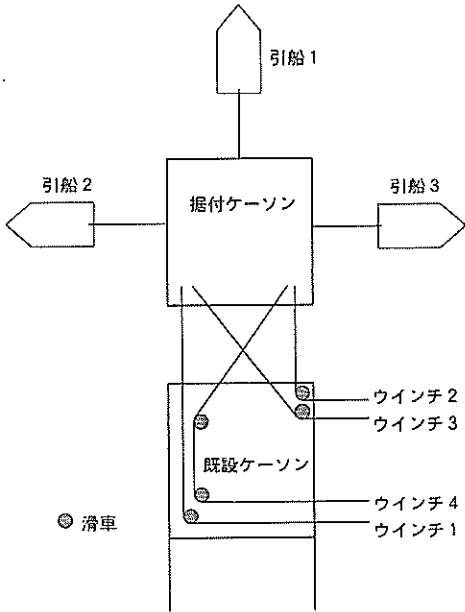


図-2 引船方式によるシステムの引船およびワイヤの配置状況

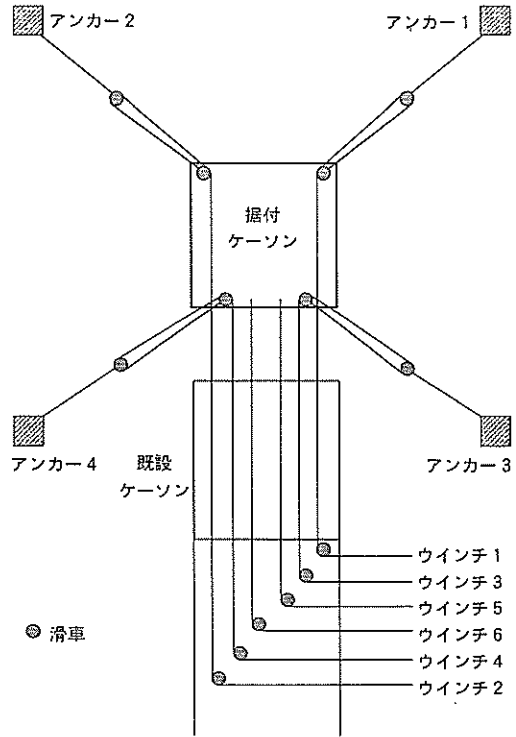


図-3 (2) アンカーワイヤ方式によるシステムのアンカーおよびワイヤの配置状況 (ワイヤ配置パターン2)

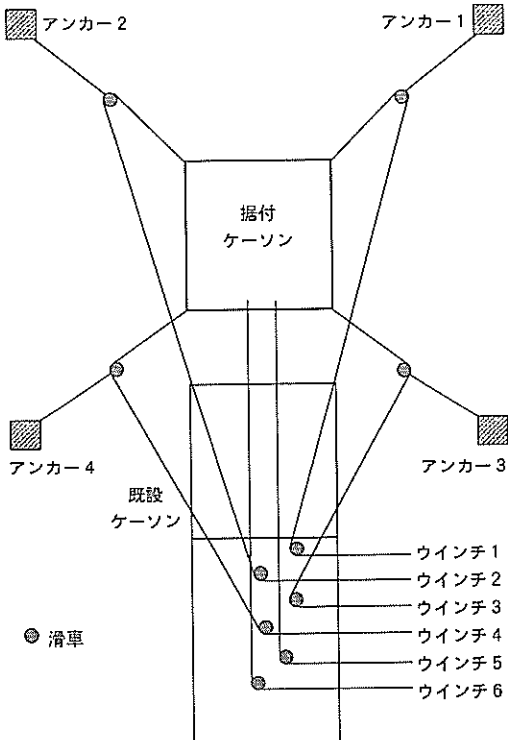


図-3 (1) アンカーワイヤ方式によるシステムのアンカーおよびワイヤの配置状況 (ワイヤ配置パターン1)

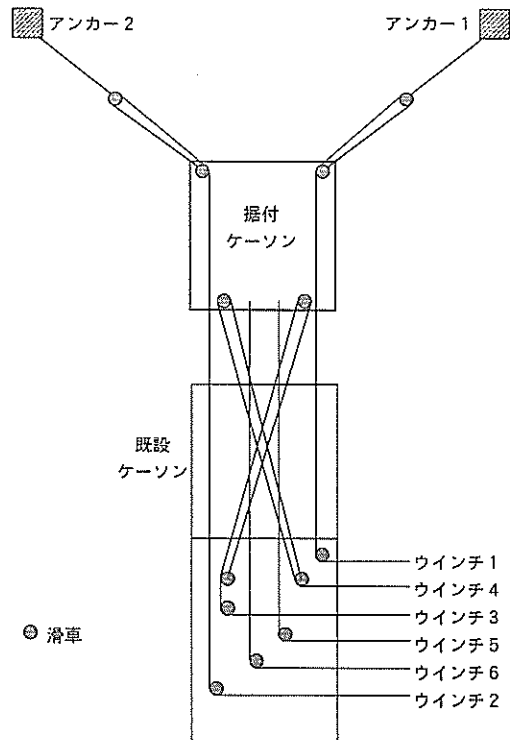


図-3 (3) アンカーワイヤ方式によるシステムのアンカーおよびワイヤの配置状況 (ワイヤ配置パターン3)

揺成分を制御するものではないことに留意する必要がある。

3.3 アンカーワイヤ方式による自動設置システムのアルゴリズム

ケーソンの自動設置システムは引船方式およびアンカーワイヤ方式の2方式でケーソンの据付作業を行うことが可能である。第一報においては引船方式の制御アルゴリズムに関して概説していることから、ここではアンカーワイヤ方式の制御アルゴリズムに関して説明する。また、本研究では、ワイヤ配置パターン2に対してのみ水理模型実験を行っているので、ワイヤ配置パターン2を中心に説明をすることとする。

図-4は、引船方式およびアンカーワイヤ方式によるシステムの制御フェイズを対比させて示したものである。引船方式によるシステムでは、ケーソン据付作業を引寄せ作業、接近作業、設置作業の3つの制御フェイズに分類して、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た。この据付作業の分類は、実際のケーソン据付作業の詳細な調査結果から得られたものである。これに対し、アンカーワイヤ方式によるシステムでは、引寄せ作業と設置作業の2つの制御フェイズに分け、それらについて制御アルゴリズムを作成している。図に示しているように、引船方式における接近作業と設置作業を合わせたものがアンカーワイヤ方式における設置作業となる。また、引船方式によるシステムおよびアンカーワイヤ方式によるシステムともに、引寄せ作業に関しては同一の制御アルゴリズムとなる。ここで、アンカーワイヤ方式によるシステムを用いたケーソン据付手順は、引寄せ作業において、1本の引寄せワイヤによって既設ケーソンから数十メートル離れた位置にある据付ケーソンを数メートルの位置まで引寄せ、設置作業において、据付ケーソン内への注水を行いながら既設ケーソンから数十センチの位置まで接近させた後、マウンド上のケーソン設置位置に着底させることとなる。

なお、水理模型実験は、それぞれの方式に対して、図-4に示した点線内の作業項目について実施している。これは、据付ケーソンを既設ケーソンに接近させ、マウンド上に着底させる接近作業および設置作業がケーソン据付作業の中で特に重要であることと、第一報でも述べたように、ワイヤの配置の関係から引寄せ作業とその後作業を連続して行うことが困難であった理由からである。

図-5は、ワイヤ配置パターン2の場合のアンカーワイヤ方式によるシステムにおける設置フェイズの制御ア

ルゴリズムのフローチャートを示す。この図は、あるタイムステップにおける計測データの読み込み、次タイムステップのケーソン位置予測計算、予測されたケーソン位置および動揺に対する制御動作の一連のフローを、ウインチの制御動作に重点をおいて表したものである。ここでのウインチの制御動作は、主に各ワイヤの巻上げ、繰出しおよび停止であり、EWSからの制御信号によりウインチが一定時間作動することにより実現される。この図から、アンカーワイヤ方式によるシステムの制御アルゴリズムは、ワイヤ配置パターンおよびウインチ台数の関係により、引船方式のときの制御アルゴリズムとはウインチの制御動作が異なっていることが容易に理解できる。

また、図-6は、図-5に対応した主要な制御モードと制御動作を示している。図-5のフローチャート中の①~④の番号が、それぞれ図-6の各制御モードの番号に対応している。ここで、アンカーワイヤ方式によるシステムの設置作業においては、ケーソンの制限制御項目として以下の3項目がある。

- (a) ケーソンの回転の抑制
- (b) ケーソンの引付け速度の維持
- (c) ケーソン重心点の法線直角方向の位置の制御

これらは、図-6の中の①~③にそれぞれ対応する。アンカーワイヤ方式によるシステムにおいては、これらの制御制限制項目を満足するように据付ケーソンの制御が行われる。なお、これらの制限制御項目は引船方式の場合とほぼ同様であるが、引船方式によるシステムにおいては、据付ケーソンの重心点ではなく、ケーソンの手前側中心点および先端側中心点に対して法線直角方向の位置制御が行われる。また、図-6中の④は、(a)~(c)の制限制御項目を満足している状況下で、据付ケーソンを引付けるときのウインチの制御動作を示している。ワイヤ配置パターン2のアンカーワイヤ方式によるシステムに関しては、具体的にはウインチ5およびウインチ6のワイヤの巻上げ、ウインチ1およびウインチ2のワイヤの繰出しにより据付ケーソンの引付けを行い、またウインチ1~4によりケーソンの回転の制御および法線直角方向の位置制御を行うようになっている。すなわち、前述のように、据付ケーソンの法線方向の動揺であるサージ以外の水平面内の動揺成分に対してケーソンが制御される。なお、ケーソンの水平面内の回転に関しては、ケーソンの回転角が事前に設定された許容回転角を超えると、回転方向の制御が行われる。また、同じく事前に設定された法線直角方向のケーソンの動揺の許容範囲をケーソンの重心点を超えると、法線直角方向の位置制御が行わ

制御フェイズの設定

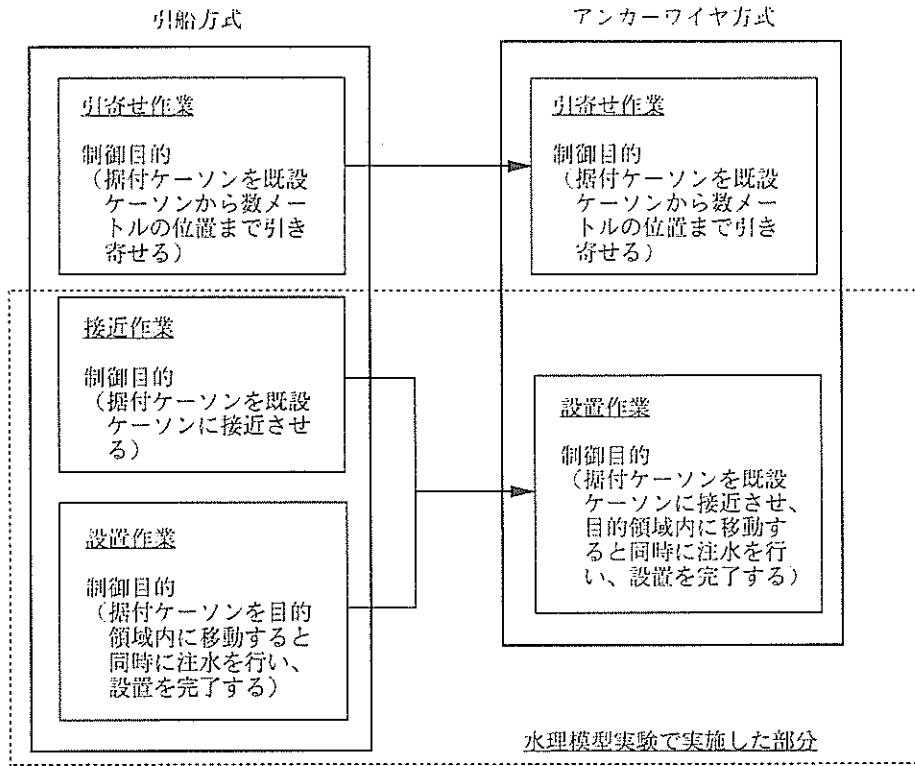


図-4 引船方式とアンカーワイヤ方式の制御フェイズ

れる。

図-7は、ケーソン据付作業開始前のEWSのディスプレイ上の画面表示を示す。ただし、図中のアンダーラインで示した語句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。この表示画面は、引船方式によるシステムで表示される画面とほぼ同様のものである。両者の相違点は、大画面および小画面に表示されているケーソン回りのワイヤの配置状態と、ウインチの使用台数に伴って変更される画面右下に表示されるワイヤ張力およびウインチ巻上げ・繰出し量の数値表示状況である。すなわち、本自動設置システムは引船方式あるいはアンカーワイヤ方式の3種類のワイヤ配置パターンにしたがって画面表示が変更されるようになっている。また、アンカーワイヤ方式によるシステムの表示画面上においても引船方式の場合と同様に、ケーソン据付作業中の計測されたケーソンの位置および動揺がリアルタイムに表示される。この表示画面中に示されている作業継続範囲および法線直角方向のケーソンの動揺の許容範囲は、本研究においては、比較のために引船方式のときと同じ大きさとして設定した。これらの範囲および上述したケーソンの許容回転角は、実際の現場におけ

るケーソン据付作業に応じて任意に設定することが可能である。ただし、アンカーワイヤ方式におけるケーソンの法線直角方向の動揺の許容範囲は、図-6に示したようにケーソンの重心点に関するものであり、引船方式の場合のようにケーソンの手前側中心点あるいは先端側中心点に関するものではない。また、既設ケーソン上部の小さな矩形範囲は、ケーソン手前側中心点に対する設置目標の範囲である。アンカーワイヤ方式によるシステムにおいても引船方式のときと同様に、据付作業の最終段階では、据付ケーソンは手前側中心点がこの範囲内に入るように制御され、マウンド上に着底される。

3.4 ケーソンの位置予測計算方法

自動設置システムを用いたケーソン据付作業においては、ケーソンの位置制御を行うウインチ操作信号を決定するために、リアルタイムに計測される波高、ケーソンの位置および動揺量、ワイヤ張力を基に各タイムステップごとのケーソンの位置および動揺を予測している。具体的には、ケーソンに関する浮体の運動方程式（6元2階連立常微分方程式）をRunge-Kutta法を用いて時間領域で計算し、ケーソンの位置および動揺を予測している。このケーソンの位置予測計算方法は、引船方式によるシ

