

防波堤ケーソンの据付作業の自動化に関する実験的研究

An experimental study on automatization of installation work of breakwater caissons

米山治男*, 白石 悟**, 名里健吾***

Haruo Yoneyama, Satoru Shiraishi, Kengo Nazato

*工修, 運輸省港湾技術研究所構造部主任研究官 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

**工博, 運輸省港湾技術研究所構造部海洋構造研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

*** 前 運輸省港湾技術研究所構造部海洋構造研究室

(現 運輸省第四港湾建設局長崎港湾空港工事事務所, 〒850-0961 長崎市小ヶ倉町 3-76-72)

We have developed an automatic installation system of breakwater caissons with the aim of saving labor and improving worker safety during caisson installation work. The system consists of a computer with A/D and D/A converters, controlled winches, and a data measurement system, and it enables automatic construction of offshore breakwaters. By use of this system, the present hand-powered winch operation on a floating crane can be automated, thereby improving the working conditions on offshore construction sites. In this paper, we explain an outline of the automatic installation system, especially focusing on the data measurement, motion prediction and control algorithm. We also provide the results of hydraulic model experiments for the automatic installation system conducted for confirming the validity of the algorithm of the system.

Key Words: breakwater caisson, installation work, winch, automatization

キーワード: 防波堤ケーソン, 据付作業, ウインチ, 自動化

1. まえがき

多数の熟練作業員の経験と勘によって遂行されている現行の防波堤ケーソンの据付作業においては, 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や将来的な作業員の高齢化あるいは減少への対応が強く望まれている。そこで, 本研究では, 据付作業の省力化, 作業員の安全性の確保等に寄与することを目的として, 防波堤ケーソン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), 2)}。

本システムは, 防波堤ケーソンの据付作業における熟練作業員の技術をアルゴリズム化することにより, 現状では作業員が直接手動で行っているウインチ操作をコンピュータを用いて自動化したエキスパートシステムである。このシステムでは, ケーソンの位置および動揺量, ウインチの張力, ケーソン設置海域の波高などのデータ計測, これらの計測データに基づくケーソンの位置および動揺の予測, その予測値に対応したウインチの自動操作によるケーソンの位置制御, といった計測, 予測, 制御の一連の動作をコンピュータを用いてリアルタイムに実行し, 防波堤ケーソンの据付作業の自動化を実現する。

本研究では, 自動設置システムを開発するにあたって, 事前に防波堤ケーソンの据付作業の事例調査を実施して据付手法の分類を行うとともに, 実際の据付作業におけるウインチ操作の状況を把握するための現地調査を行い, 現実の防波堤ケーソンの据付作業の方法を反映したシステムのアルゴリズムを構築した。さらに, 開発した自動設置システムのアルゴリズムの妥当性, 有効性については, 自動設置システムを用いた防波堤ケーソンの据付作業の水理模型実験を実施して, 据付作業の安定性および最終的なケーソン設置精度について詳細に検討することにより検証を行った。

2. 現行の防波堤ケーソンの据付作業

2.1 防波堤ケーソンの据付手法

防波堤ケーソンの自動設置システムの開発に先立ち, ケーソンの据付工事の実態を把握するために, 太平洋に面した 5 港湾で実施された 16 事例のケーソンの据付工事について調査した。調査結果から, ワイヤの配置状況やアンカーおよび引船の使用形態により, この据付方法は, ケーソンの位置制御用に引船を使用する引船方式(図

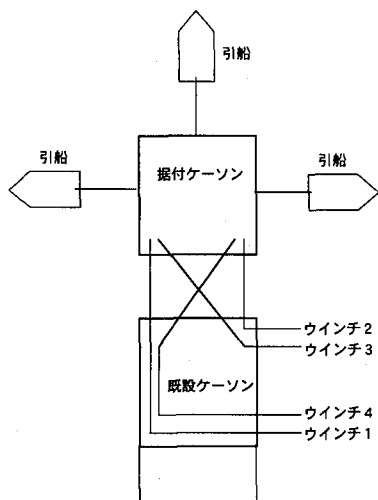


図-1 引船方式の据付作業

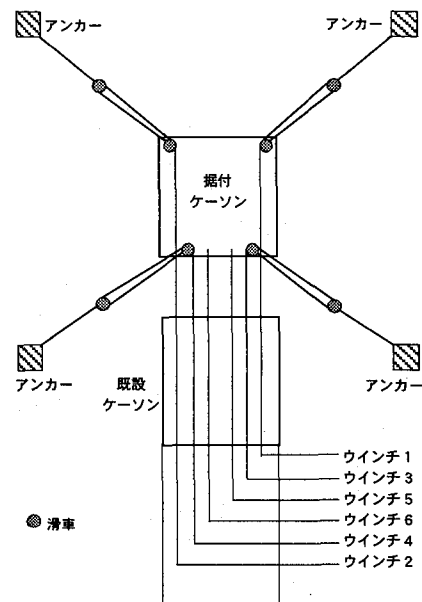


図-2 アンカーワイヤ方式の据付作業

ー1)、周辺海底地盤に設置されたアンカーにワイヤを展開させたアンカーワイヤ方式(図-2)の2種類のケーソン据付手法に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据付方法である。防波堤ケーソンの自動設置システムの開発においては、まず、引船方式によるケーソンの据付作業の自動化を目標にアルゴリズムの構築を行った。

2.2 防波堤ケーソンの据付時の波浪条件

防波堤ケーソンの据付工事は作業海域の気象・海象状態、特に波浪条件に大きく左右される。そこで、先に示したケーソン据付工事16事例において、工事日における波浪状態をとりまとめた³⁾。図-3は、調査した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、有義波周期の関係を示している。●および△は、それぞれケーソン据付の実施および中止を表す。ケーソン据付の実施・中止の判断は、現場海域の気象・海象予報や当日の現場における波浪状態の目視により決定されたものである。なお、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。この図から、現行の防波堤ケーソンの据付は、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以下の波浪条件で実施されていることがわかる。

3. 防波堤ケーソンの据付作業の現地調査

防波堤ケーソンの据付作業の実態、特にウインチ操作の状況を重点的に把握するために、八戸港八太郎地区北防波堤において平成3年12月6日および12月14日に現地調査を実施した。図-4はケーソン据付作業時の現