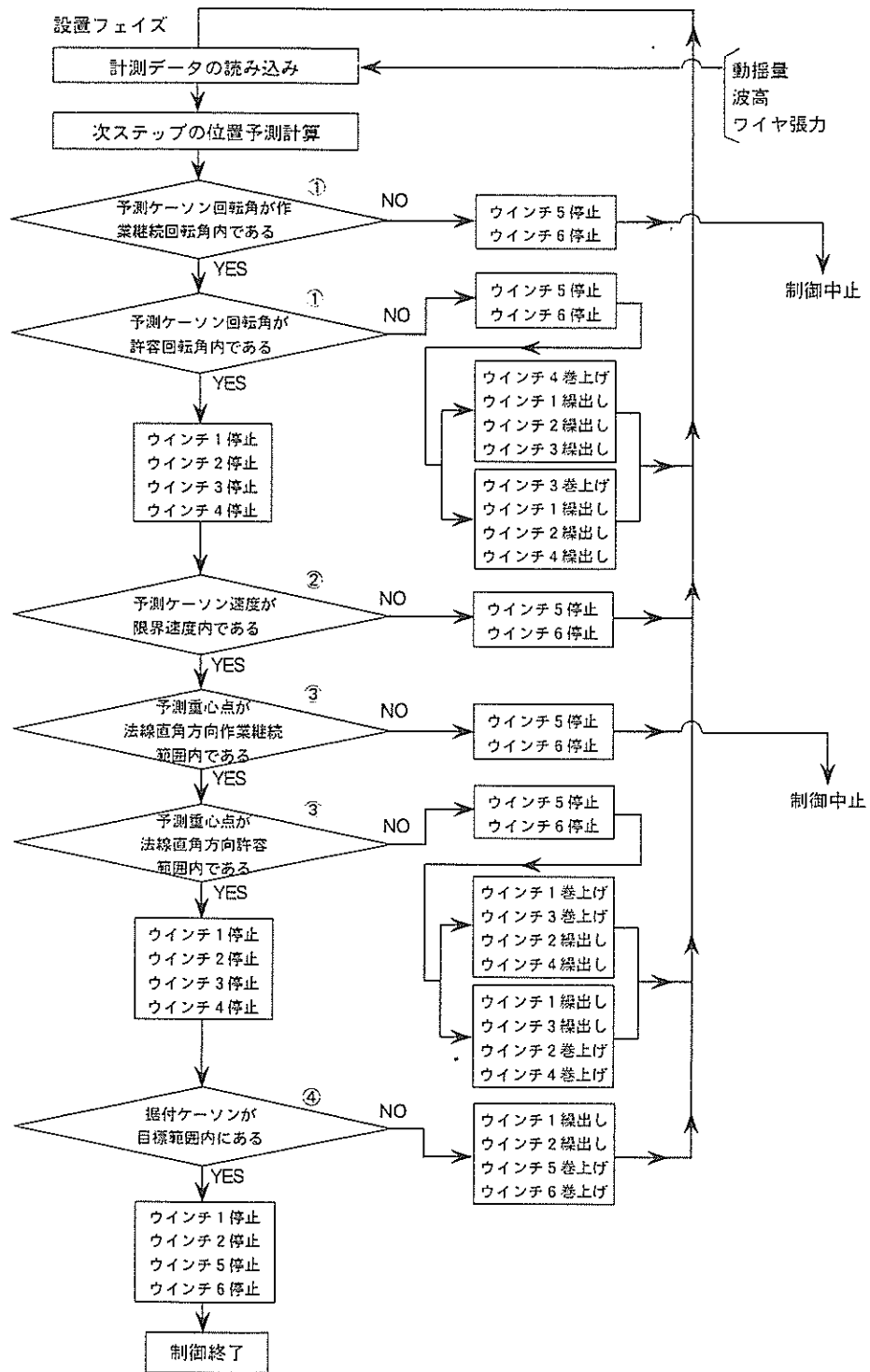


図-5 設置フェイズの制御アルゴリズムのフローチャート（ワイヤ配置パターン2）

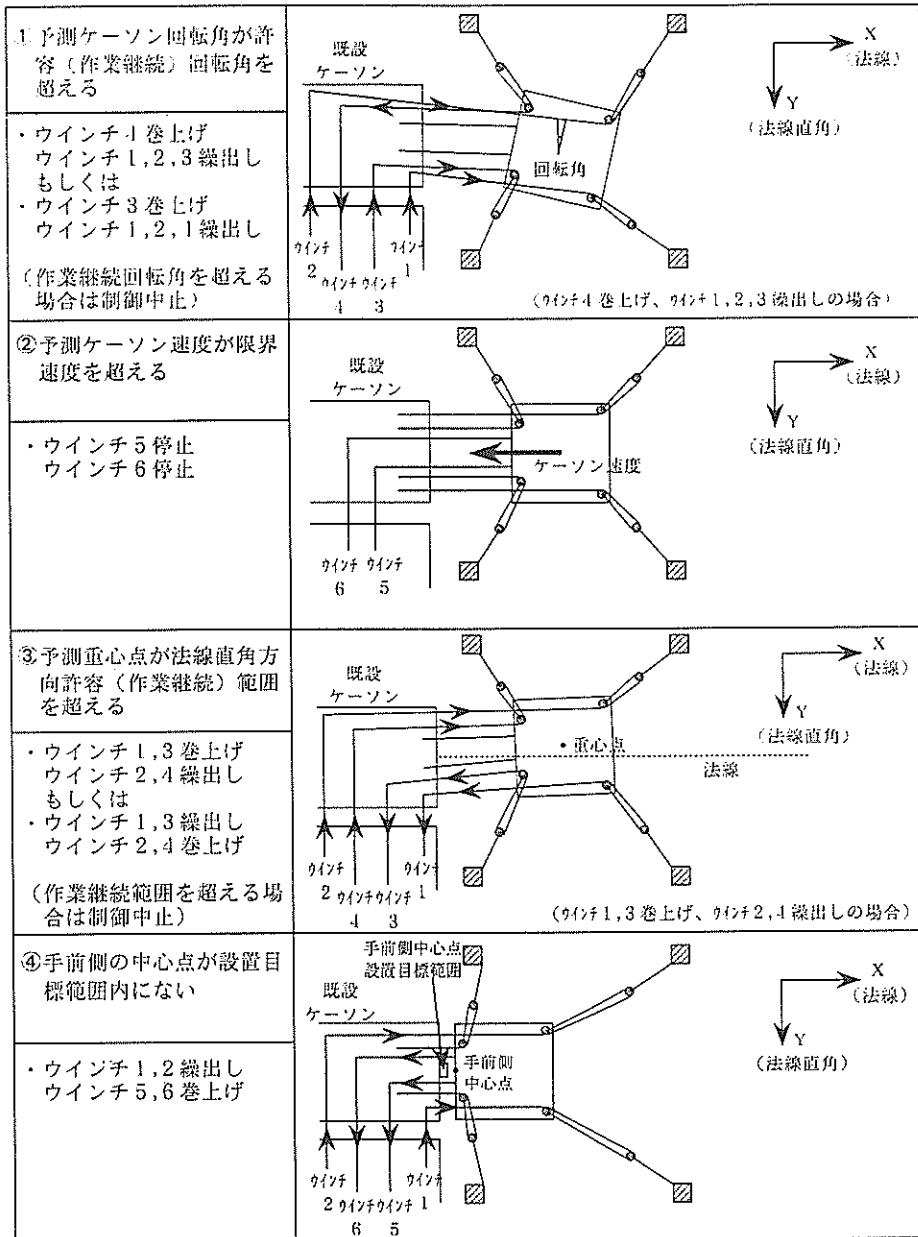
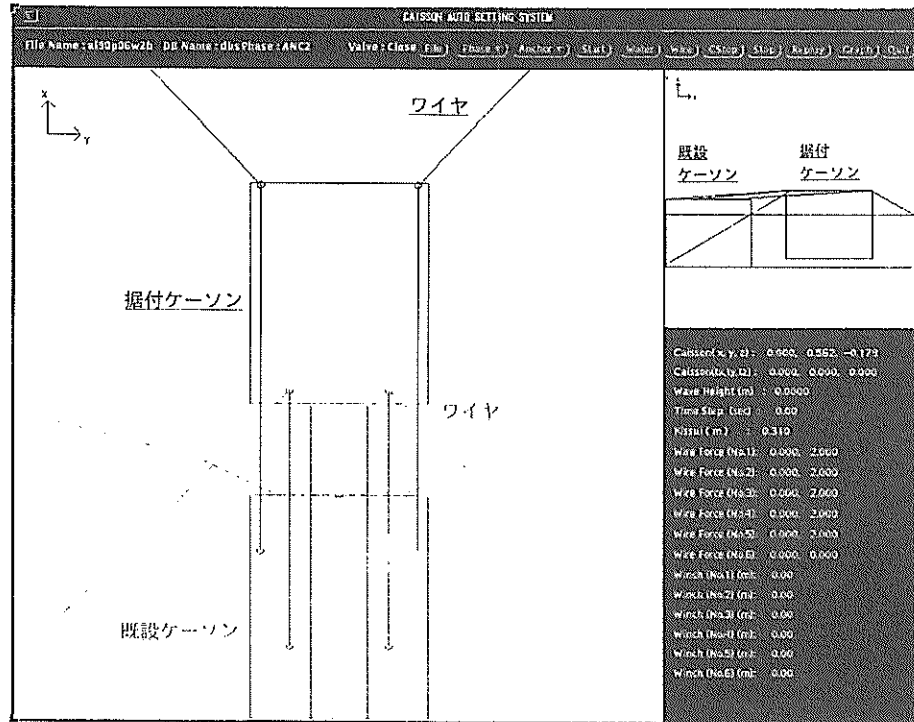


図-6 主要な制御モードと制御動作

システムおよびアンカーワイヤ方式によるシステムともに全く同一のものである。ただし、アンカーワイヤ方式によるシステムにおいては、浮体の運動方程式の各係数項の中で、ワイヤ張力に関する項のみが引船方式の場合と異なっている。これは、両方式において、引船あるいはアンカーの使用、ワイヤの配置状態およびウインチ台数等が相違しているためである。なお、本研究の水理模型実験においては、引船方式の場合と同様に、ケーソンのロールの動揺に対して特に影響が大きい非線形粘性減衰

に関してはその影響が小さいと仮定して、浮体の運動方程式中の非線形減衰項は考慮していない。さらに環境外力に関しても、水理模型実験の簡素化の意味合いから波浪荷重のみを検討するものとし、引船方式の場合と同様に、これ以外の風や流れによる荷重等は考慮していない。このような風や流れによる荷重に対するケーソンの自動設置システムの有効性についての検証もまた、今後必要とされる検討課題であると考えられる。



図ー7 EWSのディスプレイ上の画面表示（据付作業開始前）

4. アンカーワイヤ方式による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

アンカーワイヤ方式による自動設置システムの水理模型実験を、引船方式のときと同じ港湾技術研究所所有の平面水槽（長さ25m×幅10m×深さ1m）にて実施した。実験においては、引船方式の場合と同様に、その背後に消波砕石を敷設した2台の造波機を用い、水槽側面からの反射波を極力低減させるために平面水槽内の他の3辺に沿って消波工を配置した。

アンカーワイヤ方式の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、アンカーおよび滑車、ウインチ模型およびウインチ制御装置から構成される。引船方式の場合と比較すると、既設ケーソン模型、マウンド模型、注水装置は全く同一のものであるが、アンカーワイヤ方式によるシステムでは、引船を模擬した架台に代えてアンカーと滑車を用い、引船方式のときの4台のウインチに2台を加えた6台のウインチと、それに伴って6台のウインチを制御可能なように改造したウインチ制御装置を使用している。また、据付ケーソン模型については、ワイヤ配置

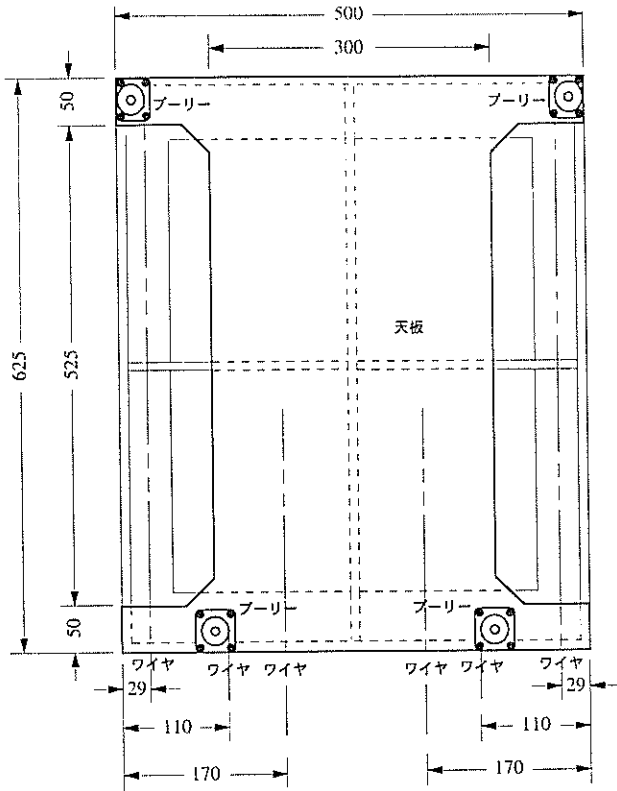
パターン2のアンカーワイヤ方式に対応して、その天板を滑車を取り付けたものに改良している。

以下の論文中では、第一報と対応するように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している。

(2) 据付ケーソン模型

据付ケーソン模型は、上述のようにアンカーワイヤ方式用に天板を改良したものを使用した。引船方式の模型では長方形の透明アクリルの天板を用いたが、アンカーワイヤ方式の場合は据付ケーソン上に滑車を取り付ける必要性から天板を新しく製作し直し、既存の天板と取り替えて用いている。図ー8は、このケーソン天板模型の平面図を示している。この天板模型は、ケーソン模型内部の4つのセルに注水を行うために必要なスペースを確保するような形状となっている。天板上には、ケーソンの動揺量のうち回転成分（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ことから、この点を考慮して滑車の位置を決定している。

また、据付ケーソン模型およびそれに対応する実機ケーソンの諸元を表ー1に示す。据付ケーソン模型は7,500tfの実機ケーソンの模型縮尺1/40のサイズのもので、アンカーワイヤ方式の模型と引船方式の模型とは同一の諸元となる。



単位：mm

図-8 据付ケーソン天板模型（アンカーワイヤ方式）

表-1 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

(3) 自動設置システム実験模型の全景

水理模型実験におけるアンカーワイヤ方式の自動設置システム模型の設置状況を写真-3に示す。この写真では、6台のウインチ模型がグリーン色の既設ケーソン模型に上載されているのがわかる。ただし、6台のウインチ模型の合計幅は既設ケーソン模型の幅より大きくなり、既設ケーソン幅方向に横一列に設置できないため、前後方向に少しづつずらして設置している。透明アクリル製の据付ケーソン模型は既設ケーソン模型の前方に浮いており、この位置からケーソン据付作業が実施される。また、据付ケーソン模型内の4つのセルに向かって、4本のグリーン色の注水ホースが挿入されている。これらはスチール製パイプに接続され、後方既設ケーソン横の注

水装置の透明アクリル製の貯水タンクに繋がっている。写真向かって左側には1台の波高計が設置されているが、その手前に、水槽底に設置された4個のアンカーのうちの1つを見ることができる。アンカーは長方形をしたスチール製であり、オレンジ色に防錆塗装されている。据付ケーソン模型は、これらのアンカーから伸びたワイヤにより位置保持がなされている。アンカーワイヤ方式の自動設置システム模型は、引船を模擬した3台の架台を使用しないことから、非常にすっきりとした外観となる。

また、ケーソン据付作業中の様子を写真-4に示す。この写真は、ほぼ据付作業が完了する時点におけるものであり、据付ケーソン模型が既設ケーソン模型の手前に設置されている状況を写している。据付ケーソンへの注水は、引船方式の場合と同じように既設ケーソン上に1名の人を配置して手動で行っている。

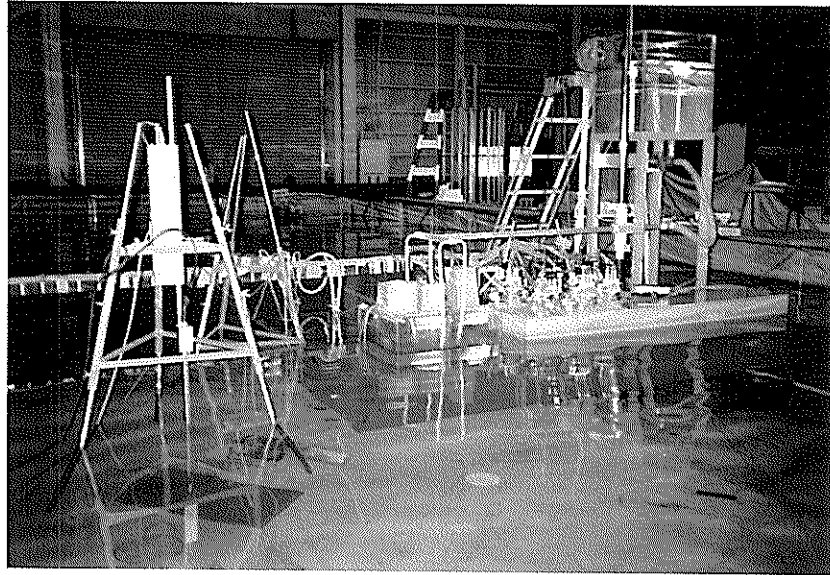
なお、本実験においても引船方式による自動設置システムの水理模型実験のときと同様に、据付ケーソンの初期喫水を31.5cm (12.6m)、水深を50.0cm (20.0m)と設定した。

(4) 注水装置

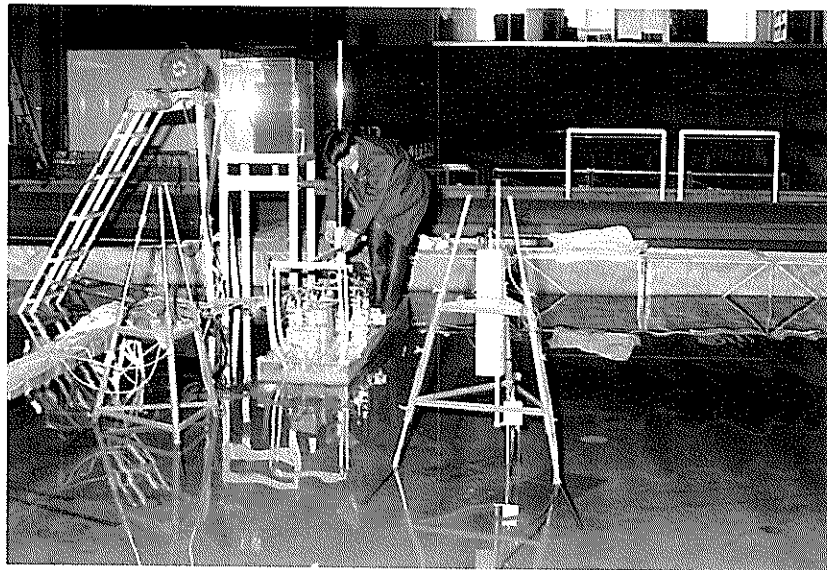
水理模型実験では、据付ケーソンへの注水を行うために注水装置を用いている。この注水装置は引船方式のときに使用したものと同一のものであり、アンカーワイヤ方式用に改良した部分はない。また、据付ケーソン模型への注水は、引船方式の場合と同じ一定の注水速度で実施している。よって、実際のケーソン据付工事のような状況に応じた可変的な注水を実施しているわけではないことに注意を要する。

(5) ウインチ模型およびウインチ制御装置

アンカーワイヤ方式による自動設置システムでは、6台のウインチを使用する。6台のうち4台は引船方式によるシステムの模型実験に用いたものを流用し、残り2台は他の4台と同じ形状、機能を持つように新規に製作した。また、ウインチの台数が増えたことに伴って、ウインチ制御装置も改良した。写真-5にウインチ制御装置を示す。向かって左側の装置が引船方式のときに用いた4チャンネル用ウインチ制御装置、そして右側の装置が新たに製作した2チャンネル用ウインチ制御装置であり、それぞれ4台および2台のウインチを制御することができる。これら2台のウインチ制御装置は躯体としては別個のものであるが、ケーブルで2台を接続することで1つのシステムとして機能し、6台のウインチを制御可能になっている。なお、ウインチを手動で操作する場合には、制御装置前面に表示された各チャンネル下の操



写真－3 自動設置システム模型の設置状況



写真－4 ケーソン据付作業中の様子

作ボタンを使用することとなる。

ここで、水理模型実験におけるワイヤ巻上げ速度は、静水中実験では、ウインチ1～4については 0.30cm/s (1.14m/min)、ウインチ5およびウインチ6については 0.15cm/s (0.57m/min)とした。一方、不規則波中実験でのワイヤ巻上げ速度は、ウインチ1～4については 0.25cm/s (0.95m/min)、ウインチ5およびウインチ6については 0.125cm/s (0.47m/min)とした。つまり、ウインチ1～4のワイヤ巻上げ速度はウインチ5およびウインチ6の2倍となるように設定した。これは、図－3

(2)に示したワイヤ配置パターンの図からも理解できるように、ウインチ1～4に対応する各ワイヤは途中に滑車を2個介しており、ウインチ5およびウインチ6と同程度に据付ケーソンを引付けるためには、2倍の速度でワイヤを巻取る必要があるからである。また、静水中実験と不規則波中実験とでワイヤ巻上げ速度が違うのは、不規則波中実験の場合は、据付ケーソンが既設ケーソンに近づくのが早すぎずかつ遅すぎないように、引船方式のときと同様なケーソン据付作業状況が実験上で再現されるように速度を設定したためである。

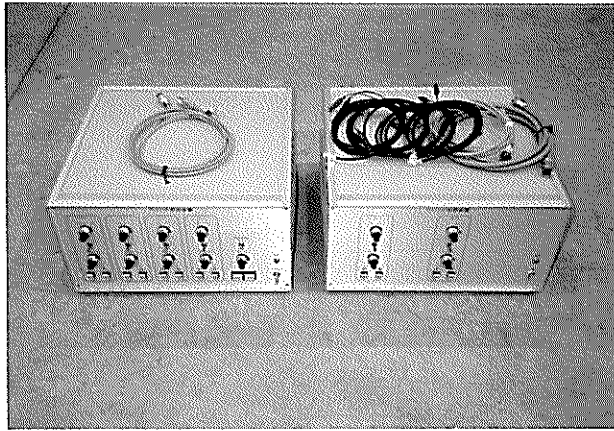


写真-5 ウインチ制御装置

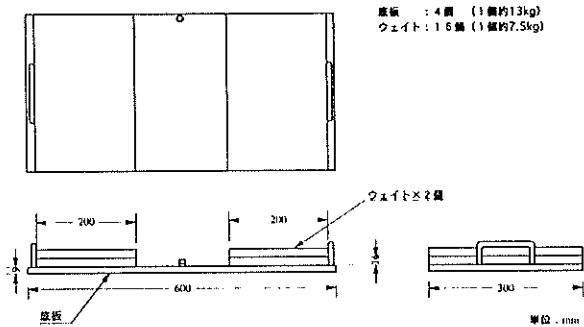


図-9 アンカー模型

また、模型実験では、ウインチ5およびウインチ6に対応するワイヤについては据付ケーソン側のワイヤ先端に、ウインチ1～4に対応するワイヤについてはワイヤ上の動滑車とアンカーとを結ぶワイヤの滑車側に、ばね定数100kgf/m (1.6tf/cm) のばね (コイルスプリング) を取り付けました。これらのばねは、引船方式の場合と同様に、現場でのワイヤの変位復元力特性を再現するために使用している。

(6) アンカーおよび滑車

アンカーワイヤ方式によるシステムでは、引船を模擬した架台を用いず、代わりにアンカーと滑車を使用している。本研究では、先に示したワイヤ配置パターン2に対応して、4個のアンカー、アンカーワイヤ方式用に製作した天板上の4個の定滑車および据付ケーソンとアンカー間の各ワイヤに設けられる動滑車を使用した。引船方式の場合は、現実の3隻の引船をそのまま縮小して模型実験上で正確に再現することが困難であったが、アンカーワイヤ方式の場合は、実際のアンカーおよび滑車がある程度まで相似縮小した模型として製作した。図-9に使用したアンカーの構造図を示す。ここでは、アンカーは重力式とし、この図で示すようにスチール製の長方

形底板の上に長形状のウェイトを重ねて、アンカーとしての能力を持たせるようにした。底板の一部には、ワイヤ取付用の穴と運搬用の取っ手が付属している。また、動滑車は水中に没水することもあるために水中仕様として製作した。

4.2 データ計測および制御システム

(1) 概要

アンカーワイヤ方式におけるデータ計測および制御システムは、引船方式によるシステムと大部分同じものとなる。図-10は、アンカーワイヤ方式による自動設置システムの水理模型実験で使用した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している。また、図-11は、このデータ計測および制御システムのブロック図を示している。

ここで言うデータ計測および制御システムとは、①各種計測装置によるデータの計測、②計測データのA/D変換装置によるデジタル値への変換およびEWSへの転送、③EWS内のプログラムによる据付ケーソンの位置および動揺の予測、④予測値に対応したEWSからのウインチ操作信号の出力、⑤ウインチ操作信号のD/A変換装置によるアナログ値への変換およびウインチ制御装置への送信、⑥ウインチ操作信号に基づいたウインチ制御装置によるウインチの制御、という一連のデータ計測・制御を行うシステムを指している。このフローは、図-11を見ることにより容易に理解できる。自動設置システムでのデータの計測およびウインチの制御は、EWSによって自動的に行われる。ここで、アンカーワイヤ方式によるシステムの水理模型実験での計測データは、引船方式のときと同様に、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。同じく、出力データはウインチの制御信号 (ワイヤの巻上げ・繰出し操作命令) である。ただし、アンカーワイヤ方式によるシステムは、ウインチを6台使用する点が引船方式の場合と異なる。

なお、図-4に示したように、アンカーワイヤ方式の場合は水理模型実験で検討した制御フェイズが設置作業のみとなるため、引船方式のように接近作業から設置作業へ制御フェイズを移行させるための据付ケーソンの位置を設定する必要はない。また、ケーソン据付作業の作業継続範囲、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する必要があるが、ここでは引船方式のときと同一に設定した。したがって、後に述べるケーソンの設置誤差の許容範囲も引船方式のときと同じ値に設定しており、

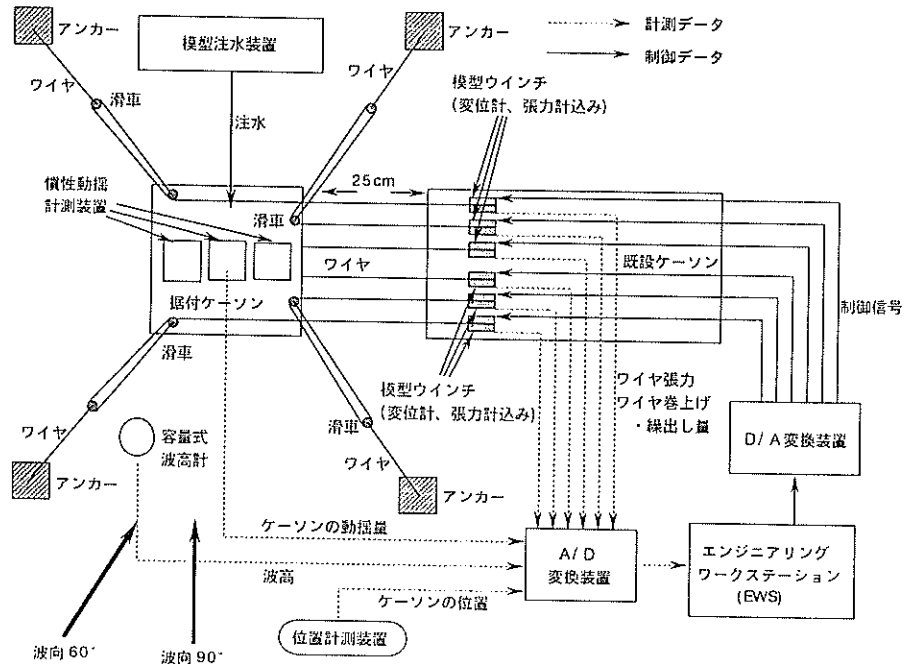


図-10 データ計測・制御システムおよび模型の配置の概略図

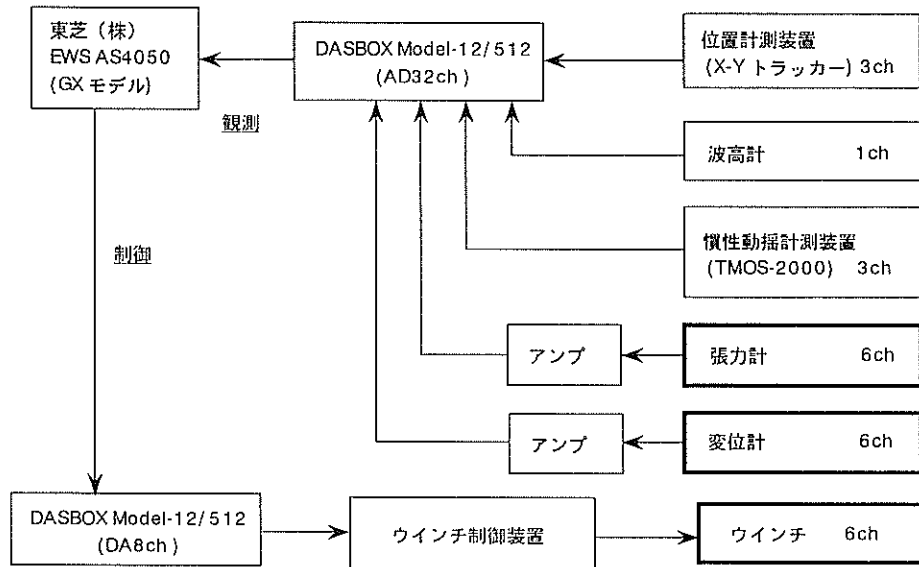


図-11 データ計測・制御システムのブロックチャート

引船方式の実験結果と定量的に比較することも可能になる。

(2) ケーソンの動揺成分および座標系

図-12は、アンカーワイヤ方式によるシステムの水理模型実験で使用した据付ケーソンの動揺成分および座標系を示す。これらの関係は、引船方式の場合と全く同一である。すなわち、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

計測し、動揺の並進運動成分（サージ、スウェイ、ヒーブ）は図に示したような既設ケーソンに固定された絶対座標系で計測した。よって、本研究で用いられる動揺の並進運動成分は、一般的に使用されるサージ、スウェイ、ヒーブと異なることに注意が必要である。また、据付ケーソンの動揺6成分の計測には、引船方式のときと同様に、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、

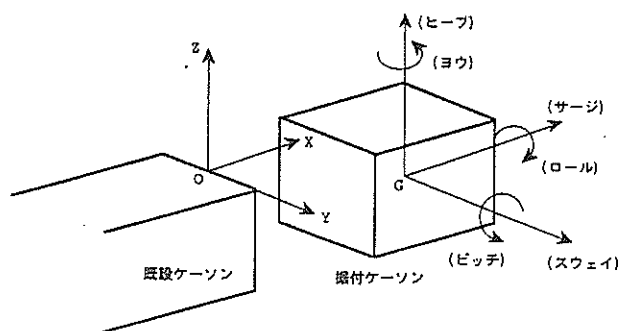


図-12 ケーソンの動揺6成分および座標系

(株) トキメック製) を使用した。ケーソンの動揺6成分のうち、サージ、スウェイ、ヒープは前者により、ロール、ピッチ、ヨウは後者により計測される。

(3) A/D・D/A変換装置

A/D・D/A変換装置もまた、引船方式の場合と同様に、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。ただし、アンカーワイヤ方式の場合は、ウインチの台数の増加に伴い、計測および制御に使用するチャンネル数が多くなる。また、実験中、本装置によりデジタル化される計測データはEWSのハードディスクに保存されるが、これらの計測データは引船方式のときと同じ項目とした。

(4) 慣性動揺計測装置

慣性動揺計測装置^{11),12)}は、アンカーワイヤ方式用に製作された据付ケーソンの天板上に、引船方式の場合と全く同じ位置に同じ配置で取り付けられた。模型実験では、本装置によってケーソンの動揺角(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している。計測された据付ケーソンの重心点加速度と角速度はケーソンの位置予測計算には用いていないが、計測データとしてEWSのハードディスクに記録している。

(5) 位置計測装置

水理模型実験で使用した位置計測装置は、本体の他に2台のCCDカメラと2台のモニターで構成される。アンカーワイヤ方式によるシステムの水理模型実験では、これらの機器も引船方式の場合と同じ位置に配置した。また、本装置がケーソンの動揺の並進運動成分を測定するために必要となる豆電球も、慣性動揺計測装置上の同じ位置に取り付けた。

(6) 波高計

容量式波高計もまた引船方式の場合と同じ位置に1台設置した。

(7) ウインチ模型

水理模型実験においては、アンカーワイヤ方式によるシステムでは既設ケーソン上に6台のウインチが設置される。このウインチ模型に組み込まれた張力計および変位計によって、ワイヤ張力およびワイヤの巻上げ・繰出し量が計測される。また、ウインチの据付ケーソンに対する制御動作は、引船方式と同じワイヤの巻上げ、ワイヤの繰出し、停止、ワイヤのたるみ巻上げの4種類であり、これらは、ウインチの制御信号としてはそれぞれ、1, -1, 0, 2に対応する。ここで、アンカーワイヤ方式の場合は、すべてのウインチに対してたるみ巻上げ機能を導入している点が引船方式との相違点である。引船方式の場合は、基本動作が巻上げであるウインチ1およびウインチ2については、たるみ巻上げ機能を付加していない。

4.3 実験ケースおよび実験状況

アンカーワイヤ方式によるシステムの水理模型実験は、引船方式の場合と同様に静水中および不規則波中で実施した。据付作業開始前の据付ケーソンと既設ケーソン間の距離は、図-10にも示しているように25.0cm (10.0m) で、引船方式の場合と同じ条件とした。なお、アンカーワイヤ方式によるシステムの水理模型実験は規則波中でも実施しているが、第一報の内容との統一を図るために、本報告でも規則波中実験の結果は割愛している。また、アンカーワイヤ方式によるシステムの制御アルゴリズムの妥当性は、実験終了時にスケールで測定した据付ケーソンと既設ケーソンとの設置誤差によって定量的に検証することができる。本研究では、実験で測定されたケーソンの設置誤差と現状での据付作業におけるケーソンの設置誤差とを比較してアルゴリズムの有効性を検証するとともに、引船方式によるシステムの実験結果とも比較を行うことで、アンカーワイヤ方式によるシステムの優位性について考察、検討を加える。

(1) 静水中実験ケース

静水中における実験ケースを表-2に示す。ここで示した静水中実験ケースは、据付ケーソンの初期回転角を0°とし、初期位置を3種類変えた合計3ケースである。引船方式によるシステムの静水中実験では、初期位置3種、初期回転角3種を掛け合わせた合計9ケースについて実験を行っている。しかしながら、アンカーワイヤ方式の場合は、据付ケーソンのワイヤによる拘束のために初期回転角を設定できないケースがあり、それらを除いた5ケースについて実験を実施した。また、実験を実施した5ケースの中でもケーソンの初期回転角を設定した

2 ケースについては、ケーソン据付作業開始前のワイヤの初期張力の設定がアンバランスであったために、有意な実験結果を得ることができなかつた。このようなことから、アンカーワイヤ方式の場合は、ケーソンの初期位置のみを変更した上述の3 ケースについて考察することとした。ここで、アンカーワイヤ方式によるシステムの実験におけるケーソンの初期位置は±6.0cm (2.40m) であり、引船方式の場合の初期位置±3.2cm (1.28m) と異なることに注意が必要である。なお、ケーソン初期位置のずれの符号は図-12に示した方向を正としている。

表-2 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 (-6.0cm)	0
法線上 (0.0cm)	
法線内側ずれ (+6.0cm)	

(注) 数値は模型値である。

(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-3に示す。この表は実験の波浪条件を示したもので、不規則波中実験は、引船方式によるシステムの実験結果との比較のために引船方式のときと同一条件で実施した。すなわち、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) ~3.75cm (1.5m) までの3種類、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、アンカーワイヤ方式によるシステムのケーソン据付作業に対する波向、有義波高および有義波周期の影響を評価した。2種類の波向の作用方向は、図-10に示している。また、実験結果の再現性を確認するために、同一のケースを2回実行している。さらに、実験開始前の据付ケーソンの初期状態を静水中実験のケースの中で初期位置が法線上かつ初期回転角0° とした点、波浪スペクトルとしてプレットシュナイダー・光易型を使用した点も引船方式の場合と同様である。

(3) 水理模型実験の状況

実験における据付作業前および据付作業後の据付ケーソン模型、既設ケーソン模型およびウインチ模型等の状況を写真-6および写真-7に示す。既設ケーソンから25.0cm (10.0m) ほど離れた位置に据付ケーソンが静的釣り合い状態を維持しながら浮かんでおり（写真-6）、この位置から据付作業が開始された後、最終的には既設ケーソン前に正確に設置される（写真-7）。

ウインチは既設ケーソン上に6台設置されていて、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3

表-3 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。

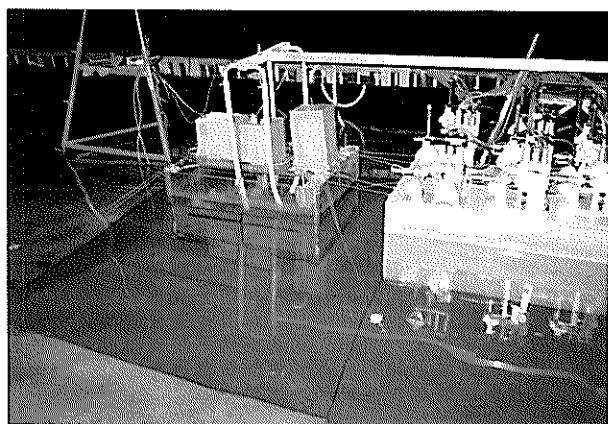


写真-6 据付作業開始前のケーソン模型とウインチ模型
(不規則波中実験)

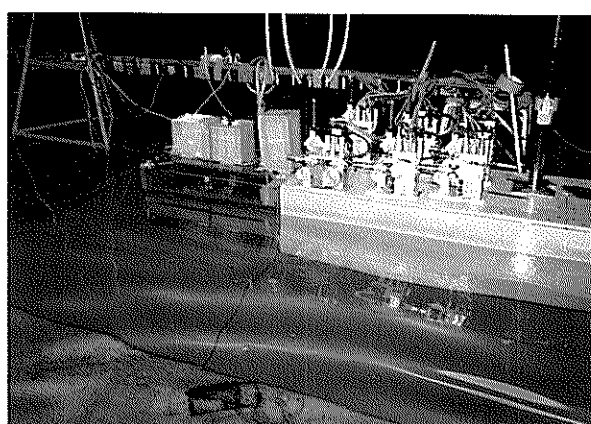


写真-7 据付作業終了後のケーソン模型とウインチ模型
(不規則波中実験)

つの機器が搭載されている。位置計測装置によるケーソン位置の追跡点である豆電球は、向かって一番左側の箱の上に取り付けられている。これらの配置状況は、引船方式の場合と一致している。また、写真-6の中央のやや下方には水中に没水している1個の動滑車を観察することができる。他の3個の動滑車はこの写真ではよく認識できないが、動滑車を介した据付ケーソン側のワイヤとアンカーと動滑車を結ぶワイヤによりアンカーと据付ケーソンが接続され、ケーソン全体としてみると水槽底に向けて4方向に展張された係留状態になる。

5. 水理模型実験結果

本章ではアンカーワイヤ方式によるシステムの水理模型実験の結果について記述する。ここでは、本章の構成を第一報と同じにすることにより、第一報において示した引船方式によるシステムの水理模型実験結果と比較し易いようにした。

まず、本章の構成について説明する。初めに、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、波浪条件やケーソン据付方式の相違によるケーソンの制御状況の差異について述べる。続いて、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、異なった波浪条件下において設置目標位置に設置されるまでのケーソンの動揺性状について考察する。5.3では、据付作業中のケーソンの動揺時刻歴を示し、波浪条件およびケーソンの喫水変化とケーソンの動揺特性の変化との関連性について明らかにする。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

に着底するまでのケーソン位置制御の状況、ワイヤ張力の変化等について説明する。また、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で、波浪条件とケーソンの動揺量との相関性について考察する。最後に、5.6において、据付作業終了時におけるケーソンの設置誤差を測定した結果より、アンカーワイヤ方式によるシステムの有効性、優位性の範囲を有義波高、有義波周期に基づいて検討する。

ここで、以下の文章中では短周期波、長周期波という用語を多用しているが、第一報と同様に、短周期波は有義波周期0.95s (6.0s) および1.27s (8.0s) の波浪を、一方、長周期波は有義波周期1.58s (10.0s) および1.90s (12.0s) のうねり性の波浪を表すものとする。

5.1 制御信号出力結果

(1) 概要

全実験ケースにおいてEWSからウインチへの制御信号の出力回数を計測している。制御信号はタイムステップごとに出力され、-1, 0, 1, 2のいずれかの値を示すため、その出力回数をカウントすることができる。そして、どのウインチに巻上げ・繰出し等のどのような操作命令を出力したかによって、据付ケーソンに対してどのような制御動作を行ったかを調べることができる。

ウインチの作動状況の組み合わせ(制御モード)と制御動作は既に図-6に示している。ここで用いる引付け位置制御信号とはケーソンの引付けを行うウインチへの指令信号を表し、図-6では④の制御モードに対応する。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指令信号で、同図では③の制御モードに該当する。また、回転方向位置制御信号とはケーソン