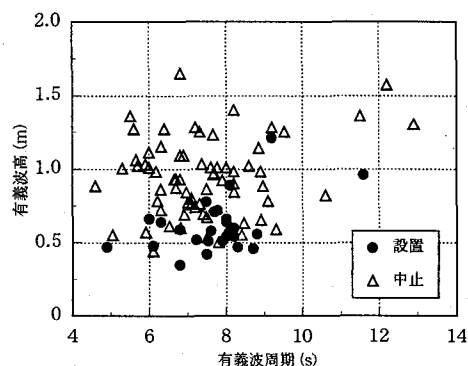
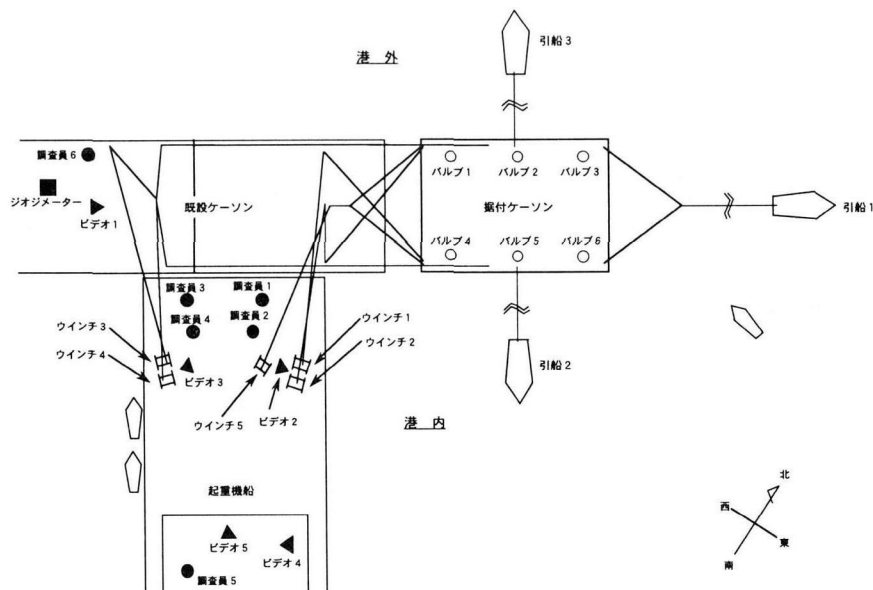


図-3 ケーソン据付作業時の波高および波周期

地における作業船、ウインチ、ワイヤ等の配置を示す。この図には調査時における観測体制も示している。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 $1.15 \times 10^4 \text{ kN}$ である。調査は、ケーソンの据付の全体状況、ケーソン据付の作業指揮者の指示、ウインチ操作のブロックダイアグラム、ケーソンの位置および動揺量と作業命令の関係、既設ケーソンと据付ケーソン間の距離等に関して行った。調査結果よりケーソン据付作業は、①据付ケーソンを既設ケーソンから数メートルの位置まで引寄せする引寄せ作業、②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接近作業、③据付ケーソンをさらに接近させ、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設置作業の3段階に分類できることがわかった。この調査結果に基づいて、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、自動設置システムのアルゴリズムを構築する際の参考とした。

写真-1は据付作業時における作業船上のウインチ操作の状況を示す。作業船上のウインチ操作員は、ケーソ



ン上の作業指揮者の指示に従ってウインチを手動で操作している。また、写真-2 は据付作業時のケーソン上の作業員の作業状況を示す。現状では多数の作業員がケーソン上に乗り、ワイヤリング、据付ケーソンへの注排水操作、据付ケーソンの法線からのずれ等の監視などの作業に携わっている。このような場合、ウインチ操作員および作業員は、緊張したワイヤの直近で作業しなければならないことから、時には危険にさらされることがある。自動設置システムを用いたケーソン据付作業では、ウインチ操作を自動化できるとともにケーソン上を無人化することが可能であり、作業員の安全性の確保および据付作業の省力化に寄与することができる。

4. 防波堤ケーソンの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、コンピュータを用いて、以下に示す計測、予測、制御の一連の手順を連続的に繰り返すことにより、目標とする位置にケーソ

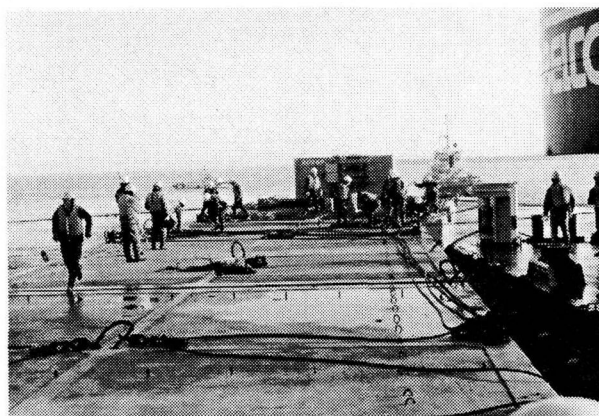
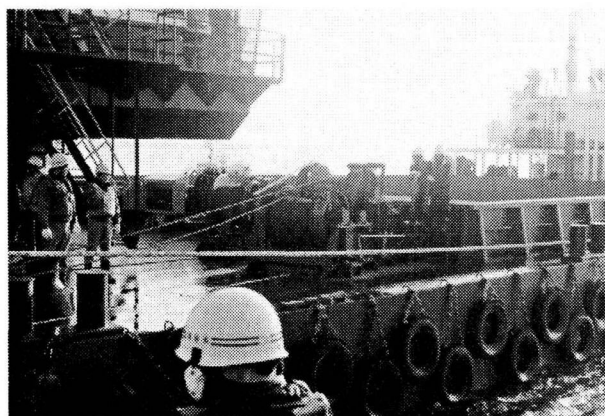
ンを自動的に据付けるものである。

- (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、ワイヤの張力、ケーソン設置海域の波高等を計測する。（計測）
- (2) 計測データに基づくケーソンの運動方程式を用いて、作業船に搭載したコンピュータにより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。（予測）
- (3) 位置制御アルゴリズムに従って、コンピュータから各ウインチに対してワイヤの繰出し、巻上げの操作命令を出力し、ケーソンの設置目標からのずれを修正する位置制御を行う。（制御）

図-5 は、自動設置システムの全体概要のブロック図である。この図からわかるように、本システムは、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

波高、ケーソンの位置および動揺、ワイヤの張力および巻上げ量等をデータ計測機器により計測する。



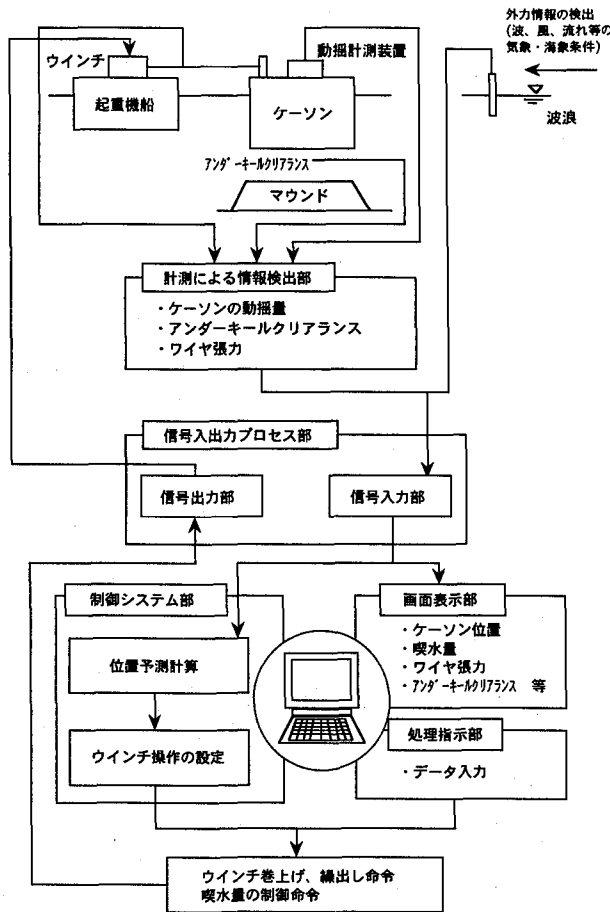


図-5 自動設置システムの概要図

(b) 信号入出力プロセス部

計測データおよびコンピュータ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 変換装置でデジタル信号または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、ウインチの作動の遅れなどを考慮して、ケーソンの運動方程式を時間領域で計算し、ケーソンの位置および動揺を予測する。そして、得られた予測値に基づいてウインチの制御信号を出力し、ケーソンの位置制御を行う。