の回転（ヨウ）方向の位置制御を行う指令信号であり、同図では①の制御モードに該当する。なお、ここでは引船方式の場合と同様に、制御信号出力回数としてワイヤの巻上げおよび繰出し（それぞれ1および-1に対応）の操作命令をカウントしており、ウインチ停止およびワイヤのたるみ巻上げ（それぞれ0および2に対応）の操作命令はカウントしていない。

(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。この図から、初期位置のずれがあるケースほど全制御信号出力回数が増えていることがわかる。引船方式の場合は、全体の傾向として初期位置のずれがあるケース、また初期回転角があるケースほど信号出力回数が増えることが示されており、アンカーワイヤ方式によるシステムでも同様な傾向を示すと言える。

図-13(2)～(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、回転方向位置制御信号と法線直角方向位置制御信号の和の割合を示す。各ケースにおいて、これらの割合を合計すると1.0となる。なお、ケーソンの位置制御アルゴリズムに基づいて、引船方式の場合は引付け位置制御信号出力回数の中に引付け位置制御信号出力回数と回転方向位置制御信号出力回数を含んで計測したが、アンカーワイヤ方式の場合はこの両者を区別して計測しているため注意が必要である。本報告では、同じケーソンの位置制御を行う制御信号であるという観点から、回転方向位置制御信号と法線直角方向位置制御信号とを合わせて検討することとした。

これらの図を見ると、引付け位置制御信号の割合は初期位置が法線上のケースにおいて大きくなり、一方、回転方向位置制御信号と法線直角方向位置制御信号の和の割合は初期位置のずれがあるケースにおいて大きくなることわかる。すなわち、初期位置のずれがあるケースほどケーソンの回転方向および法線直角方向の位置制御が多く、引付け位置制御が少なく行われている。

また、ここでは示していないが、アンカーワイヤ方式の場合の引付け位置制御信号出力回数の割合と回転方向位置制御信号出力回数の割合の合計は、いずれのケースでも約0.6のほぼ同一値を示した。一方、引船方式の場合における引付け位置制御信号出力回数の割合は約0.8～0.9であった。言い換えると、アンカーワイヤ方式の場合には法線直角方向の位置制御が多く行われ、引船方式の場合にはそのような制御が少なく行われているということになる。これは、アンカーワイヤ方式によるシステムでは据付作業開始後すぐに法線直角方向位置制御を行う制御アルゴリズムとなっているが、引船方式によるシ

ステムの制御アルゴリズムでは、据付ケーソンが既設ケーソンから5.0cm（2.0m）の位置にきたときにはじめて法線直角方向位置制御が開始されることによる。

(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2.50cm（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。図の縦軸は制御信号の出力回数、横軸は模型実験における有義波周期である。ここでは不規則波中実験は全ケースについて2回行っているため、それらの平均値を図中に示した。図中の（ ）内の数値は実機換算値を示しており、静水中実験結果の中で初期位置が法線上のケースの制御信号出力回数も比較のために合わせて載せている。

図-14(1)を見ると、短周期波（有義波周期0.95s（6.0s）および1.27s（8.0s））中では、波向60° のときの制御信号出力回数が波向90° の場合より多く、長周期波（有義波周期1.58s（10.0s）および1.90s（12.0s））中では波向に拘らず信号出力回数はあまり変わらないことがわかる。引船方式の場合は、信号出力回数は全般的に見ると波向によらないという結果であったことから、両方式においては傾向が異なっている。この相違の原因は定かではないが、アンカーワイヤ方式の場合の短周期波中の実験ケースにおいては、ケーソン据付作業を実施する前のワイヤの初期張力がバランスを保って設定されていなかった可能性がある。実際には、引船方式の場合の実験結果が示すように、アンカーワイヤ方式の場合でも、制御信号出力回数は波向に影響されないものと推察される。また、図からは、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いことがわかる。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に、その動揺が位置制御のために設定した許容範囲や許容回転角を超えることが多くなることによる。

図-14(2)～(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、回転方向位置制御信号と法線直角方向位置制御信号の和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60° の場合が大きく、回転方向位置制御信号と法線直角方向位置制御信号の和の割合は波向90° の場合が大きくなることわかる。この結果は、波向90° の場合は、波向60° の場合と比較してケーソンのスウェイあるいはヨウが発生し易くなり、それに対して法線直角方向位置制御あるいは回転方向位置制御が多く実行されていることを意味する。すなわち、アンカーワイヤ方式の場合では、波向60° よりも波向90° の波浪に対

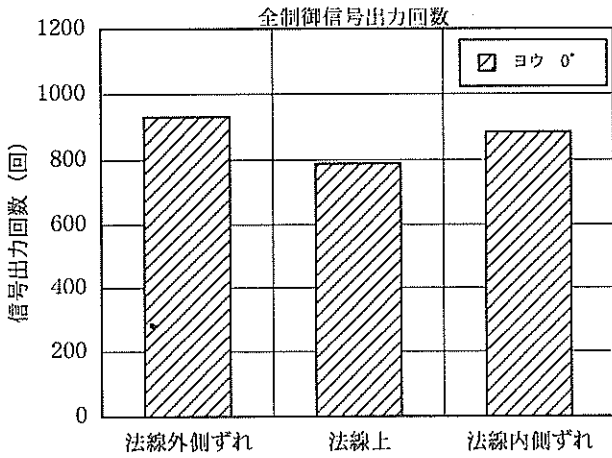


図-13(1) 制御信号出力回数の総数 (静水中実験)

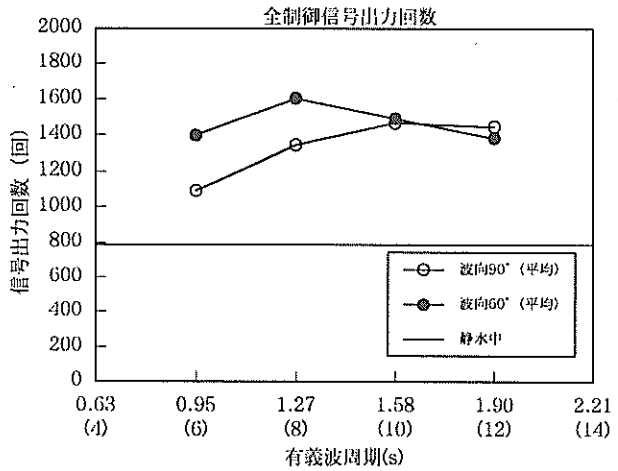


図-14(1) 制御信号出力回数の総数 (不規則波中実験)

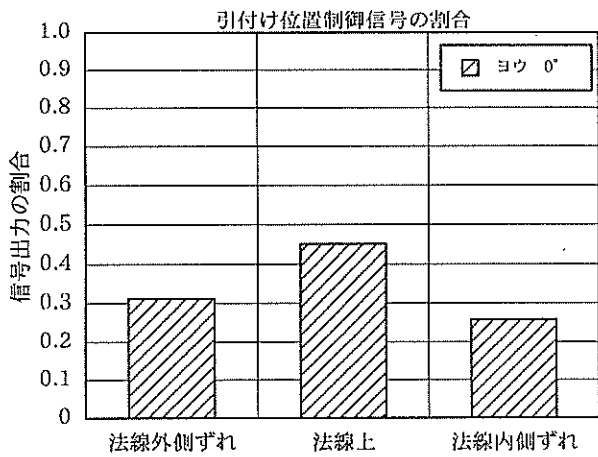


図-13(2) 引付け位置制御信号の割合 (静水中実験)

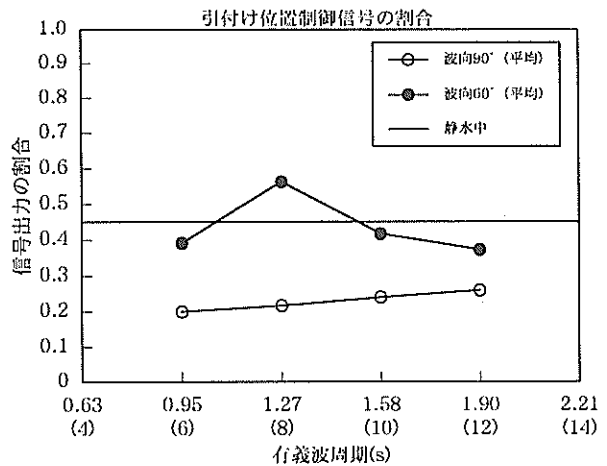


図-14(2) 引付け位置制御信号の割合 (不規則波中実験)

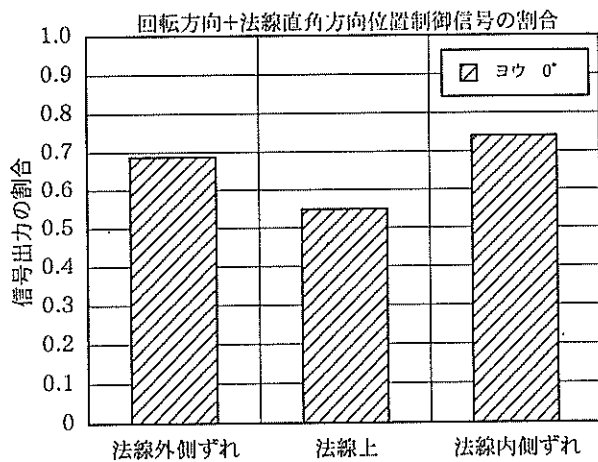


図-13(3) 回転方向位置制御信号と法線直角方向位置制御信号の和の割合 (静水中実験)

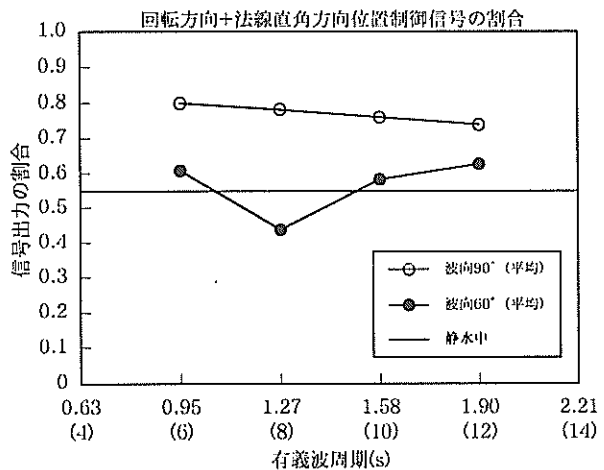


図-14(3) 回転方向位置制御信号と法線直角方向位置制御信号の和の割合 (不規則波中実験)

してケーソンの動揺が増大する傾向にあることを表している。なお、波向 60° の場合のいずれの制御信号の割合も、大まかに見ると、静水中実験における制御信号の割合とおおむね等しいことがわかる。

5.2 ケーソンの重心点の軌跡

(1) 概要

据付作業中における据付ケーソンの重心点の軌跡について考察することで、自動設置システムによるケーソンの据付作業の安定性について検討することができる。

図-15(1)~(4)は、ケーソンの据付作業が終了した後のEWSのディスプレイ画面のハードコピーを取ったものである。これらの図は同じ有義波高 2.50cm (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表している。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、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)のケースをそれぞれ示す。また、図-16は引船方式によるシステムの実験結果であり、図-15(2)に対応するケースのケーソンの重心点の軌跡を、比較のために表示したものである。前述のように、不規則波中実験はすべてのケースとも2回実施しているのので、ここでは2回のうちの1回の実験結果を示した。また、ケーソンの重心点はケーソン内への注水が進行するにつれて変動するため、不規則波浪下のケーソンの動揺軌跡を相互比較し易いように、重心点はケーソン全長の $1/2$ 、型幅の $1/2$ 、型深の $1/2$ の位置にあるものと仮定している。

(2) 波周期に関する考察

波向 90° のときの図-15(1)および図-15(2)、そして波向 60° のときの図-15(3)および図-15(4)をそれぞれ比較すると、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、一方、有義波周期 1.90s (12.0s)では（以下、長周期波中と表記）ケーソンの動揺の中でスウェイとヒープが大きくなることがわかる。しかしながら、スウェイに関しては、短周期波中と長周期波中における動揺量の差異はそれほど大きくない。図-16からもわかるように、長周期波中でケーソンの動揺が大きくなることは引船方式の場合でも観察される傾向であるが、引船方式の場合はアンカーワイヤ方式の場合と比べて長周期波中でかなり大きな動揺が発生している。これは、模型実験において、引船方式の場合は長周期波に対するケーソンの動揺が引船あるいはウインチによる位置制御によって低減されていないが、アンカーワイヤ方式の場合ではアンカーによる拘束力によりケーソンの動揺が抑制されていることを意味している。

また、短周期波中のケーソン据付作業について見ると、アンカーワイヤ方式の場合ではケーソンの動揺は小さく、波漂流力によるケーソンの漂流（以下、この現象をドリフトと表記）もほとんど発生しないため、ケーソンの重心点は既設ケーソンのほぼ中心線上を推移しており、安定して据付作業を行うことができている。これに対し、引船方式の場合では、ウインチによるケーソンの法線直角方向の位置制御が開始される前は、短周期波中では波漂流力の影響を受けてケーソンが波下側にドリフトする結果となっている。アンカーワイヤ方式の場合にケーソンのドリフト量が小さくなるのは、水槽底に向かって4方向に展張されたワイヤによってケーソンが拘束されること、引船方式と異なり据付作業開始後すぐにウインチによりケーソンの重心点を許容範囲内に保持するように位置制御が行われることが主要因であると考えられる。したがって、短周期波中では、アンカーワイヤ方式によるシステムの場合はケーソンの動揺量、ドリフト量をより小さくすることができ、引船方式によるシステムよりもケーソン据付作業の安定性が向上している。

一方、長周期波中では、例えば図-15(2)および図-16の比較によると、アンカーワイヤ方式の場合は短周期波中のときと比較してケーソンの動揺がわずかながらも大きくなってはいるものの、引船方式のときほどの大きな動揺量ではないことがわかる。加えて、アンカーワイヤ方式の場合は、長周期波中の場合でもケーソンの重心点の軌跡は既設ケーソンのほぼ中心線上に沿って描かれており、据付作業の安定性が高いと言える。また、このときケーソンに注水を進めて行くにつれて動揺（特にヒープ）は減少して行き、最終的にケーソンは設置目標内に設置されている。以上のことから、長周期波中においては、引船方式によるシステムではケーソンの据付を安定して行うことが困難であったが、アンカーワイヤ方式によるシステムでは安定的な据付作業を実施可能であると言える。取りまとめると、短周期波中あるいは長周期波中に拘らず、アンカーワイヤ方式によるシステムを用いたケーソン据付作業は引船方式のものよりも安定性に優れていると結論づけることができる。

ここで、アンカーワイヤ方式の場合においても引船方式の場合と同様に、ケーソンへの注水によりヒープの動揺は低減するが、スウェイの動揺はそれほど低減しないという現象を見ることができる。これは、マウンドとケーソン間のクリアランスがほぼ無くなったときでも、波浪によりケーソンがマウンド上で滑動するためにスウェイの動揺が引き起こされることを意味する。すなわち、その時点では滑動に抵抗するのに十分な重量を持ってケ

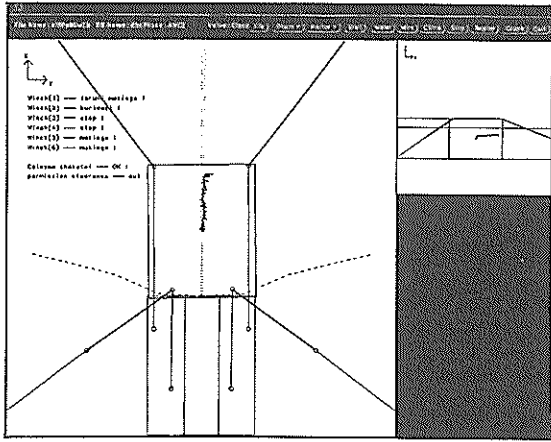


図-15(1) ケーソンの重心点の軌跡（不規則波中）
（有義波周期0.95s(6.0s),
有義波高2.5cm(1.0m), 波向90°）

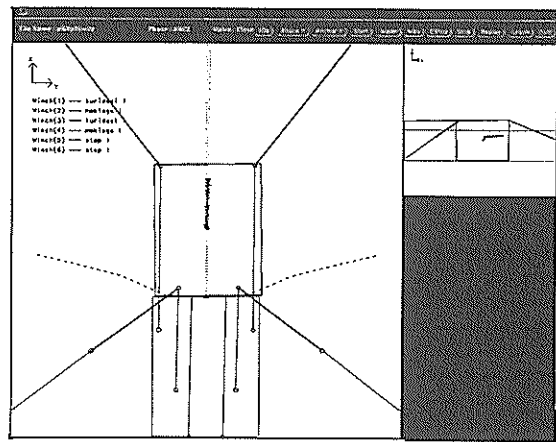


図-15(3) ケーソンの重心点の軌跡（不規則波中）
（有義波周期0.95s(6.0s),
有義波高2.5cm(1.0m), 波向60°）

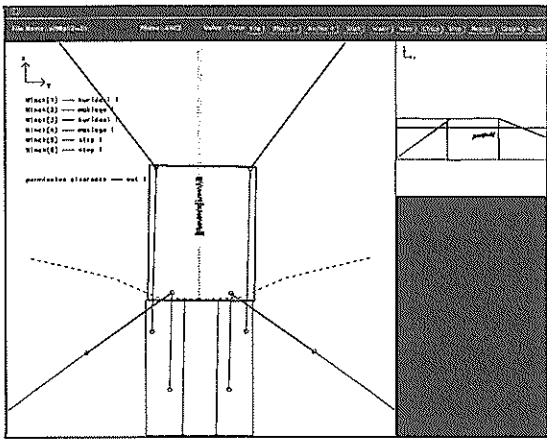


図-15(2) ケーソンの重心点の軌跡（不規則波中）
（有義波周期1.90s(12.0s),
有義波高2.5cm(1.0m), 波向90°）

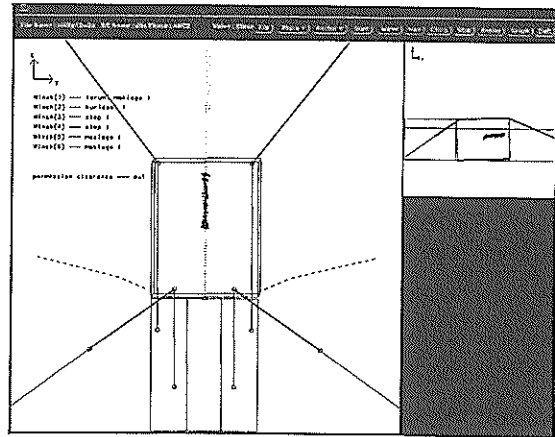


図-15(4) ケーソンの重心点の軌跡（不規則波中）
（有義波周期1.90s(12.0s),
有義波高2.5cm(1.0m), 波向60°）

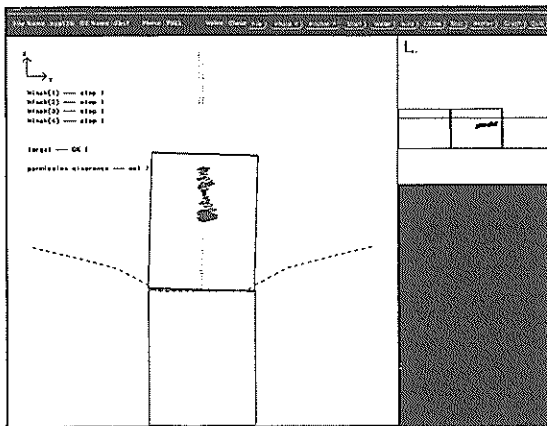


図-16 引船方式の場合のケーソンの重心点の軌跡
（不規則波中）（有義波周期1.90s(12.0s),
有義波高2.5cm(1.0m), 波向90°）

ーンソンが着底していないのである。第一報でも示したように、現実の据付作業を正確に再現してケーソン着底直前の急速注水を行えば、この滑動現象は低減可能であると考えられる。

(3) 波向に関する考察

短周期波中での図-15(1)および図-15(3)、そして長周期波中での図-15(2)および図-15(4)をそれぞれ比較すると、アンカーワイヤ方式の場合は波向に対する差異がほとんど現われないことがわかる。ただし、短周期波中で波向90°の場合は、据付作業初期において若干波下側へのドリフトが見られ、据付作業中においても多少のドリフトを観察できる。ここに見られるケーソンのドリフトは、ケーソン据付作業開始前におけるワイヤ張力の初期設定がアンバランスであったために発生したものと考えられる。よって、ワイヤの初期張力を適切に設定す

れば、このようなドリフトは生じないと推察される。しかしながら、この場合においても、先述したようにウインチによるケーソンの位置制御が開始されると、動揺の許容範囲内にケーソンの重心点が保持され、安定して据付作業が行われていることがわかる。一方、引船方式の場合は、短周期波中においては、波向による据付作業への影響は小さいが、長周期波中においては波向 90° の場合が波向 60° の場合よりケーソンのスウェイの動揺が大きくなり据付作業がより難しくなるという結果となった。これらのことから、アンカーワイヤ方式によるシステムのケーソン据付作業の波向に対する安定性も確認されたと言える。

引船方式の場合は、特にケーソンの真横に向かって長周期波が作用する場合（実験では波向 90° の長周期波中の場合）には、ケーソンのスウェイの動揺を低減するために引船のけん引力を強化する必要がある。ところが、そのような制御を必要としないアンカーワイヤ方式によるシステムは、初期のアンカリングの部分を除くことと完全な自動化システムとなることが利点である。

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-17(1)~(4)は有義波高2.50cm (1.0m)の不規則波中実験におけるケーソンの動揺の時刻歴を、造波開始時からケーソンが着底するまでの間について表示したものである。図-17(1)~(2)は波向 90° で有義波周期0.95s (6.0s) および1.90s (12.0s)のケースを示し、図-17(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。各図には、ケーソンの動揺6成分のうち、サージ、スウェイ、ヒープの並進運動3成分を上、中、下段の順に図示している。図の縦軸は各成分の動揺量、横軸は実験の経過時間であり、いずれも模型値で表記してある。これらの図は、図-15(1)~(4)で示したケーソンの重心点の軌跡図にそれぞれ対応する。ただし、ケーソンのサージ、スウェイ、ヒープの動揺量は図-12に示した既設ケーソンに固定された絶対座標系に関して計測している点に注意を要する。また、以下の論文中で頻繁に用いる動揺振幅とは、各動揺量をケーソンの重心点を原点としたケーソン固定座標系における動揺量として表したときの動揺片振幅を意味している。

a) サージ

図-17(1)~(4)の上段に示したサージの時刻歴について考察する。実験開始後から最初の約60s間は、造波初期の過渡的な波浪が定常になるのを待っている段階で、

まだウインチによるケーソンの位置制御を開始していない。それぞれの図では、約60s以降にケーソンの位置制御が行われて据付ケーソンが既設ケーソンへと徐々に接近していく様子が、サージが減少していくことで表現されている。そして、最終的にはサージが一定値となり、この時点で据付ケーソンが目標設置位置に据付けられている。また、サージの動揺振幅について見ると、短周期波中と長周期波中における差異が小さいこともわかる。このようなサージの動揺特性は、引船方式の場合とおおむね同じ傾向であるが、その動揺振幅はアンカーワイヤ方式の方がより小さくなっている。サージの動揺に関しても、アンカーワイヤ方式によるシステムの動揺抑制の効果が表れている結果であると言える。

b) スウェイ

図-17(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。スウェイの動揺振幅は、短周期波中と比較して長周期波中において少し大きくなってはいるが、引船方式の場合ほどその増加量が大きくない。また、引船方式の場合に見られた短周期波中での波漂流力によるケーソンのドリフトが、アンカーワイヤ方式の場合には、短周期波中で波向 90° のケースで若干見受けられるのを除くとほとんど観察されないこともわかる。さらに、いずれのケースにおいても、スウェイがおおむね動揺量ゼロのラインに沿って変動しており、スウェイ方向に関してケーソンの安定性を保った状態で据付作業が進行していることもわかる。以上のような特徴は、当然のことながら、前節で考察したケーソンの重心点の軌跡から得られた結果と合致する。一方、波向に関して見ると、短周期波中および長周期波中ともに、スウェイの動揺に対する波向の影響は小さいと言える。ただし、波向 90° で長周期波中のケースでは、ケーソン据付作業終了前に長周期のスウェイの動揺が発生しているのを見ることができる。これは、ケーソン着底前のワイヤ張力のアンバランスに原因があると思われるが、ケーソン着底前に注水速度を上げることや速度可変のウインチを用いてワイヤの巻上げ・繰出し速度を上げることで、この現象に対処可能であると考えられる。

c) ヒープ

図-17(1)~(4)の下段に示したヒープの時刻歴について考察する。いずれのケースにおいても、ヒープは据付作業時間が経過するにつれて徐々に減少していき、最終的には一定値となる。これは、注水が進行するにつれて、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近づくことを表している。また、ヒープの動揺振幅は短周期波中で小さく、長周期波中で大きくなって

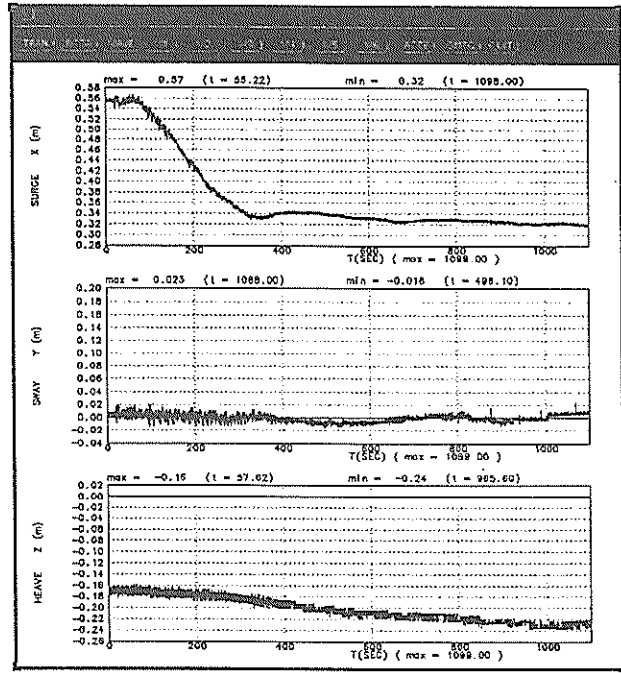
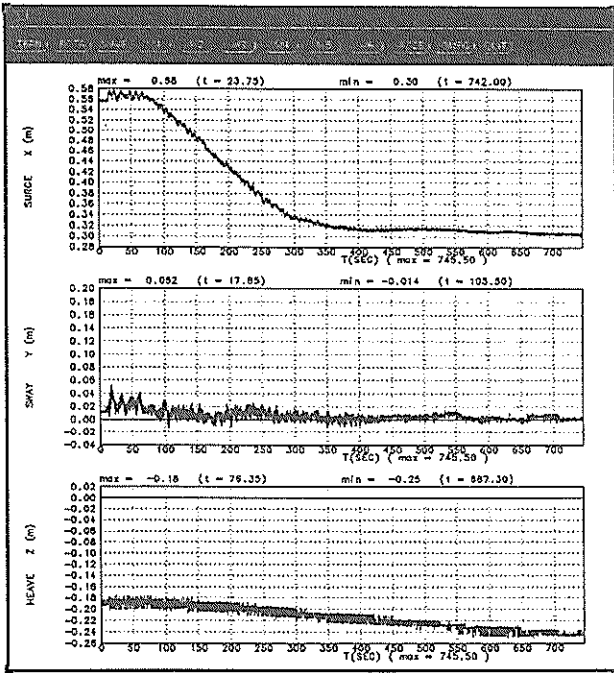


図-17(1) サージ, スウェイ, ヒープの時刻歴
(不規則波中) (有義波周期0.95s(6.0s),
有義波高2.5cm(1.0m), 波向90°)

図-17(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°)

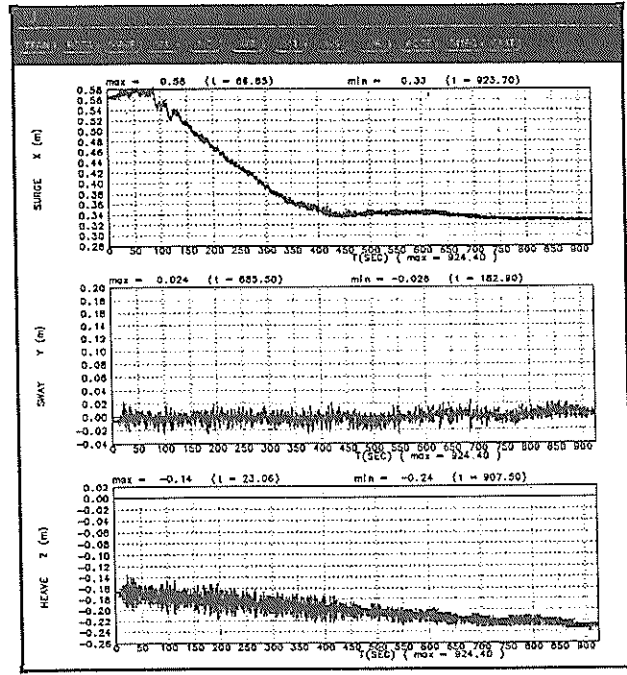
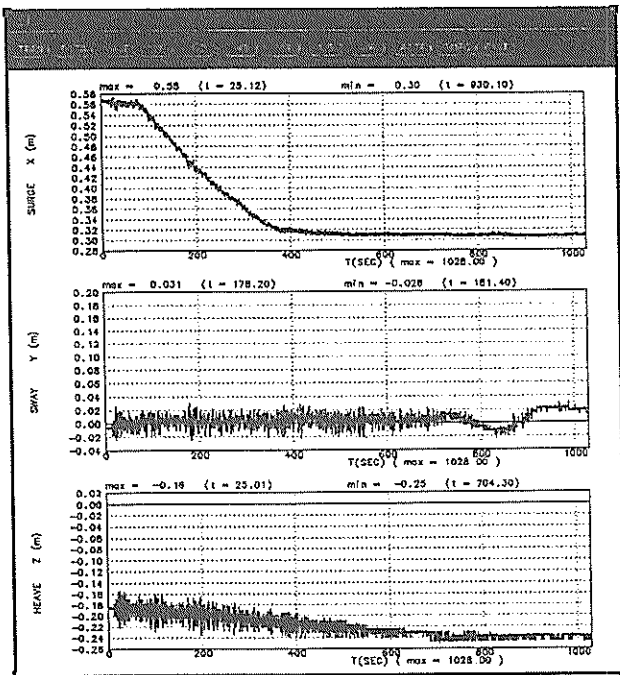


図-17(2) サージ, スウェイ, ヒープの時刻歴
(不規則波中) (有義波周期1.90s(12.0s),
有義波高2.5cm(1.0m), 波向90°)

図-17(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°)

る。そして、動揺振幅が大きくなる長周期波中のヒープの動揺について詳しく見ると、注水が進むにしたがってその動揺振幅が減少していく傾向がわかる。このようなヒープの動揺特性は、引船方式のときとおおむね同じ傾向であり、また先に示したサージの場合とは異なり、その動揺振幅も両方式においてほぼ同程度となる。さらに、長周期波中で波向 90° および波向 60° のケースから、ケーソンが完全に着底する前のスウェイの動揺振幅はあまり低減しないことがわかる。これは、ケーソンの重心点の軌跡の図でも観察されたケーソンの滑動現象を表しており、さらに安定性の高いケーソン据付を実現するためには、ケーソンが設置目標範囲に到達したときに注水速度を上げることが必要となる。

(2) ロール、ピッチ、ヨウの時刻歴

図-18(1)~(2)は波向 90° で有義波高2.50cm (1.0m) の不規則波中実験におけるケーソンの動揺の時刻歴を、造波開始時からケーソンが着底するまでの間について表示したものである。図-18(1)および図-18(2)はそれぞれ有義波周期0.95s (6.0s) および1.90s (12.0s) のケースを示す。各図には、ケーソンの動揺6成分のうち、ロール、ピッチ、ヨウの回転運動3成分を上、中、下段の順に図示している。図の縦軸は各成分の動揺量、横軸は実験の経過時間であり、いずれも模型値で表記してある。

a) ロール

図-18(1)~(2)の上段に示したロールの時刻歴について考察する。これらの図を見ると、ロールの動揺振幅は、長周期波中で少し大きくなっているように見えるが、短周期波中と長周期波中ではほとんど変わらないことがわかる。浮体の動揺6成分のうち、スウェイ、ロールおよびヨウは互いに連成している成分である。よって、ロールの動揺振幅の傾向は、スウェイの動揺振幅が長周期波中でわずかながらも大きくなっている傾向と類似している。本自動設置システムの制御アルゴリズムではロールに対する制御を行えないが、アンカーワイヤ方式の場合は、アンカーに連結されたワイヤによる拘束力のために長周期波中においてもロールの動揺が自然に抑制されるので、引船方式の場合のようにロールの動揺を低減させる必要がないものとなる。しかしながら、後に5.5において述べるように、短周期波中では引船方式の場合よりもアンカーワイヤ方式の場合のロールの動揺振幅が大きくなる傾向があることに注意しなければならない。

b) ピッチ

図-18(1)~(2)の中段に示したピッチの時刻歴について考察する。これらの図を見ると、ピッチの動揺振幅は、長周期波中でやや大きくなる傾向にあるが、短周期波中

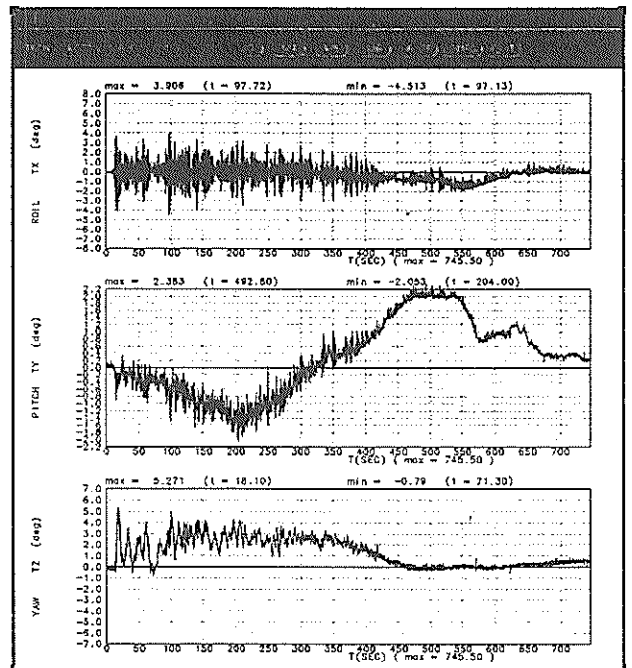


図-18(1) ロール、ピッチ、ヨウの時刻歴
(不規則波中) (有義波周期0.95s (6.0s),
有義波高2.5cm (1.0m), 波向 90°)

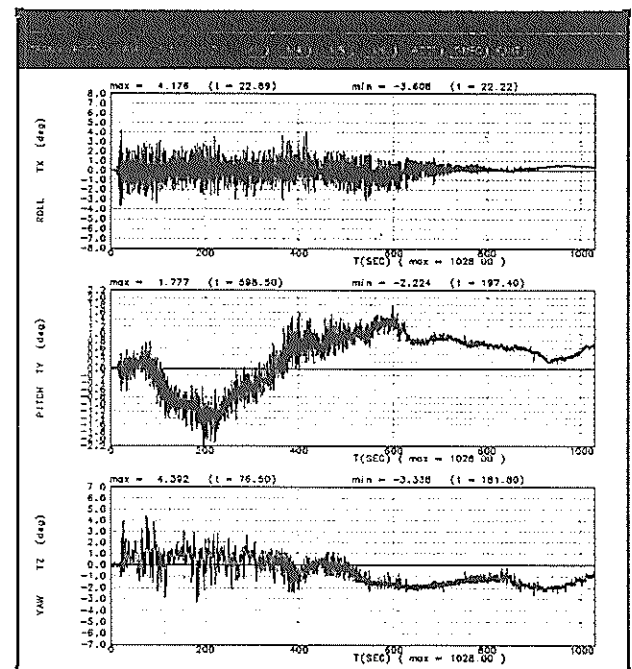


図-18(2) ロール、ピッチ、ヨウの時刻歴
(不規則波中) (有義波周期1.90s (12.0s),
有義波高2.5cm (1.0m), 波向 90°)

と長周期波中での相違はそれほど大きくないことがわかる。また、ピッチの動揺振幅はロールの動揺振幅と比較

してかなり小さく、ピッチの動揺に対する波浪の影響が小さいことが推測される。なお、アンカーワイヤ方式の場合は、引船方式の場合よりもピッチの動揺振幅が小さくなっている。