(d) 画面表示部

ケーソンの位置および動揺をコンピュータのモニター上にヴィジュアルかつリアルタイムに表示する。

(e) 処理指示部

運転管理者の指示をコンピュータのキーボードから入力する。

なお、実際の防波堤ケーソンの据付工事に自動設置システムを適用してケーソン上および作業船の甲板上の作業を完全な無人化とするためには、ワイヤの取付および配置を自動的に行う自動ワイヤリング装置、ケーソンへの注排水を無人にて自動で行う自動注排水装置を自動設置システムと連動させて使用する必要がある。しかしな

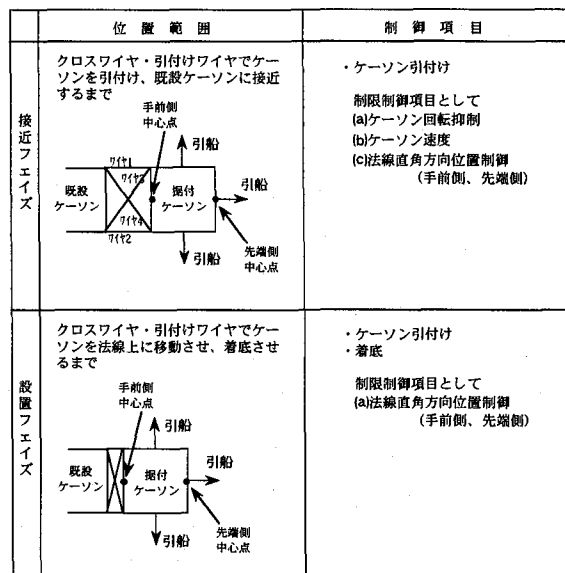


図-6 制御フェイズおよび制御項目

がら、これらの装置は自動設置システムのような複雑なアルゴリズムを有していないこと、既存の技術で開発が可能なことなどから本研究では検討していない。

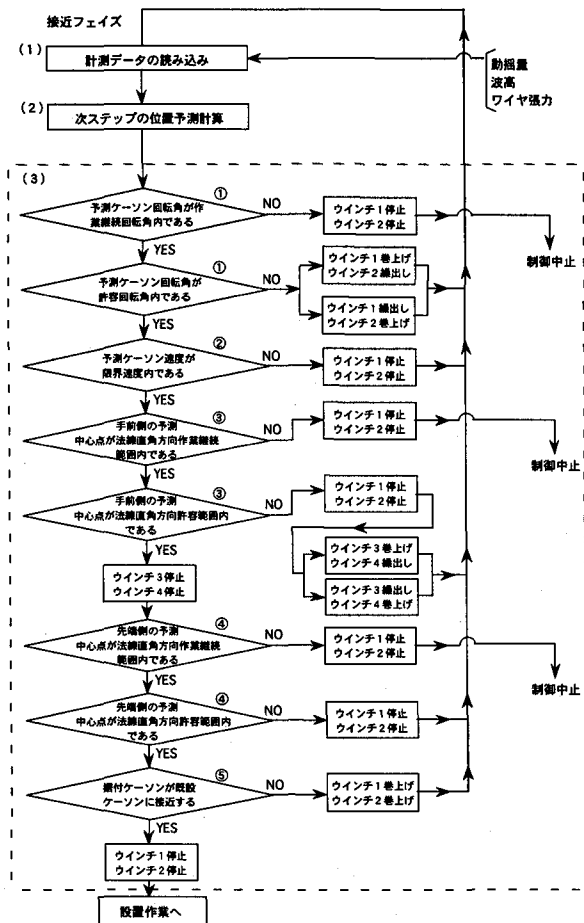
5. 自動設置システムのアルゴリズムの構築

5.1 位置制御アルゴリズム

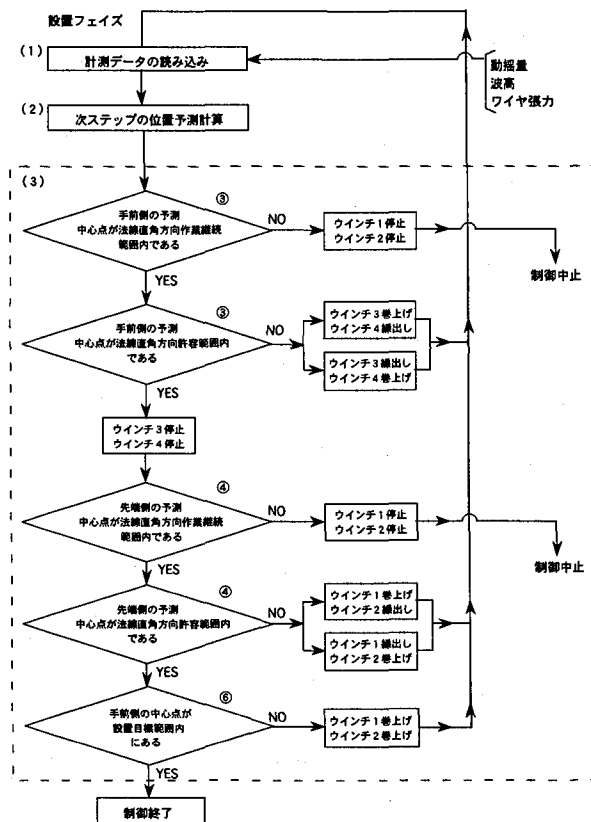
自動設置システムのアルゴリズムは、現在行われている防波堤ケーソンの据付方法を詳細に観察、分析して構築した。このとき、現地観測の調査結果を基に、防波堤ケーソンの据付作業を引寄せ作業、接近作業、設置作業の3段階の制御フェイズに分け、それぞれのフェイズに対して位置制御アルゴリズムを構築した。本システムでは、据付ケーソンの位置制御をサポートする3隻の引船への指令のみは無線による伝達手段をとり、その他の部分の計測および制御は、作業船上のコンピュータにより統括されるものとした。また、水理模型実験では、3つの制御フェイズのうち接近作業と設置作業について実施していることから、本論文でも接近作業、設置作業の制御アルゴリズムを中心に説明する。

図-6は、接近作業、設置作業の各制御フェイズの制御内容を示したものである。また、図-7(1)、(2)は各制御フェイズごとの位置制御アルゴリズムのフローチャートを示し、図-8はフローチャートに対応した主な制御モードと制御動作を示す。図-7(1)、(2)のフローチャート中の①～⑥の番号は、図-8の各制御モードの番号に対応しており、また、(1)～(3)の番号は、4.で示した自動設置システムによるケーソン据付作業の手順(1)～(3)に対応している。

ケーソンの据付作業が進行するにつれて、据付ケーソンおよび既設ケーソン間の距離がある設定値以下になると、接近フェイズから設置フェイズへと自動的に制御フ



(1) 接近フェイズ



(2) 設置フェイズ

図-7 位置制御アルゴリズムのフローチャート

エイズが移行する（図-6）．このとき、各制御フェイズにおいては、位置制御アルゴリズムに従って、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各制御動作が実行される（図-7、図-8）．すなわち、各タイムステップごとに予測されたケーソンの位置および動揺の状況に応じて、位置制御アルゴリズムに基づいて①～⑥の異なった制御動作がケーソンに対して行われる．具体的には、各ステップにおいてワイヤの巻上げ、繰出し、停止およびたるみ巻上げに対応した制御信号がコンピュータから出力され、それに応じて自動的にウインチが一定時間作動して、位置制御を実行する．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．

ここで行われるケーソンの位置制御は、ケーソンの水平面内の回転角の制御（ヨウの制御）、ケーソンの法線直角方向位置の制御（防波堤の法線に垂直な方向すなわ

ちスウェイの制御）の2つの制御モードであり、事前に設定された許容回転角および許容動揺範囲を越えた場合に制御が実行される．すなわち、自動設置システムでは、ケーソンの動揺6成分の中で水平面内の位置（スウェイおよびヨウ）の制御のみが位置制御アルゴリズムに基づいて実行される．基本的には、ケーソンの水平面内の回転に対する制御は接近フェイズにおいてウインチ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は設置フェイズにおいてウインチ3およびウインチ4が行う．なお、ケーソンの引付けはウインチ1およびウインチ2によって実行される．

5.2 ケーソンの位置予測計算方法

自動設置システムでは、位置制御アルゴリズムに従って次のタイムステップにおけるウインチ操作信号を設定するために、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、ワイヤの張力等のデータを基に、ケーソンの位置および動揺の予測計算をコンピュータ内で実行する．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

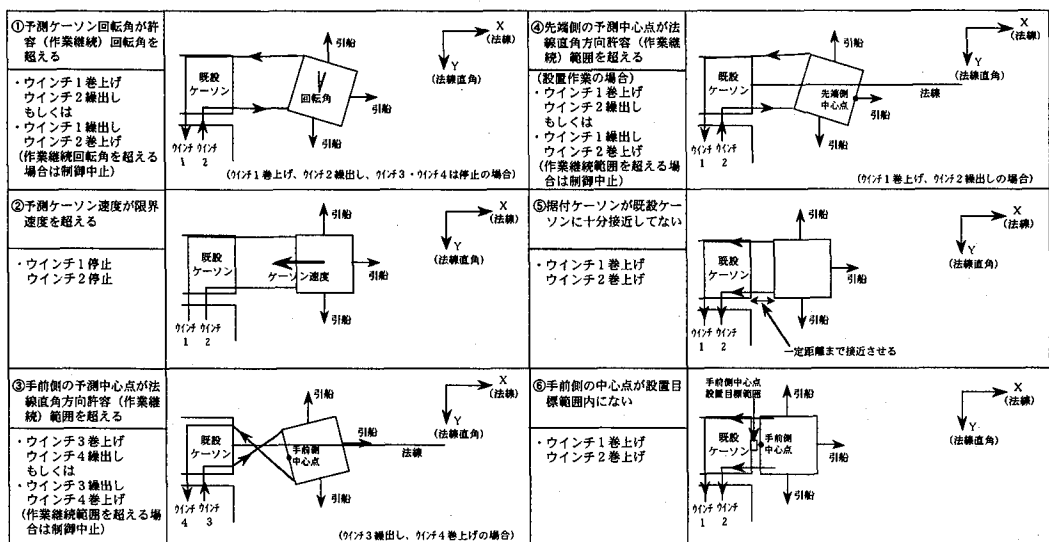


図-8 主要な制御モードと制御動作

を Runge-Kutta 法を用いて時間領域で解いている。この計測データを用いたケーソンの位置予測計算は、4. で示した自動設置システムによるケーソン据付作業の手順 (1) および (2) に対応するものであり、得られたケーソンの位置および動揺の予測値に対して手順 (3) のケーソンの位置制御が行われる。

一般にケーソンの運動方程式は次の 6 元 2 階連立常微分運動方程式で表される。

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

ここに、

M : 質量および慣性モーメントマトリックス

K : 付加質量および付加慣性モーメントマトリックス

C : 造波減衰係数マトリックス

B : 静水圧的復元力係数マトリックス

F : 波浪荷重ベクトル

R : ワイヤ張力ベクトル

$\ddot{x}$: 加速度ベクトル

$\dot{x}$: 速度ベクトル

x : 変位ベクトル、ただし、 $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ であり、浮体の動揺 6 成分である 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、を表す。

上式を用いて、計測データ転送の時間遅れおよびウィンチの作動の遅れ、そして予測計算時間の遅れを補正した上でケーソンの位置および動揺の予測を行い、ウィンチに対する制御信号を出力する。補正においては、ケーソン据付作業開始前に、計測データ転送時間、ウィンチの作動および予測計算時間の遅れを事前に測定しておき、これら全ての時間遅れを考慮したタイムステップを設定する方法を用いている。ここで、ケーソンの動揺 6 成分

に対して予測計算を行っているのは、ケーソンの位置および動揺を正確に予測するためである。しかしながら、この動揺 6 成分の中でスウェイおよびヨウに関してのみ位置制御が実行されるため、他の動揺 4 成分は実際には使われない。また、波力、流体力係数（付加質量係数、付加慣性モーメント係数、造波減衰係数）、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、据付けるケーソンに対して事前に数値計算を行い、コンピュータ内にデータベースとして登録している。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運動方程式の各係数項を変えるために使用される。なお、本研究では、波力、流体力は三次元特異点分布法^{4),5)}により計算している。

6. 水理模型実験

6.1 自動設置システムの実験模型

自動設置システムの実験模型は、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、ウィンチ模型およびウィンチ制御装置から構成される。水理模型実験は模型縮尺 1/40 のフルード相似則に従って実施した。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 () 内に現地換算値を併せて示すものとする。

水理模型実験に用いた据付ケーソン模型は、長さ 25.0m、幅 20.0m、型深さ 19.0m、重量 7.35×10^4 kN の実機ケーソンの 1/40 スケールのものである。表-1 にケーソンの諸元を示す。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。