一方、全体的なピッチの傾向を見ると、据付作業開始後から徐々にピッチは小さくなり、経過時間200s付近で最小値を示した後しばらくして最大値を示し、最後にはゼロに近づいていく。このことは、据付開始から300～400sまではケーソンの手前側が先端側より浮き上がり、その後はケーソンの先端側が手前側より浮き上がり、注水が進むにつれて最終的にはピッチがゼロに収束することを表している。前半のピッチの動揺性状は、据付ケーソンを既設ケーソン側に引付けているために図-3(2)に示したアンカー3およびアンカー4に対応するワイヤがたるみ、アンカー1およびアンカー2に対応するワイヤが緊張する傾向にあることが原因と推察される。後半のピッチの動揺性状は、経過時間300～400sで据付ケーソンが既設ケーソン近傍に到達して、注水によってケーソンの喫水が十分大きくなりえない状態で据付ケーソンが既設ケーソン側に強く引付けられることにより、ケーソンが既設ケーソン側に傾斜することが原因と推察される。このようなピッチの発生を抑制するには、ウインチ3およびウインチ4のワイヤのたるみ巻上げ速度あるいはウインチ1およびウインチ2のワイヤ繰出し速度を上げるように速度可変なウインチを用いることや、ケーソン着底直前の注水速度を早めることが対策になると考えられる。

c) ヨウ

図-18(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、ヨウの動揺振幅は、短周期波中では小さく、長周期波中では大きくなるのがわかる。また、ヨウの時刻歴波形は図-17(1)～(2)の中段に示したスウェイの時刻歴波形とよく似た傾向を示していることもわかる。これは、先にも述べたように、スウェイ、ロールおよびヨウが互いに連成している動揺成分であることが理由である。この中でも特にスウェイとヨウは、同じ水平面内の動揺成分であるために互いの動揺に対する相互影響が大きいと考えられる。以上のような動揺特性は引船方式の場合とおおむね同様である。ここで、短周期波中のヨウの動揺性状を見ると、約 3.0° のヨウが400s付近まで発生しており、ヨウの動揺制御が上手く実行できていないことがわかる。このケースでは、図-17(1)の中段のスウェイの時刻歴図でも見られるようにケーソンのドリフトが若干発生しており、据付作業中にワイヤ張力のバランスが上手く保たれていないこと

がヨウの発生原因であると推察される。5.2でも述べたように、据付作業中のワイヤ張力のアンバランスは、据付作業開始前におけるワイヤの初期張力のアンバランスが原因であると考えられるため、ワイヤの初期張力を適切に設定することにより、ここで示した大きなヨウは発生しなくなるものと推定される。

5.4 ウインチデータの時刻歴

(1) 概要

水理模型実験では、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・繰出し量をすべてのウインチについて計測している。ケーソンの位置制御は、EWSから出力される制御信号によりウインチが作動することで実行される。したがって、この制御信号の出力時系列を解析することで、据付作業中のケーソンの位置制御の状況を把握することができる。ここでは6台のウインチのうち、アンカーに接続されており、かつ引船方式の場合と同様に、波下側に取り付けられているワイヤに対応するウインチの計測データについて考察する。つまり、図-3(2)を参照すると、これらの計測データとはウインチ1およびウインチ3に関するウインチデータである。また、ここではウインチ1～6に対応するワイヤをそれぞれワイヤ1～6と表記する。

図-19(1)～(4)は波向 90° で有義波高2.50cm (1.0m)の不規則波中実験におけるウインチデータの時刻歴を、造波開始時からケーソンが着底するまでの間について表示したものである。この中で図-19(1)および図-19(2)は、それぞれ有義波周期0.95s (6.0s) および1.90s (12.0s)のケースのウインチ1のウインチデータを示す。また図-19(3)および図-19(4)は、それぞれ有義波周期0.95s (6.0s) および1.90s (12.0s)のケースのウインチ3のウインチデータを示す。各図には、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が上、中、下段の順に図示されている。なお、図の縦軸および横軸は模型値による表記である。

(2) ワイヤ張力

図-19(1)～(4)の上段に示したワイヤ張力の時刻歴について考察する。これらの図から、ケーソンの動揺やウインチによるワイヤの巻上げ動作の影響により、ワイヤに発生する荷重がパルス的な特性を示していることがわかる。また、ワイヤ1およびワイヤ3ともに短周期波中よりも長周期波中において荷重が増大していることもわかる。ワイヤの荷重がパルス的な発生特性を示すことは、引船方式の場合にも観察された特徴である。また、短周期波中よりも長周期波中でワイヤの荷重が大きい傾向は、

ケーソンの動揺が短周期波中よりも長周期波中で大きくなる傾向と一致しており、ケーソンの動揺とワイヤ張力との関連性の強さを表している。

一方、長周期波中および短周期波中ともに、実験開始後から400s付近まではワイヤ1の荷重が、またその後から550～600sまではワイヤ3の荷重が大きく、パルス荷重の発生回数も多いことがわかる。これは、図-18(1)～(2)の中段に示したピッチの時刻歴の傾向と類似している。すなわち、ワイヤ1の荷重が大きいたまにはピッチが負の値を示し、ワイヤ3の荷重が大きいたまにはピッチが正の値を示している。このようなワイヤ張力の時刻歴とピッチの時刻歴の相関性は、5.3で説明したように、ワイヤ張力の不均等な増大が要因となってピッチが発生するためであると考えられる。

ここで、経過時間550～600s以降はワイヤ1およびワイヤ3ともに非常に過大な荷重を示している。この原因は、ケーソン着底前のケーソンの滑動現象にあると考えられる。すなわち、前にも説明しているが、ケーソンが十分な重量を持って着底していないために波浪によりケーソンがマウンド上で動揺して、それに対してワイヤに大きな荷重が発生するのである。この滑動現象は、実際のケーソン据付作業における注水作業を正確に再現したケーソン着底直前の急速注水を実施すれば回避できると考えられる。着底直前のケーソンの重量はかなり大きなものになることから、ケーソンが滑動することによる慣性力も当然大きくなり、その作用によって発生するワイヤの荷重が大きくなることも容易に想像できる。よって、経過時間550～600s以後の最終的なワイヤ張力の増加部分を除外してウインチにかかる最大荷重を読み取ると、長周期波中においてウインチ1に作用する1.7kgf (109tf) となる。この数値は引船方式の場合のウインチの最大荷重1.4kgf (90tf) と比べてかなり大きい。このことは、アンカーワイヤ方式の場合、引船方式の場合よりもワイヤによる拘束力が据付ケーソンに強く働いていることを表している。そのために、アンカーワイヤ方式によるシステムでは、引船方式によるシステムよりも据付作業中のケーソンの動揺が抑制されていると考えられる。しかしながら、実用上、このような大荷重に対応するウインチを制作することは、コスト面から考えても効率的ではない。現実的には第一報で引船方式の場合についても述べたように、アンカーワイヤ方式によるシステムにおいても、ウインチに過大な荷重が作用しないようなワイヤの自動リリース（自動繰出し）機構の導入を検討することが必要である。

(3) 制御信号

図-19(1)～(4)の中段に示した制御信号の時刻歴について考察する。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。図中では、これらの制御信号値が実数値で示されていることに注意を要する。

まず、ウインチ1に関して見ると、短周期波中においては、実験開始後約60sから400sまではたるみ巻上げ信号および繰出し信号の出力が激しく繰り返されていることがわかる。経過時間約400s以降は巻上げ信号や停止信号の出力も見られるようになるが、たるみ巻上げ信号および繰出し信号が一定して出力される部分が多くなっている。一方、長周期波中においても短周期波中とほぼ同様な傾向を示しており、実験開始後約60sから400sまではたるみ巻上げ信号、巻上げ信号および繰出し信号の出力が激しく繰り返され、その後は停止信号も含めこれらの制御信号出力が一定している部分が増加してくるようになる。このような傾向から、長周期波中においては巻上げ信号出力が短周期波中に比べて若干多くなると言える。図-5あるいは図-6を参照すると、ウインチ1における巻上げ信号出力は、ケーソンのスウェイ方向の位置制御を行っていることを表すことがわかる。長周期波中においてスウェイの動揺振幅が大きくなるのがこの制御動作の原因であり、このことは図-17(1)～(2)に示したスウェイの時刻歴の特徴と一致する。また、経過時間約400s以前とそれ以降で制御信号の出力状況が変化しているのは、この時点で据付ケーソンが既設ケーソンの近傍へ接近することによってケーソンの動揺状態が変化していることが理由と考えられる。すなわち、この現象は、経過時間約400s以前はウインチがケーソンの引付けを主に行うためにたるみ巻上げ信号と繰出し信号の激しい繰り返し出力があり、それ以後はケーソンの引付けよりもケーソンのヨウおよびスウェイの制御を主として実行しているため、それ以前のように制御信号出力が激しく繰り返されないということを意味する。

次に、ウインチ3に関して見ると、短周期波中においてはウインチ1の場合のように制御信号出力の激しい繰り返しは見られず、経過時間約400sまではほとんど巻上げ信号出力であり、約400s付近からは巻上げ信号以外の制御信号も出力されてくる。これに対し、長周期波中では経過時間約400s以前は主にたるみ巻上げ信号と巻上げ信号が繰り返して出力されており、それ以降はすべての制御信号の出力がおおむね同程度に実行されるようになる。制御信号出力の傾向が経過時間400s前後で変化するのは、ウインチ1の場合と同様に、この時点においてケ

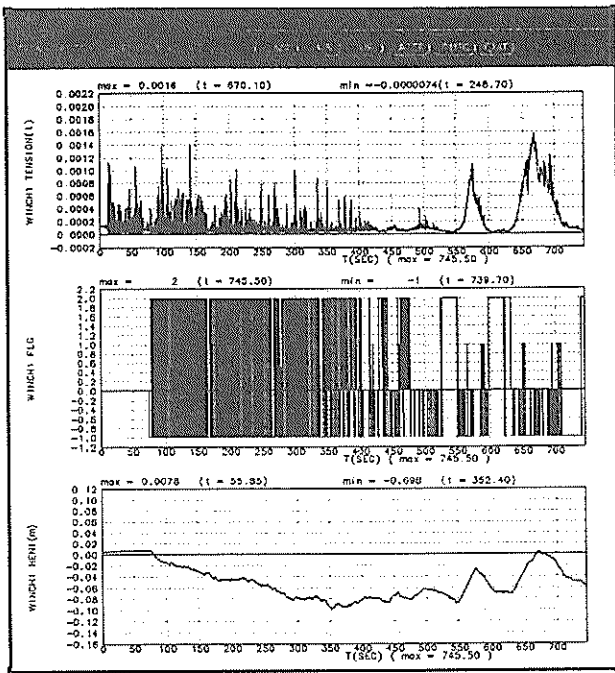


図-19(1) ウインチ1のウインチデータの時刻歴
(不規則波中) (有義波周期0.95s(6.0s),
有義波高2.5cm(1.0m), 波向90°)

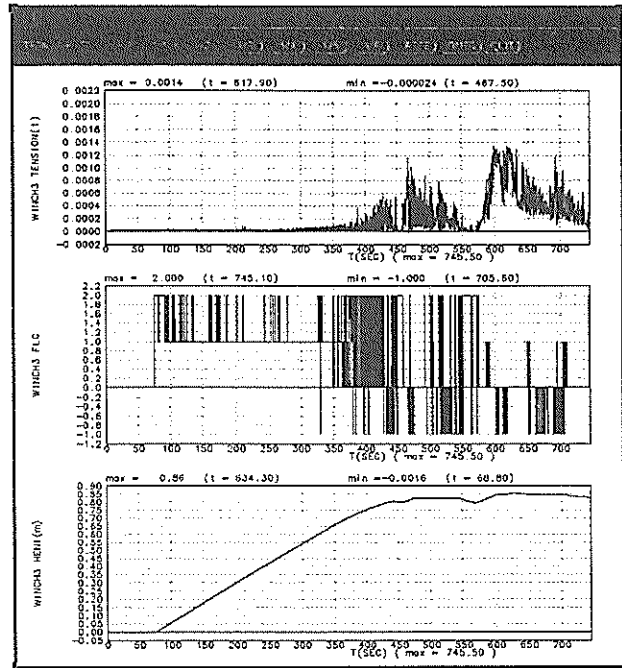


図-19(3) ウインチ3のウインチデータの時刻歴
(不規則波中) (有義波周期0.95s(6.0s),
有義波高2.5cm(1.0m), 波向90°)

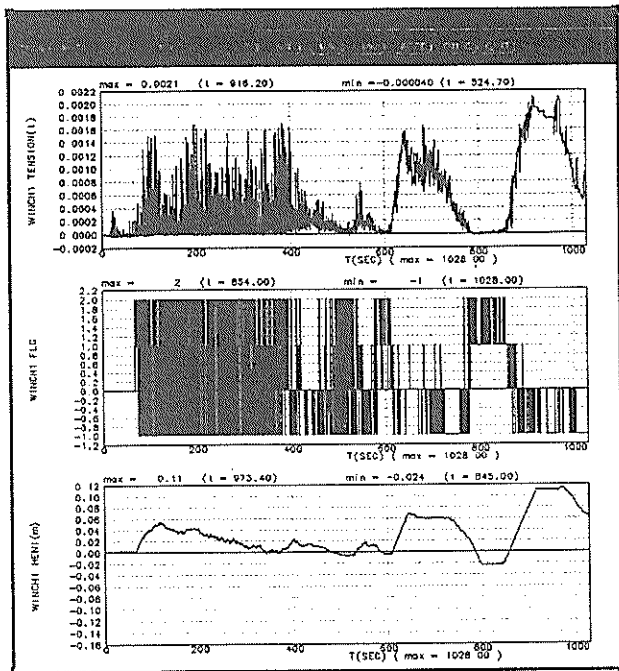


図-19(2) ウインチ1のウインチデータの時刻歴
(不規則波中) (有義波周期1.90s(12.0s),
有義波高2.5cm(1.0m), 波向90°)

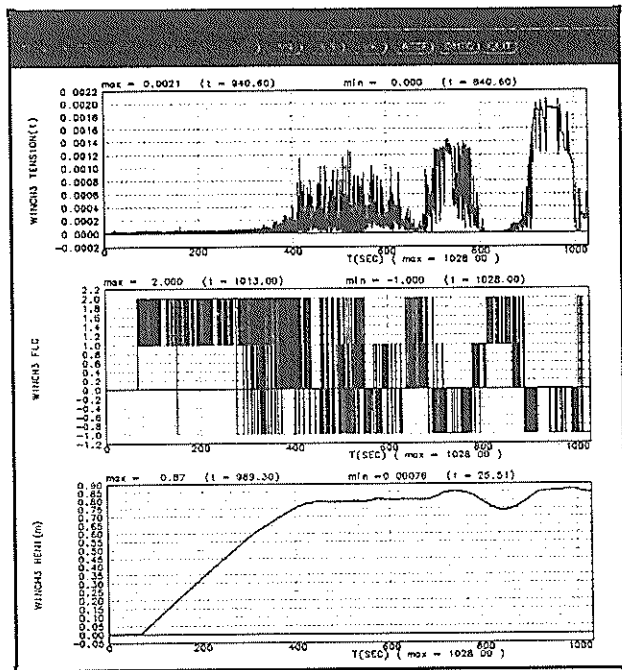


図-19(4) ウインチ3のウインチデータの時刻歴
(不規則波中) (有義波周期1.90s(12.0s),
有義波高2.5cm(1.0m), 波向90°)

ケーソンの動揺状況が変化することに対応して制御信号出力状況も変化しているためである。また、全体的に見ると、短周期波中よりも長周期波中の方が制御信号出力の変動が激しく、その出力回数も多くなることがわかる。すなわち、長周期波中では短周期波中の場合よりもケーソンの動揺が大きくなるために、制御信号出力も増加すると考えられる。これは図-17(1)～(2)に示したスウェイの時刻歴あるいは図-18(1)～(2)に示したヨウの時刻歴における動揺振幅の傾向と一致する。ここで、5.3でも示したように、短周期波中におけるケーソンのヨウに関して見ると、据付作業開始前におけるワイヤの初期張力のアンバランスにより、ヨウが約400sまで定常的に発生している。図-5および図-6から判断すれば、短周期波中で経過時間約400sまで巻上げ信号の出力が多いのは、このヨウに対して位置制御が多く行われていることが理由である。一方、長周期波中では、たるみ巻上げ信号出力が多いため、ケーソンの引付けがより多く実行されていることになる。

なお、経過時間550～600s以降は、ケーソン着底直前におけるケーソンの滑動現象に対する位置制御を行っているのであるが、ケーソンへの注水をより現実的なものにするこゝでこの滑動現象は発生しないと推測される。したがって、自動設置システムによるケーソン据付作業を正確に再現すれば、このような制御動作は実際には起こらないと考えられる。

(4) ワイヤの巻上げ・繰出し量

図-19(1)～(4)の下段に示したワイヤの巻上げ量・繰出し量の時刻歴について考察する。図の縦軸の正方向は巻上げ量を、負方向は繰出し量を表している。ここでは、ケーソンの滑動現象に対する位置制御の結果生じる経過時間約550～600s以降のワイヤの巻上げ・繰出し量については、除外して考察を進める。

まず、ウインチ1に関して見ると、短周期波中では最大約10.0cm (4.0m) の繰出し量があるのに対し、長周期波中では逆に最大約5.0cm (2.0m) ほどの巻上げ量が発生しており、最大巻上げ量を示した後の繰出し量の変動も約5.0cm (2.0m) 程度であることがわかる。この両者の差異は、ウインチの制御信号の時刻歴からもわかるように、長周期波中では短周期波中と比較して、巻上げ信号出力が多くなることが原因と考えられる。また、短周期波中でのワイヤの最大繰出し量や長周期波中でのワイヤの繰出し量の変動量は、実験開始前の据付ケーソンと既設ケーソン間の初期距離である25.0cm (10.0m) と比べてその半分以下である。この理由は据付ケーソン周囲のワイヤの配置状態にある。すなわち、図-3(2)

のワイヤ配置パターンの図を見ると、ワイヤ1～4に対してはアンカーと動滑車が用いられており、ウインチと据付ケーソンとを連結するワイヤがこの動滑車を通して取り付けられている。さらに、据付作業開始前のアンカーと動滑車とを結ぶワイヤの展張方向は、据付ケーソンの四角から斜め45°の方向である。このようなワイヤの配置状態が要因となって、ワイヤの繰出し量は据付ケーソンと既設ケーソン間の初期距離25.0cm (10.0m) の半分も必要がないものと考えられる。特に長周期波中の場合は、ワイヤの巻上げ制御も多く実行されていることから、ワイヤの繰出し量の変動量が短周期波中のワイヤの繰出し量に比較して少ないことが理解できる。

続いて、ウインチ3に関して見ると、短周期波中において経過時間約550sの時点で約82.0cm (32.8m)、長周期波中において経過時間約600sの時点で約80.0cm (32.0m) の最大巻上げ量があることがわかる。これらのワイヤの巻上げ量は、据付ケーソンと既設ケーソン間の初期距離である25.0cm (10.0m) の3倍以上の大きさとなる。これもまた、ウインチ1について考察したように、動滑車の使用、ワイヤの展張方向およびワイヤの配置位置の関係といったワイヤの配置状態がその原因であると考えられる。また、ワイヤの巻上げ量の変化に関しては、短周期波中および長周期波中ともに経過時間400s付近までは徐々に巻上げ量が増加し、それ以降はおおむね一定の値を示している。このようなワイヤの巻上げ量の変動傾向は、ウインチの制御信号の時刻歴図において、経過時間約400sまでの間は短周期波中で巻上げ信号、長周期波中でたるみ巻上げ信号および巻上げ信号が多く、その後はすべての制御信号が出力されるという傾向と一致する。

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、スウェイおよびロールの動揺周期特性に関して考察する。ここでは、特に有義波高、波向および有義波周期を変化させたときのスウェイおよびロールの最大動揺量への影響について検討する。