写真-3 は引船方式による自動設置システムの水理模型実験におけるケーソン模型と自動設置システム模型を

表－1 据付ケーソンの諸元

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 (kN)	7.35×10^4	1.148

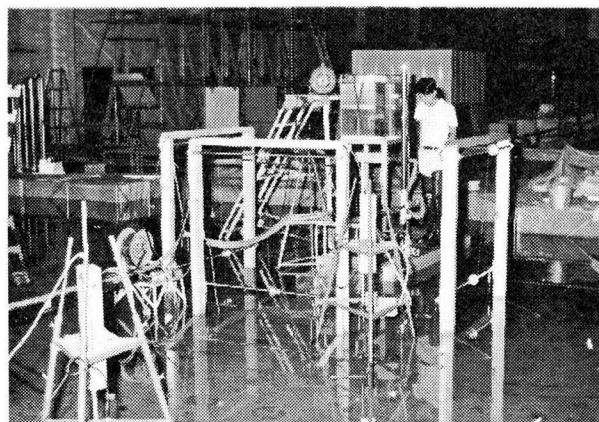
示す。また、写真－4 はケーソン据付作業中の様子を
示す。引船方式の場合は、実際には 3 台の引船を用いる必
要があるが、模型実験では引船をそのまま再現すること
が困難なため、3 台の架台によって模擬した。架台には
それぞれ 2 つの滑車に取り付けられており、滑車に模型
ケーソンから伸びたワイヤを通し、ワイヤの先端に重錘
を取り付けて、引船による引張力を一定としてモデル化
した。また、ケーソン模型への注水は、水面上 1.1m に
設置されたアクリル製のタンクに水を溜め、ホースを用
いた自然流下方式で注水速度を一定として行った。据付
ケーソン上の 3 つの箱の中には慣性動揺計測装置
(TMOS-2000, (株) トキメック製)⁹が搭載されてお
り、装置内の振動ジャイロによりケーソンの動揺の回転
成分（ロール、ピッチ、ヨウ）が検出される。一番左の
箱の上には豆電球が取り付けられており、位置計測装置
である X-Y トラッカー（C3162, 浜松ホトニクス（株）
製）の 2 台の CCD カメラで鉛直および水平方向から豆
電球の光の動きを追跡し、ケーソンの 3 次元位置（サー
ジ、スウェイ、ヒープ）が計測される。また、既設ケー
ソン上に設置した 4 台の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巻上
げ・繰出し量を測定する。なお、据付ケーソンの初期位
置は既設ケーソンから 25.0cm（10.0m）の距離である。

水理模型実験は不規則波中で実施した。実験における
有義波周期は 0.95s（6.0s）、1.27s（8.0s）、1.58s（10.0s）、
1.90s（12.0s）であり、また有義波高は 1.25cm（0.5m）、
2.50cm（1.0m）、3.75cm（1.5m）である。また、波向は、
ケーソンに真横から入射する場合の波向 90°、斜め後
方から入射する場合の波向 60° の 2 方向とした。実験
は全てのケースについて 2 回実施しており、実験水深は
50.0cm（20.0m）とした。なお、不規則波の生成にはブ
レットシュナイダー・光易型の波浪スペクトルを用いた。

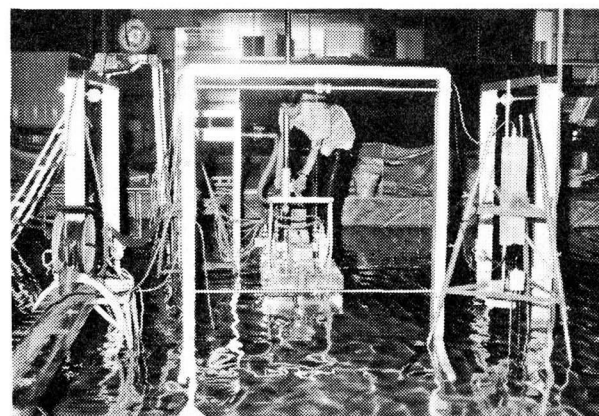
6.2 データ計測およびウインチ制御

図－9 は、自動設置システムにおける据付ケーソンの
動揺成分および座標系を示す。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
点に関して計測し、動揺の並進運動成分（サージ、スウ
エイ、ヒープ）は既設ケーソンの端辺中心に原点を持つ
絶対座標系に基づいて計測した。

図－10 は、自動設置システムの水理模型実験におけ



写真－3 自動設置システム模型の設置状況



写真－4 ケーソンの据付作業中の様子

るデータ計測およびウインチ制御のフローおよび模型の
配置の概略図を示す。計測データは、波高、ケーソンの
位置および動揺量、ワイヤの張力、ワイヤの巻上げ・繰
出し量である。一方、コンピュータからの出力データは、
ウインチの制御信号である。なお、模型実験においては、
コンピュータとしてエンジニアリングワークステーション
(AS4050GX, 東芝製) を、A/D・D/A 変換装置とし
て 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。また、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
ーズの移行は、据付ケーソンが既設ケーソンから 5.0cm
（2.0m）の位置とした。

7. 水理模型実験結果

水理模型実験結果のうち、ケーソンの重心点の軌跡、
ケーソンの動揺の時系列、ウインチデータの時系列、制
御信号出力回数およびケーソンの設置誤差についての実
験結果を示し、特に据付作業の安定性および最終的なケ
ーソン設置精度に関して検討することにより、自動設置
システムのアルゴリズムの妥当性、有効性について検証
する。この中で、据付作業の安定性については、ケー
ソンの重心点の軌跡およびケーソンの動揺の時系列の実験

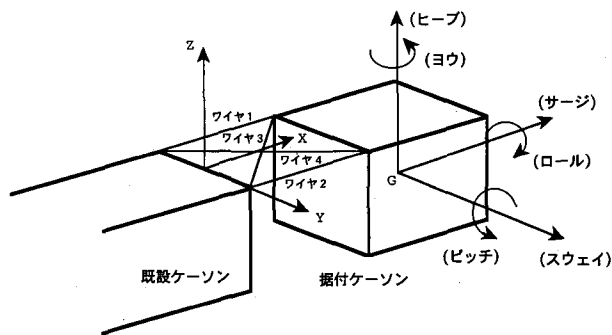


図-9 ケーソンの動揺6成分および座標系

結果に基づいて定性的に判断することになるが、ケーソン設置精度については、ケーソンの設置誤差の実験結果と現状でのケーソン据付作業の設置誤差とを比較して検討する。また、ウインチデータの時系列および制御信号出力回数の実験結果により、自動設置システムによるケーソンの位置制御状況の詳細を把握する。なお、水理模型実験は全てのケースについて2回実施しているが、2回の実験におけるケーソンの動揺状態、ウインチによる制御状況、ケーソンの設置誤差などの再現性については、不規則波中実験であるために完全に同一とは言えないまでも、おおむね同様なケーソン据付作業の状況が再現されていた。

7.1 ケーソンの重心点の軌跡

図-11 (1), (2) は、自動設置システムによる据付作業におけるケーソンの重心点の軌跡を示す。不規則波の波向は 90° 、有義波高は 2.5cm (1.0m) で、有義波周期はそれぞれ 0.95s (6.0s) および 1.90s (12.0s) である。以下の論文では、有義波周期 0.95s (6.0s) の波を短周期波、有義波周期 1.90s (12.0s) の波を長周期波と表記する。これらの図はケーソン据付作業後にコンピュータ

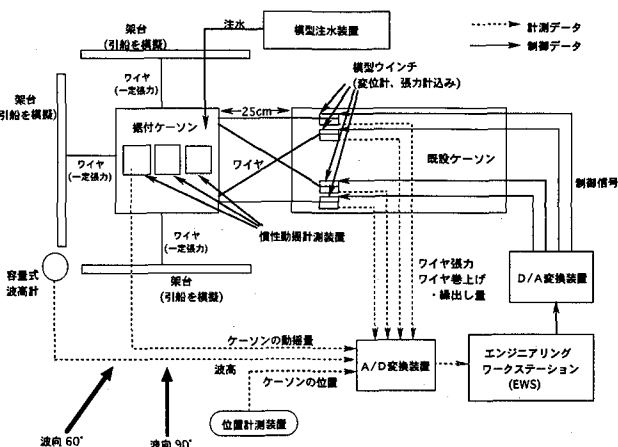
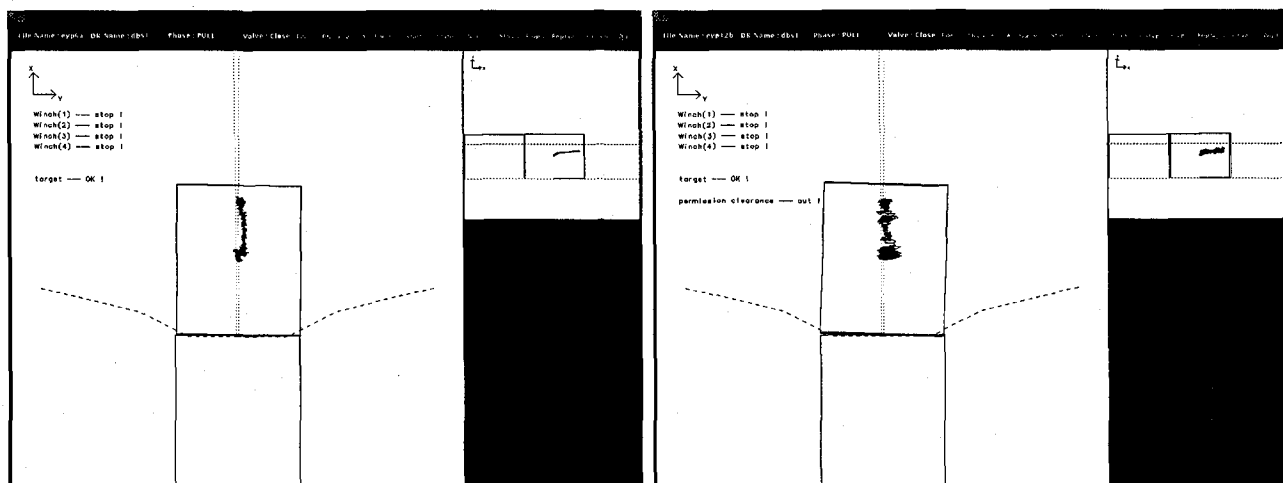


図-10 データ計測およびウインチ制御の概略図

のモニター上に表示されている画面のハードコピーを取ったものであり、この画面により運転管理者はケーソンの動揺状態をリアルタイムに観察できる。図中の左画面がケーソンの水平面内での位置を示す X-Y 平面（水平面）であり、右上画面がケーソンとマウンドとのクリアランスを示す X-Z 平面（鉛直面）である。X-Y 平面図中の2本の点線の内側はケーソンの動揺の許容範囲であり、ケーソンの重心点がこの範囲をはずれるとウインチがケーソンのスウェイ方向（法線直角方向）の位置制御を行う。またケーソンの回転に関しては、ケーソンのヨウが 2.0° 以上になるとウインチがケーソンのヨウ方向（水平回転角方向）の回転制御を行う。これらの制御開始条件はコンピュータへのキーボード入力によって任意に設定できる。

これらの図によると、短周期波中では波漂流力の影響によりケーソンが少し波下側に漂流するが、ケーソンの動揺は小さく、据付作業を安定して行うことができ、目標とするケーソン設置位置にケーソンを据付けることが



(1) 有義波周期 : 0.95s (6.0s)

(2) 有義波周期 : 1.90s (12.0s)

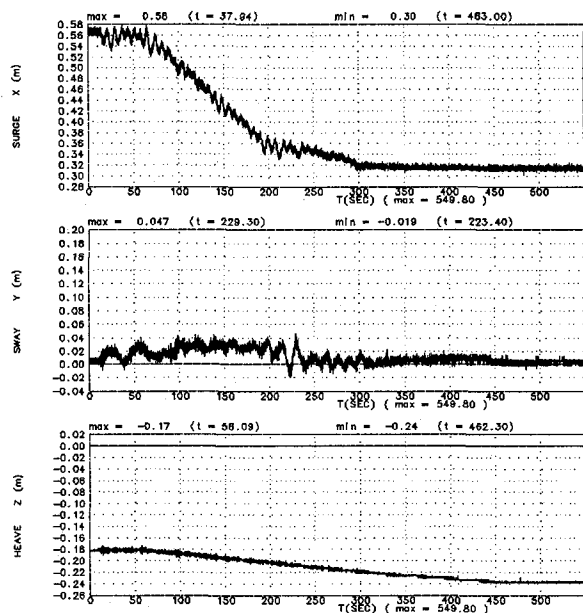
図-11 ケーソンの重心点の軌跡

できている。また、据付ケーソンが既設ケーソンに5.0cm (2.0m) まで接近したとき法線直角方向の位置制御が行われて法線上にケーソン重心点が移動しており、位置制御アルゴリズムが効果的に機能していることがわかる。一方、長周期波中では、ケーソンの動揺、特にスウェイとヒープが大きくなるが、ワイヤによる拘束力の影響もあり、ほぼ既設ケーソンの中心法線上をケーソンの重心点は推移している。注水を進めて行くにつれてヒープは減少し、最終的にはケーソンは設置目標内に据付けられる。しかしながら、短周期波中と比較すると、長周期波中ではケーソンの動揺量が大きく、ケーソンの据付作業の安定性は低下している。図-3 で示した現在のケーソ

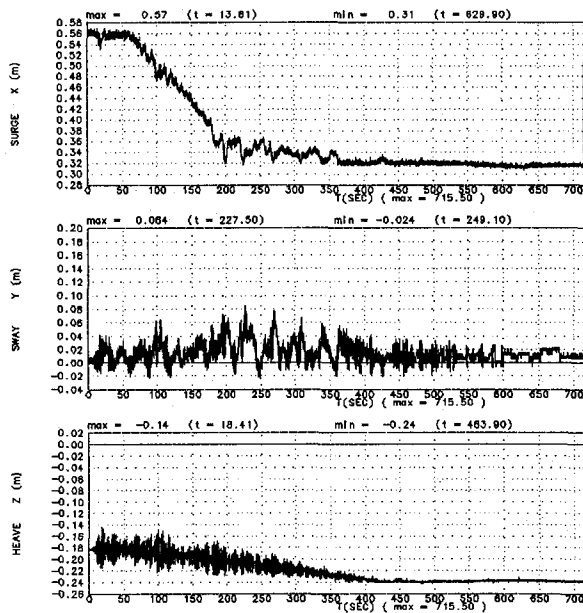
ン据付作業における限界波浪条件（有義波高 0.8m, 有義波周期 9.0s）を考慮すると、長周期波中でケーソンの据付を安定的に行うことが困難であることが理解できる。このような波浪条件下では、実際の据付作業において、引船によるケーソンの動揺制御を強化する必要がある。

7.2 ケーソンの動揺の時系列

図-12 (1), (2) および図-13 (1), (2) は、自動設置システムによる据付作業におけるケーソンの動揺量の時系列のうち、並進運動成分（サージ, スウェイ, ヒープ）および回転運動成分（ロール, ピッチ, ヨウ）を示す。波浪条件は図-11 の場合と同様である。