図-20(1)および図-20(2)は、波向90°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、有義波高をパラメータとして図示したものである。図中には、引船方式の場合の波向90°、有義波高2.50cm (1.0m) の不規則波中実験におけるスウェイあるいはロールの最大動揺量も合わせて示している。また、図-21(1)および図-21(2)は、有義波高

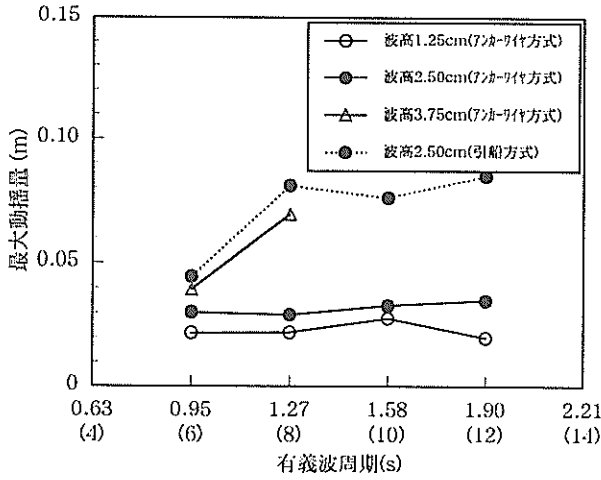


図-20(1) ケーソンの最大動揺量 (スウェイ)
(不規則波, 波向90°)

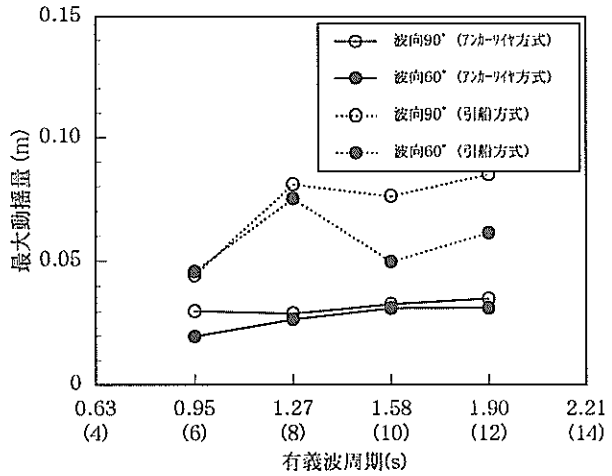


図-21(1) ケーソンの最大動揺量 (スウェイ)
(不規則波, 有義波高2.5cm (1.0m))

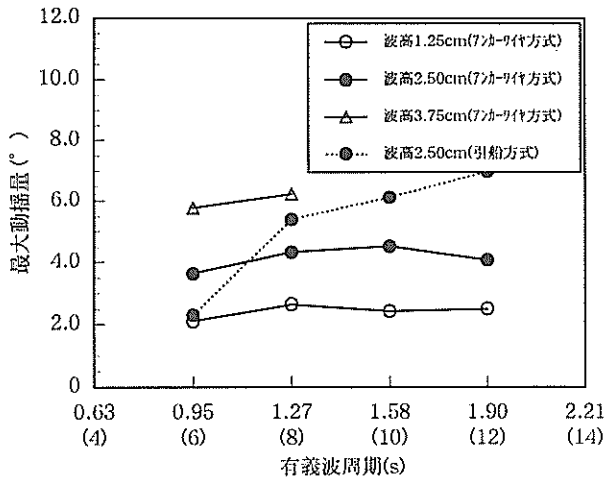


図-20(2) ケーソンの最大動揺量 (ロール)
(不規則波, 波向90°)

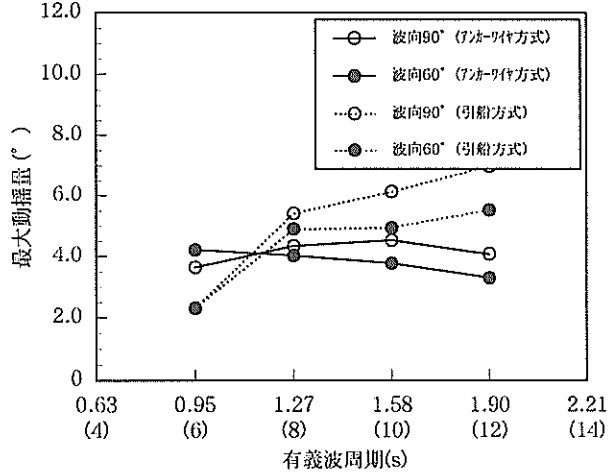


図-21(2) ケーソンの最大動揺量 (ロール)
(不規則波, 有義波高2.5cm (1.0m))

2.50cm (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。同じく図中には、引船方式の場合の有義波高2.50cm (1.0m) の不規則波中実験におけるスウェイあるいはロールの最大動揺量を合わせて示している。ここで示した最大動揺量とは、スウェイおよびロールの原点に関する動揺片振幅の中で絶対値の最大のものを意味する。このとき、実験開始時における各動揺量の時系列データの初期値が原点と一致していない場合には、データの初期値の原点補正を行い、時系列データ全体にわたって反映されるデータ初期値のずれの影響を除去している。また、図中には、不規則波中実験の各ケースで実施された2回の実験結果の平均値を示している。なお、図の縦軸および横軸は模型値によ

る表記であるが、() 内の数値は実機換算値を表している。

(2) 波高に関する比較

a) スウェイ

図-20(1)のスウェイの最大動揺量について考察する。この図から、有義波高が増加するにしたがってスウェイの動揺量も増加する傾向を示すことがわかる。ただし、有義波高1.25cm (0.5m) の場合と有義波高2.50cm (1.0m) の場合の動揺量の差異はそれほど大きくはない。有義波周期1.27s (8.0s) の場合の動揺量について具体的に数値で比較すれば、有義波高1.25cm (0.5m) のときは最大動揺量が2.2cm (0.88m)、有義波高2.50cm (1.0m) のときは2.9cm (1.16m)、そして有義波高3.75cm (1.5m) のときは6.9cm (2.76m) となり、有義

波高とスウェイの最大動揺量は明らかに比例関係にないと言える。これは、スウェイの最大動揺量と有義波高がおおむね正比例の関係を示した引船方式によるシステムの実験結果と異なっている。

また、スウェイの最大動揺量の波周期特性を見てみると、有義波高1.25cm (0.5m) および有義波高2.50cm (1.0m) の場合には、長周期波中においても短周期波中と動揺量があまり変わらない。すなわち、入射波周期の変化に対するスウェイの動揺特性の変化が大きくは現れないことがわかる。これに対し、有義波高3.75cm (1.5m) の場合は、有義波周期1.27s (8.0s) のときの動揺量が有義波周期0.95s (6.0s) のときに比べて非常に大きな値を示している。スウェイがこのような動揺特性を示した原因は定かではないが、ある程度までの波高まではウインチの制御により動揺が抑制されるのに対して、高波高状態になると動揺が大振幅となって制御が十分に働かないことが原因と考えられる。

ここで、アンカーワイヤ方式の場合および引船方式の場合のスウェイの最大動揺量を比較すると、すべての有義波周期に対して、アンカーワイヤ方式の場合のスウェイの動揺量の方がかなり小さくなることがわかる。したがって、アンカーワイヤ方式によるシステムは引船方式によるシステムよりもスウェイの動揺量をより低減させることが可能であると考えられる。

b) ロール

図-20(2)のロールの最大動揺量について考察する。この図から、スウェイの場合と同様に有義波高が増加するにしたがってロールの動揺量も増加する傾向にあることがわかる。これについて有義波周期1.27s (8.0s) の場合の動揺量で具体的に示すと、有義波高1.25cm (0.5m) のときは最大動揺量が 2.6° 、有義波高2.50cm (1.0m) のときは 4.3° 、そして有義波高3.75cm (1.5m) のときは 6.2° となる。したがって、有義波高とロールの最大動揺量もまた正確な比例関係にはないが、スウェイの場合と比べれば、より正比例に近い関係があると言える。また、このときのロールの最大動揺量の有義波高に対する応答倍率は、引船方式の場合に得られた値とほぼ同程度となっている。

次に、ロールの最大動揺量の波周期特性を見てみると、すべての有義波高に関して波周期の変化に対するロールの動揺特性の変化がほとんどないことがわかる。つまり、全波周期にわたってロールの最大動揺量はおおむね一定値を示している。図-20(1)と比較すると、このような傾向は有義波高3.75cm (1.5m) の場合を除いたスウェイの最大動揺量についても言えることであり、スウェイ

とロールの相互連成が理由であると考えられる。

また、アンカーワイヤ方式の場合および引船方式の場合のロールの最大動揺量を比較すると、有義波周期0.95s (6.0s) においてはアンカーワイヤ方式の場合のロールの動揺量が引船方式の場合よりも大きい。このことから、アンカーワイヤ方式によるシステムでは、長周期波浪に対しては引船方式によるシステムよりもケーソンのロールの動揺を低減させることが可能であると言える。ここで用いたケーソンの位置制御アルゴリズムではロールに対して動揺制御を行うことができないが、アンカーワイヤ方式の場合には、斜め下方に展張されたワイヤの拘束力により、引船方式のときに比べると、長周期波側ではロールの動揺の抑制がなされていると考えられる。一方、短周期波側においては、アンカーワイヤ方式の場合はワイヤの拘束力がケーソンの上端のみに限定的に作用するために、短周期波浪の影響によって、引船方式の場合よりもロールの動揺量が増加するのではないかと推測される。

(3) 波向に関する比較

a) スウェイ

図-21(1)のスウェイの最大動揺量について考察する。この図から、有義波周期0.95s (6.0s) においては波向 90° に対するスウェイの動揺量が波向 60° の場合よりも若干大きい。全体的にはすべての波周期について波向に対する動揺量の差異がほとんどないことがわかる。このような動揺性状は、5.3で述べたスウェイの時刻歴についての検討結果とも一致する。これは、アンカーワイヤ方式によるシステムは、スウェイの動揺制御に関して波向の変動に対する安定性が高いということを示している。一方、スウェイの最大動揺量の波周期特性を見ると、波向 60° の場合には長周期波側になるにつれて多少動揺量が大きくなってはいるが、大まかには波向 90° の場合も波向 60° の場合もすべての波周期に対しておおむね一定の最大動揺量を示すと言える。

また、アンカーワイヤ方式の場合および引船方式の場合のスウェイの最大動揺量を比較すると、波向 90° および波向 60° の場合ともにすべての有義波周期に対して、アンカーワイヤ方式の場合のスウェイの動揺量が引船方式の場合と比べて小さくなることがわかる。このことから、波向が変化したときにおいても、アンカーワイヤ方式によるシステムの方が引船方式によるシステムよりもスウェイの動揺量を低減できると考えられる。

b) ロール

図-21(2)のロールの最大動揺量について考察する。

この図からは、図-21(1)に示したスウェイの最大動揺量とおおむね同様な傾向を観察することができる。つまり、それぞれの波周期に対して、波向 90° の場合と波向 60° の場合とでは厳密にはロールの動揺量に若干の差異があるが、大まかに見ると両者の違いは小さいと言える。したがって、アンカーワイヤ方式によるシステムは、ロールの動揺に関しても波向変化による影響を受けにくいケーソン据付手法であると考えられる。また、ロールの最大動揺量の波周期特性を見てみると、これについてもスウェイのときと傾向が似ており、波向によって若干の相違はあるものの最大動揺量は約 4.0° のほぼ一定値を示している。このようなロールの動揺量の特徴は、スウェイおよびロールの相互の連成運動による影響と考えるとよく理解できる。

ここで、アンカーワイヤ方式の場合および引船方式の場合のロールの最大動揺量を比較すれば、波向 90° および波向 60° の場合ともに、有義波周期 0.95s (6.0s)においてはアンカーワイヤ方式の場合のロールの動揺量が大きくなり、逆に有義波周期 1.27s (8.0s)以上の長周期波側においては引船方式の場合の動揺量が大きくなることわかる。このことから、波向が変化した場合でも、アンカーワイヤ方式によるシステムを用いれば、長周期波中におけるロールの動揺を引船方式の場合よりも低減可能であると言える。しかしながら、短周期波に対しては引船方式の場合よりもロールの動揺量が大きくなり、アンカーワイヤ方式によるシステムの有効性はやや低下す

ると考えられる。

5.6 ケーソンの設置誤差

(1) 概要

アンカーワイヤ方式によるシステムの水理模型実験においても、引船方式の場合と同様に、各ケースのケーソン据付作業終了後に据付ケーソンの設置誤差をスケールにより計測している。このケーソンの設置誤差の測定方法は引船方式の場合と全くの同一方法ではあるが、アンカーワイヤ方式についてその測定方法を改めて図示すると図-22のようになる。

ケーソンの設置誤差とは水平平面内における据付ケーソンの既設ケーソンからのずれを意味しており、ケーソンの動揺6成分で言えばスウェイとヨウの組み合わせで表現できる。(b)~(e)図はこのようなずれの状態の4種類の組み合わせを示している。実際に起こり得ると考えられる据付ケーソンの最終的な着底状態は、(b)~(e)図に示した4種類の状態にこれらの状態のX軸に関して対称な4種類の状態を加えた合計8種類となる。ここでは、ケーソンの設置誤差の測定を簡略化するために、(a)図に示した絶対座標系のX軸方向(ケーソンのサージ方向)およびY軸方向(ケーソンのスウェイ方向)に沿って設置誤差を測定した。図-22には、それぞれのケーソン着底状態に対する設置誤差の測定位置を太線で示し、また測定された設置誤差の表記方法も表示している。

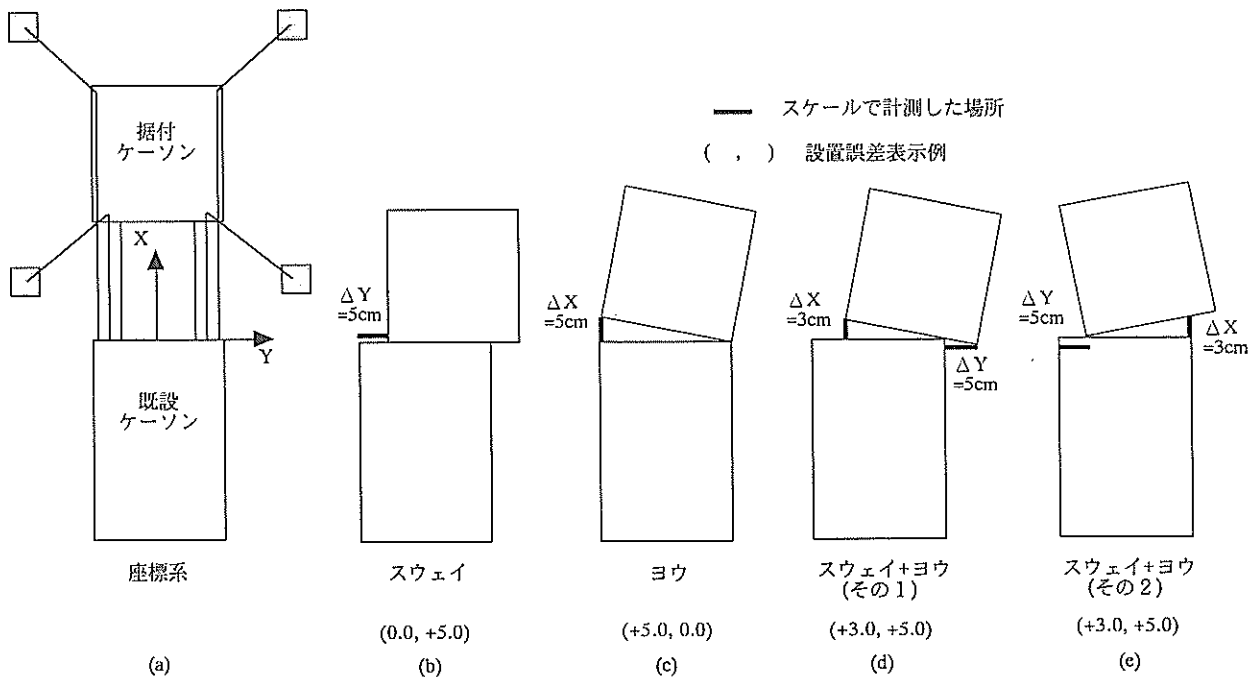


図-22 ケーソンの設置誤差の測定方法

表-4 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)		ΔX ΔY		ΔX ΔY		ΔX ΔY		ΔX ΔY		ΔX ΔY		ΔX ΔY	
有義 波周期 (s)	0.95 (6.0)	0.0	-0.2	0.0	-0.8	0.0	+0.1	0.0	0.0	0.0	-0.7	0.0	-0.5
		0.0	-0.3	0.0	-1.0	0.0	-0.8	0.0	+0.4	0.0	-0.7	0.0	-0.2
	1.27 (8.0)	0.0	-0.5	0.0	-0.8	0.0	-0.5	0.0	0.0	0.0	-0.9	+0.3	-1.0
		0.0	-0.9	0.0	-0.4	0.0	-0.2	0.0	+0.5	0.0	+0.1	0.0	-0.1
	1.58 (10.0)	0.0	-0.9	0.0	-0.7			0.0	-0.1	0.0	-0.3		
		0.0	-1.0	0.0	-0.6			0.0	+0.5	0.0	0.0		
	1.90 (12.0)	0.0	-0.6	0.0	-1.0			0.0	-0.6	0.0	-0.8		
		0.0	-0.8	0.0	-0.8			0.0	+0.4	0.0	-0.7		

(注) 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。

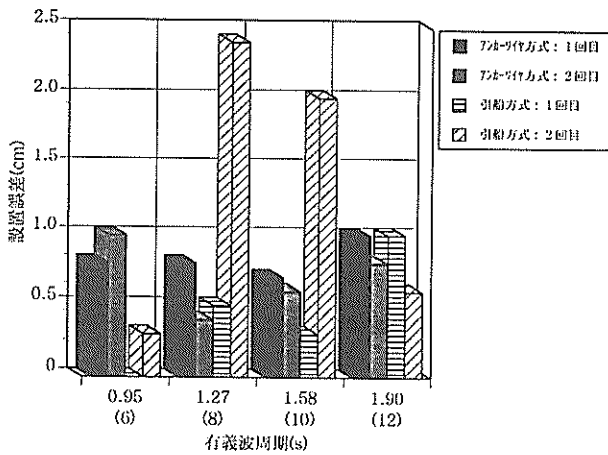


図-23(1) ケーソンの設置誤差（Y軸方向）
（不規則波，有義波高2.5cm (1.0m)，波向90°）

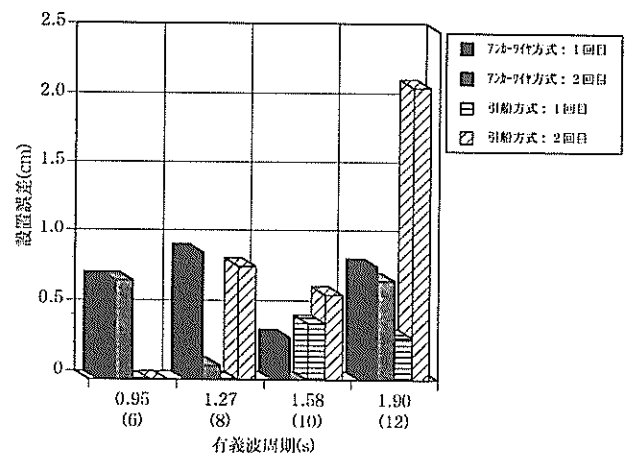


図-23(2) ケーソンの設置誤差（Y軸方向）
（不規則波，有義波高2.5cm (1.0m)，波向60°）

なお，設置誤差の正負の符号は，(a)図の座標系に則って付けている。

(2) ケーソンの設置誤差の計測結果

表-4は不規則波中実験の各ケース終了後に測定した据付ケーソンの設置誤差を示す。不規則波中実験は各ケースとも2回実施しており，その2回の実験結果をこの表に掲載している。また，図-23(1)~(2)は，それぞれ波向90°および波向60°で有義波高2.50cm (1.0m)の場合の据付ケーソンのY軸方向の設置誤差を表-4から抜き出して，引船方式の場合の実験結果とともに棒グラフで表示したものである。