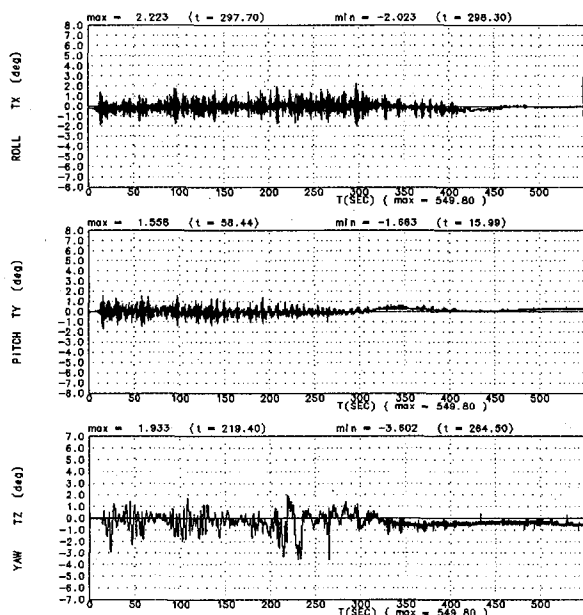


(1) 有義波周期: 0.95s (6.0s)

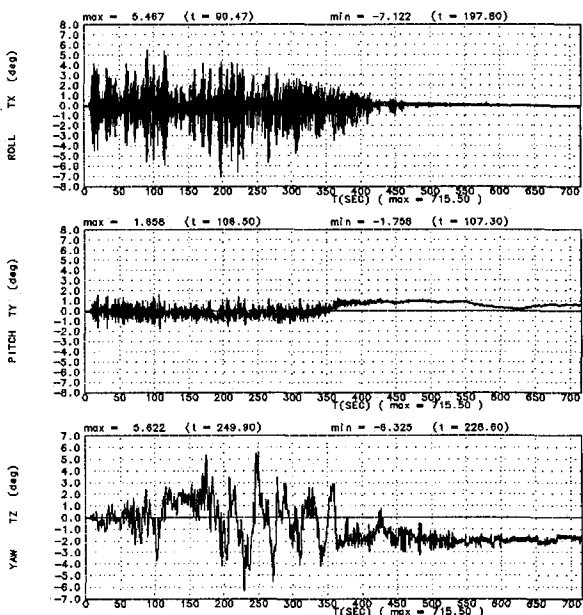


(2) 有義波周期: 1.90s (12.0s)

図-12 ケーソンの動揺の時系列（サージ, スウェイ, ヒープ）



(1) 有義波周期: 0.95s (6.0s)



(2) 有義波周期: 1.90s (12.0s)

図-13 ケーソンの動揺の時系列（ロール, ピッチ, ヨウ）

図-12を見ると、サージは据付作業開始直後には約0.56mであるが、据付ケーソンが既設ケーソン側に徐々に引寄せられることにより、最終的には約0.32mの一定値を示し、このとき据付ケーソンは既設ケーソンと接触している。長周期波中では、短周期波中と比較して、スウェーとヒープが大きくなっているが、ヒープは注水が進むにつれ徐々に小さくなり最後には約0.24mの一定値に落ち着く。このとき、据付ケーソンとマウンドの間のクリアランスはゼロである。これは、ケーソンの喫水量が増加して、クリアランスが小さくなるほどヒープが低減することを意味している。一方、ヒープが一定値になったときにスウェーが完全に一定値になっていないのは、ある程度注水が進みケーソンの重量が増すまでは波浪の影響によりケーソンの滑動が引き起こされるからである。模型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ーの滑動現象を抑制することは可能であると考えられる。

図-13を見ると、ロールおよびヨウは、スウェーと同様に短周期波中にくらべて長周期波中で大きくなるのがわかる。これは、ロール、ヨウおよびスウェー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と考えられる。特に、同じ水平面内の動揺成分であるヨウの時系列波形とスウェーの時系列波形は、非常によく似た傾向を示している。一方、ピッチに関しては、短周期波中と長周期波中においてほぼ同じ大きさであり、波浪条件の影響が小さいことがわかる。これらの動揺成分も、ヒープと同様に注水が進むにつれ徐々に減少していく。

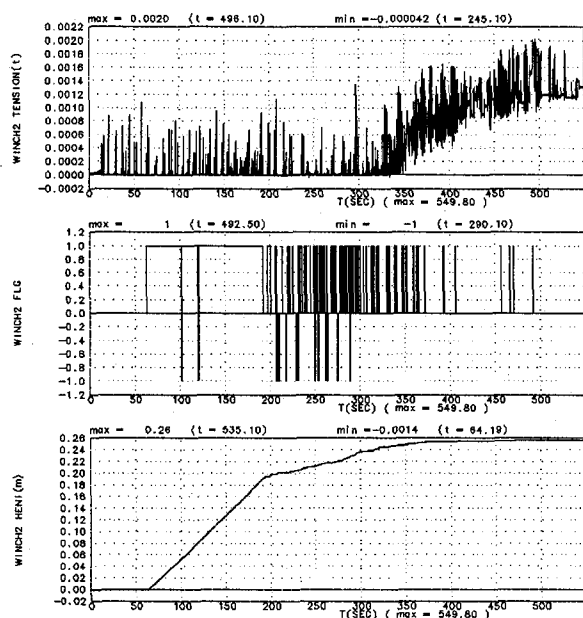
7.3 ウインチデータの時系列

図-14 (1), (2) は、自動設置システムによる据付

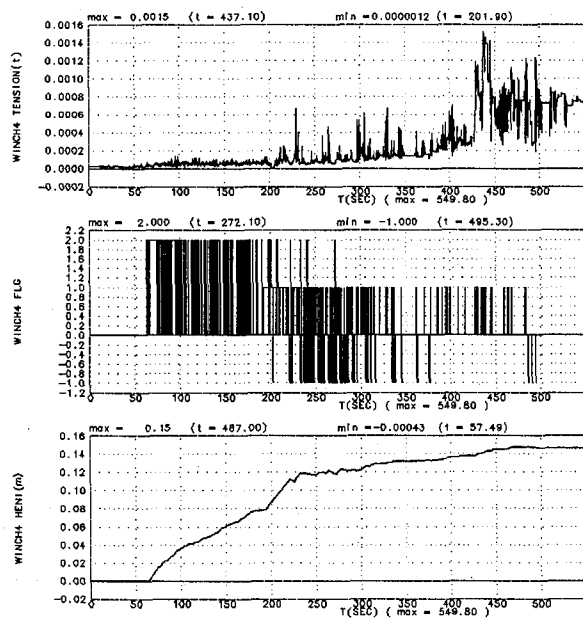
作業におけるウインチ 2 およびウインチ 4 のウインチデータの時系列をそれぞれ示す。不規則波の波向は 90° 、有義波高は 2.5cm (1.0m) で、有義波周期は 0.95s (6.0s) である。図の上から順にワイヤ張力、ウインチへの制御信号出力、ワイヤの巻上げ・繰出し量と経過時間との関係を表す。なお、ウインチの制御信号は、0.0 が停止、1.0 がワイヤの巻上げ、-1.0 がワイヤの繰出し、2.0 がワイヤのたるみ巻上げを表す。また、ワイヤの巻上げ・繰出し量は、正符号が巻上げ量、負符号が繰出し量を表す。

まず、ワイヤ張力に関しては、ケーソンの動揺あるいはウインチの動作によって瞬間的にワイヤが緊張するため、ワイヤの荷重がほとんどパルス的に発生している。また、据付ケーソンが既設ケーソンに接触した後、ウインチ 2 に関しては約 350s から、ウインチ 4 に関しては約 400s から急激にワイヤの荷重が増加している。これは、ウインチによる引付けと長時間に渡る注水の進行によりワイヤに大きな荷重が作用するためである。従って、実際の現場では、ケーソンの着底前の急速注水を行うこと、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機構を導入することなどの対策が必要である。