まず，表-4から，有義波高および有義波周期のような波浪条件とケーソンの設置誤差との間に明確な関係が見られないことがわかる。つまり，直感的に設置誤差が大きくなると考えられる有義波高が大きい場合，また有

義波周期が長周期の場合でも設置誤差が小さいこともある。具体的に例示すると，波向90°において，有義波高2.50cm (1.0m)かつ有義波周期1.58s (10.0s)のときに設置誤差が0.7cm (0.28m)あるいは0.6cm (0.24m)となり，有義波高3.75cm (1.5m)かつ有義波周期1.27s (8.0s)のときは設置誤差が0.5cm (0.20m)あるいは0.2cm (0.08m)である。また，波向60°においては，有義波高2.50cm (1.0m)かつ有義波周期1.58s (10.0s)のときに設置誤差が0.3cm (0.12m)あるいは0.0cm (0.0m)であり，有義波高3.75cm (1.5m)かつ有義波周期0.95s (6.0s)のときは設置誤差が0.5cm (0.20m)あるいは0.2cm (0.08m)となる。すなわち，以上のような高波高あるいは長周期波の波浪条件のときでも，ケーソンの設置誤差は0.0~0.7cm (0.0~0.28m)と小さい値を示している。このように，アンカーワイヤ方式の場合

は、ケーソン据付作業時における波浪状況とケーソンの設置誤差の大小に関して相関関係がないと言える。この傾向は、高波高あるいは長周期波の波浪条件下でケーソンの設置誤差が増大する傾向にあるという引船方式の実験結果とは相違している。

ここで実施された実験ケースの中では、測定された設置誤差の最大値はY軸方向の設置誤差の1.0cm (0.40m) であり、Y軸方向の設置誤差が0.0cm (0.0m) であるのは全体の中でも3例しかない。これに対し、X軸方向の設置誤差はほとんど全部のケースが0.0cm (0.0m) であり、唯一、波向 60° のときの有義波高3.75cm (1.5m) かつ有義波周期1.27s (8.0s) の場合において設置誤差が0.3cm (0.12m) の値を示している。また、これと関連して、波向 90° の場合と波向 60° の場合の設置誤差の差異を比較してみても、ケーソンの設置誤差に対する波向の影響がほとんどないことがわかる。このことを端的にまとめると、アンカーワイヤ方式によるシステムにおいては、ケーソンの設置誤差への波向の影響は小さく、Y軸方向の設置誤差よりもX軸方向の設置誤差の方が小さくなり、ほとんど全ての実験波浪条件に対してX軸方向の設置誤差は発生しないということになる。これは、ケーソンが水平面内で回転した(ヨウが発生した)状態でケーソンの設置が完了するケースがほとんどないことを意味する。引船方式の場合では、波向 60° で高波高あるいは長周期波のときにケーソンが回転して設置されるという実験結果を得ており、この方式ではケーソンの設置誤差と波向とが強い相関性を有している。

図-23(1)~(2)を見ると、以上に示したような傾向が視覚的に理解できる。これらの図から、有義波高2.50cm (1.0m) のときには、アンカーワイヤ方式の場合と引船方式の場合のケーソンの設置誤差に関しては、引船方式の場合は長周期波側で設置誤差が非常に大きな値を示すことがあるが、アンカーワイヤ方式の場合はすべてのケースについて設置誤差が1.0cm (0.40m) 以下であることがわかる。また、短周期波側においては、アンカーワイヤ方式の場合の設置誤差が引船方式の場合と比較して大きいときもあるが、長周期波側においては、引船方式の場合の設置誤差がアンカーワイヤ方式の場合よりも大きくなる傾向がわかる。

外洋に面している港湾等の波浪環境の厳しい海域においては、ケーソンの据付作業時に要求されるケーソンの設置誤差の許容範囲は、現行では約0.2~0.5mである。これを実験で用いたモデルスケール1/40で換算すれば、0.50~1.25cmになる。よって、アンカーワイヤ方式によるシステムでは、実験した範囲のすべての波浪条件に対

してケーソンを目標位置に設置可能であることが確認できる。一方、引船方式の場合のケーソンの設置誤差は、高波高あるいは長周期波の場合に設置誤差が大きくなる傾向にあり、しばしば設置誤差が許容限界値を超えている。また、本模型実験においても引船方式の場合と同様にケーソンへの注水速度を一定としていることから、アンカーワイヤ方式によるシステムに関しては、引船方式の場合と異なり、注水速度のケーソンの設置誤差への影響はほとんどないと考えられる。以上のようなことから、アンカーワイヤ方式によるシステムは、引船方式によるシステムと比較してより高精度にケーソンの設置を行うことが可能であり、同時にケーソン据付作業の稼働率の向上にも資することができると言える。さらに、注水速度を可変とした実際のケーソン据付作業を再現すれば、ケーソン着底直前の滑動現象を抑制することになり、その時にウインチに作用する荷重を低減できるとともに、ケーソンの設置誤差もより一層小さくなるものと考えられる。

6. 結論

筆者らは、現状では作業員が直接手動で実施しているウインチ操作作業を自動化することにより、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。この革新的なシステムの開発目的は、ケーソンの据付作業におけるウインチおよび緊張したワイヤラインの直近における作業の回避等の安全性対策、将来の作業員の高齢化あるいは減少に備えた据付作業の省力化、さらにはケーソンの設置限界波高の向上による据付作業の稼働率の向上等を実現することにある。

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。

第一報では、これら2方式のうち、引船方式による自動設置システムの有効性を水理模型実験により検討した。その実験結果によると、引船方式によるシステムを使用した場合は、有義波高0.8m以下かつ有義波周期9.0s以下の現在のケーソン据付作業時における限界波浪条件内では、ケーソンの据付作業を自動的かつ安定的に行え、ケーソン設置目標位置に十分な精度で設置できることが検証できた。ところが、この限界波浪条件外の高波高あるいは長周期波という波浪条件下においては、引船方式によるシステムではケーソン据付作業の安定性が低下し、ケーソン着底後の設置精度が確保できない場合も起こり得ることが確認された。

そこで、本報告では、引船方式によるシステムと比較して、より安定的で高精度なケーソンの据付作業を実行可能と考えられるアンカーワイヤ方式による自動設置システムについて、引船方式の場合と同様な水理模型実験によりその有効性を検証した。その結果、アンカーワイヤ方式によるシステムを使用した場合は、ケーソン据付作業の安定性および最終的なケーソン設置精度において、引船方式によるシステムよりも効果的であることが実証され、アンカーワイヤ方式によるシステムの優位性を明示することができた。

ここで、ケーソンの動揺特性およびウインチの制御信号等に関して、本研究で実施した水理模型実験において明らかとなった主要な性状を以下にとりまとめて示す。

1) アンカーワイヤ方式によるシステムでは、不規則波中におけるケーソンの動揺量は、短周期波中と比較して長周期波中において大きくなる傾向にあるが、サージ、スウェイ、ロール、ピッチについ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、引船方式の場合に短周期波中において観察されたケーソンのドリフトは、アンカーワイヤ方式の場合にはほとんど現れない。アンカーワイヤ方式の場合のケーソンの動揺量は、全体的に見ると引船方式の場合よりも小さくなる。

2) 波向 90° および波向 60° の不規則波に対するケーソンの動揺量は、アンカーワイヤ方式の場合には、短周期波中および長周期波中のいずれにおいてもほとんど差異がない。引船方式の場合のケーソンの動揺量は、短周期波中では波向による影響は小さいが、長周期波中では波向 90° のときに大きくなる。このことから、アンカーワイヤ方式は、引船方式と比較して波向の変動による影響を受けにくいケーソン据付手法であると言える。

3) アンカーワイヤ方式によるシステムにおいては、短周期波中では、ケーソンの動揺量およびドリフト量をより小さくすることができ、引船方式の場合よりもケーソン据付作業の安定性が向上する。また、長周期波中においては、引船方式の場合にはケーソンの据付作業を安定して行うことが困難であるが、アンカーワイヤ方式では4方向に展張されたワイヤによる拘束力のために、安定的なケーソン据付作業を実行することができる。

4) 引船方式の場合と同様にアンカーワイヤ方式の場合においても、ケーソンがマウンド上に着底する直前には、波浪によるケーソンの滑動現象が発生する。しかしながら、実際のケーソン据付作業を正確に再現したケーソン着底直前の急速注水を実施すれば、この滑動現象を低減させることは可能であると考えられる。

5) アンカーワイヤ方式によるシステムにおいて、不

規則波中実験におけるウインチの制御信号出力回数は、静水中実験の場合よりも増加する。これは、不規則波中実験では、波浪によって引き起こされたケーソンの動揺が、法線直角方向許容範囲や許容回転角を超えることが多くなるからであり、引船方式の場合と同じ特性を示している。

6) アンカーワイヤ方式の場合のウインチの制御信号出力の時刻歴から、短周期波中よりも長周期波中において制御信号出力が激しく変動し、信号出力回数も多くなることが判明した。長周期波中では、短周期波中の場合よりもケーソンの動揺が大きくなる傾向にあるために、ウインチの制御信号出力も増加するものと考えられる。

7) アンカーワイヤ方式によるシステムの不規則波中実験においては、ウインチへの作用荷重は短周期波中よりも長周期波中で増大し、ケーソンの動揺量が長周期波中で大きくなる傾向と一致する。このとき、ウインチに作用する最大荷重は、引船方式の場合と比較してかなり大きいことから、実用的には、ウインチに過大荷重が作用しないようなワイヤの自動リリース（自動繰出し）機構を導入し、ケーソンの動揺を抑制しながらワイヤの展張状態を変化させるような過大荷重の発生を回避するシステムにする必要がある。

8) アンカーワイヤ方式の場合のケーソンの設置誤差は、有義波高および有義波周期のような波浪条件との間に明確な相関が見られない。この傾向は、高波高あるいは長周期波の波浪条件下において、ケーソンの設置誤差が増大する傾向にある引船方式の場合とは相違している。また、現在のケーソン据付作業における設置誤差の許容範囲と比較すると、アンカーワイヤ方式によるシステムでは、実験した範囲のすべての波浪条件に対してケーソンを設置目標位置に据付けることが可能であると言える。

最後に、本研究において得られた引船方式によるシステムおよびアンカーワイヤ方式によるシステムそれぞれの特徴を、項目ごとに比較して表-5に示すこととする。

7. あとがき

防波堤ケーソンの自動設置システムは、将来的には、従来用いられている防波堤ケーソンの据付手法に代わるものとして、実際の防波堤築造に利用されることが期待される。第一報および本報告によって、水理模型実験レベルでは本システムの有効性が検証されたことから、今後は、現地実証実験を行うことで本システムの現場への適用性について調査することが必要となる。

なお、実際のケーソン据付作業においてケーソン上お

表-5 自動設置システムの各方式の比較

項 目		引船方式	アンカーワイヤ方式
自動設置システムの自動化の範囲		引船による位置制御を除いた部分を自動化。	システムすべてを自動化。
ケーソンの動揺特性	ケーソンの動揺量 (波周期、波高、波向の影響)	長周期波中あるいは高波高中で増大する。 長周期波中でケーソン側面に垂直な波向の場合に大きい。 アンカーワイヤ方式よりも動揺量が大きい。	長周期波中あるいは高波高中で増大する傾向にあるが、波周期、波高の影響は小さい。 波向の影響も小さい。 引船方式よりも動揺量が小さい。
	ケーソンのドリフト	短周期波中において発生する。	ほとんど発生しない。
	ケーソン着底直前の滑動現象	発生する。 ケーソン着底直前の急速注水による動揺の低減対策が必要。	発生する。 ケーソン着底直前の急速注水による動揺の低減対策が必要。
	ケーソンの動揺量の抑制対策	引船による位置制御の強化。 ケーソン着底直前の急速注水による動揺の低減。	ケーソン着底直前の急速注水による動揺の低減。
ウイインチ	ウイインチの制御信号出力	長周期波中で増加する。	長周期波中で増加する。
	ウイインチへの作用荷重	非常に大きな荷重となる。 実用化にはワイヤの自動リリース機構の導入、引船の能力の強化等が必要。	長周期波中で増大し、引船方式の場合より最大荷重は大きい。 実用化にはワイヤの自動リリース機構の導入等が必要。
据付手法の妥当性	ケーソン据付作業の安定性	短周期波中あるいは低波高中では安定性が高い。 長周期波中では安定性が低下する。	短周期波中、長周期波中に拘らず、引船方式よりも安定性が高い。
	ケーソンの設置誤差	長周期波あるいは高波高の場合に設置誤差が増大する。 有義波高0.8m以下、有義波周期9.0s以下では、高精度なケーソン据付が可能。	波浪条件と明確な相関がない。 実験したすべての波浪条件に対して、高精度なケーソン据付が可能。
	ケーソンの位置制御手法の有効性	ケーソン据付作業の安定性、ケーソンの設置精度から判断すると、アンカーワイヤ方式よりも劣っている。	ケーソン据付作業の安定性、ケーソンの設置精度から判断すると、引船方式よりも優れている。
今後の課題	自動ワイヤリングシステムの開発	ワイヤ配置状態が単純であるため、実用化は容易である。	ワイヤ配置状態が複雑となるため、実用化はやや困難になる。
	自動注排水システムの開発	両方式とも同一のシステムとして開発可能。	両方式とも同一のシステムとして開発可能。
	その他	自動設置システムにより制御が行えない動揺成分を低減させる方法の開発が課題。 実用化には引船との相互通信手段の確立が必要。	自動設置システムにより制御が行えない動揺成分を低減させる方法の開発が課題。

よび作業船の甲板上の作業を完全に無人化するためには、据付ケーソン上でのワイヤリングを自動的に行う自動ワイヤリングシステム、ケーソンへの注排水を無人運転化した自動注排水システム、そしてケーソンの据付作業を自動的に行う自動設置システムの3つのシステムが連動したケーソン据付手法を用いる必要がある。これまでの研究では、これらの中で最も主要かつ重要なシステムである自動設置システムについてのみ開発し、水理模型実

験による検証を行っている。他の2つのシステムについては、机上での調査検討が行われているのみであるが、これら3つのシステムが組み合わさってはじめてケーソン据付作業における大幅な省力化が可能となる。よって、今後、防波堤ケーソンの自動設置システムの実用化に向けては、自動ワイヤリングシステムおよび自動注排水システムを開発することが必要である。ただし、アンカーワイヤ方式による自動設置システムに対して自動ワイヤ

リングシステムを構築し、実際のケーソン据付工事に適用することは、そのワイヤ配置パターンの複雑さからやや困難であると考えられる。したがって、引船方式による自動設置システムに対して自動ワイヤリングシステムおよび自動注排水システムを開発し、このシステムを実機スケールによる現地実証実験により検証することが実用化への第一歩となる。

また、ケーソンの自動設置システムでは抑制することができないケーソンの動揺成分を低減させる方法を開発することも課題である。これに関しては、据付ケーソンの両側下部に減揺板を取り付けた受動型、スラスタを取り付けた能動型の制御システムを既に開発し、その水理模型実験を実施している¹³⁾ので、今後、機会があれば報告したいと考えている。

(1999年3月31日受付)

謝辞

本研究は、平成3～7年度の5年間にわたって、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ものである。研究は、当所機械技術部計測施工研究室との共同で実施した。本研究を進めるにあたって御指導を賜った元構造部海洋構造研究室長の上田茂氏(現鳥取大学教授)、また研究実施時において何度も議論して頂いた元計測施工研究室長の松井創氏(現住宅都市整備公団)、東俊夫氏(現(財)国際臨海開発研究センター)に、深甚なる謝意を表す。さらに、本システムを開発するにあたっては、社団法人日本埋立浚渫協会に設置された『海洋構造物自動設置システム開発調査委員会』の各委員の方々より、特に自動設置システムの実用化に関する観点から多数の貴重な御意見、御助言を頂いており、ここに記して深く感謝の意を表する次第である。

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) Shiraiishi, 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) Shiraiishi, 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. Shiraiishi, 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) 白石悟, 米山治男, 高橋英俊: (報告) ケーソンの自動設置, 作業船, No.225, 1996年5月, pp.34~39
- 8) 米山治男, 白石悟, 名里健吾, 高橋英俊: 防波堤ケーソンの自動設置システムの開発 (第一報) - 引船方式の水理模型実験による検討 - , 港湾技術研究所報告, 第35巻第4号, 1996年12月, pp.37~74
- 9) 米山治男, 白石悟, 名里健吾, 高橋英俊: アンカーワイヤ方式によるケーソン自動設置システムの水理模型実験による検証, テクノ・オーシャン'96国際シンポジウム論文集, 1996年10月, pp.287~292
- 10) Yoneyama, H., S. Shiraiishi, K. Nazato and H. Takahashi: Experimental Study on Anchor Wire Type Automatic Installation System of Offshore Breakwaters, *Proc. of the 7th International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers*, 1997.5, pp.745~752
- 11) 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
- 12) 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.
- 13) Yoneyama, H., S. Shiraiishi, K. Nazato and H. Takahashi: Hydraulic Model Tests on a Tugboat Support Type Automatic Installation System for Caissons with Antirolling Boards, *Proc. of the 16th International*

Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, The American Society of Mechanical Engineers, 1997.4, pp.163~170

記号表

- T : 経過時間 (s)
- TX : ロールの動揺量 ($^{\circ}$)
- TY : ピッチの動揺量 ($^{\circ}$)
- TZ : ヨウの動揺量 ($^{\circ}$)
- 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)
- 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,
またはヒーブの動揺量 (cmまたはm)
- ΔX : ケーソンの X 軸方向の設置誤差 (cmまたはm)
- ΔY : ケーソンの Y 軸方向の設置誤差 (cmまたはm)