制御信号に関しては、ウインチ 2 への制御信号は、経過時間約 60s から出力され、ほとんど巻上げ信号あるいは停止信号であり、繰出し信号は非常に少ないことがわかる。ウインチ 1 およびウインチ 2 への繰出し信号は、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、この場合、ヨウの制御はあまり行われていないことになる。また、ウインチ 4 への制御信号は、制御初期はたるみ巻上げ信号が多いが、200s 付近からは巻上げ信号および繰出し信号が多くなる。これは、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



(1) ウインチ 2



(2) ウインチ 4

図-14 ウインチデータの時系列

エ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いため、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がたるんでしまうので、たるみ巻上げ信号の出力が多くなる。

また、ワイヤの巻上げ・繰出し量に関しては、ウインチ 2 の最大巻上げ量は約 25.5cm (10.2m) であり、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) とほぼ等しくなる。一方、ウインチ 4 の最大巻上げ量は約 14.5cm (5.8m) であり、ウインチ 4 がクロスワイヤに対する制御を行うため、ワイヤの巻上げ量が少なくなっている。

7.4 制御信号出力回数

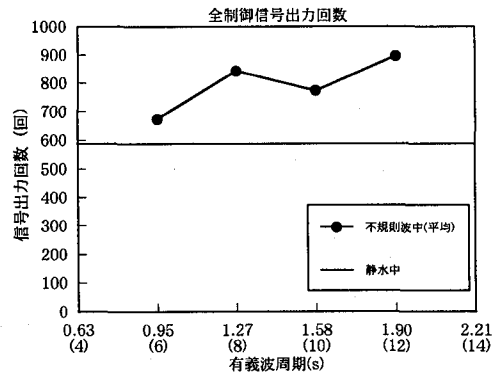
制御信号出力回数とは、単位タイムステップごとに出力されるワイヤの巻上げあるいは繰出しの命令をカウントしたデータである。

図-15 (1) は、波向 90° 、有義波高 2.5cm (1.0m) の場合の制御信号出力回数の総数を有義波周期に対して示す。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。また、比較のために、静水中で実施した水理模型実験における制御信号出力回数も載せている。

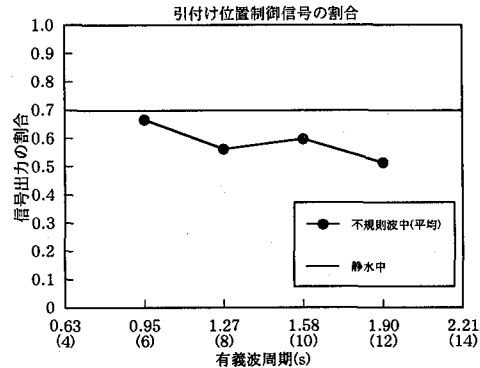
図から、長周期波になるほど信号出力回数が増加する傾向にあることがわかる。また、静水中実験における信号出力回数よりも、全ての有義波周期において不規則波中実験での信号出力回数が多い。これは、不規則波中実験では波浪によりケーソンが動揺するため、静水中実験と比較してケーソンの位置および回転角が法線直角方向許容範囲および許容回転角を越える場合が多くなるからである。

図-15 (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す。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 への制御信号を表す。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 への制御信号を表す。これら 2 つの制御信号の割合の和は 1.0 になる。

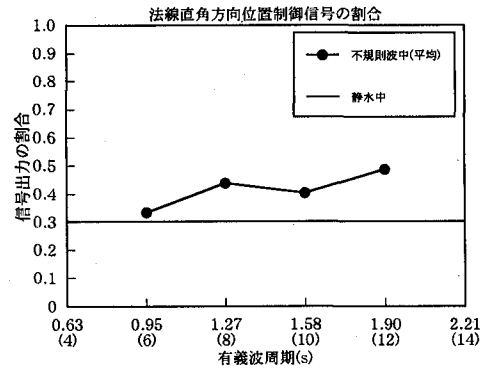
これらの図から、引付け位置制御信号の割合は、不規則波中実験の場合が静水中実験の場合より小さいことがわかる。これは逆に言えば、法線直角方向位置制御信号の割合が不規則波中実験の場合が静水中実験の場合より大きいことを意味する。この傾向は長周期波になるほど顕著になる。これは、不規則波中実験では波浪の影響により、特に据付作業の設置フェイズにおいてスウェイが発生し易くなるため、静水中実験の場合よりも法線直角方向の位置制御を多くする必要があるからである。



(1) 制御信号出力回数の総数



(2) 引付け位置制御信号の割合



(3) 法線直角方向位置制御信号の割合

図-15 制御信号出力回数

7.5 ケーソンの設置誤差

水理模型実験では各ケースの終了後、ケーソンの設置誤差をスケールで計測した。表-2 は、計測したケーソンの設置誤差を示す。ケーソンの設置誤差とは、着底後の据付ケーソン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、X 方向の設置誤差 ΔX (法線方向のずれ)、Y 方向の設置誤差 ΔY (法線直角方向のずれ) と表記する。

この表によると、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が大きくなるため設置誤差も大きくなる傾向にある。また、波向 60° で高波高あ

表-2 ケーソンの設置誤差

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

るいは長周期波のときにはケーソンが回転して設置される場合があり、設置誤差への波向の影響が大きいこともわかる。現在のケーソンの据付作業では、設置誤差の許容範囲（許容設置誤差）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 0.5~1.25cm になる。従って、自動設置システムを用いれば、波高 1.25cm (0.5m) の場合は全ての波周期に対して許容設置誤差以内でケーソンを目標位置に設置可能であることが確認できた。また、波高 2.5cm (1.0m) かつ波周期 1.27s (8.0s) 以上の場合にも、一部の許容設置誤差を越える例を除くと、多くのケースにおいて許容設置誤差以下でケーソンの設置が可能であることがわかった。

ここで、水理模型実験の状況を詳細に分析すると、設置誤差が許容範囲を越えたケースについては、ケーソンへの注水速度が一定であることに原因があると判明した。すなわち、ケーソンが設置目標範囲に入っている、注水速度を一定としていたために、十分な注水が行なわれケーソンが完全に着底する前に波浪の作用によりケーソンが滑動し、許容設置誤差を越えた位置で着底していたのである。実際の施工では据付作業の最終段階において注水速度を増加させているので、実験においても現場の状況と同じように注水速度を可変とすれば、ケーソンはより高精度に目標位置に設置できるものと考えられる。ただし、現行の防波堤ケーソンの限界波浪条件内（有義波高 0.8m 以下、有義波周期 9.0s 以下）ではケーソンの設置誤差が許容範囲内に収まることから、自動設置システムによって十分な精度でケーソンの据付を行うことが可能である。

8. まとめ

本研究では、防波堤ケーソンの据付作業の自動化を目的として、防波堤ケーソンの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。その際、ケーソンの据付作業の事例調査および現地観測に基づいて、現実の防波堤ケーソンの据付作業の手法を反映したシステムのアルゴリズムを構築した。また、水理模型実験を実施して、自動設置システムのアルゴリズムの有効性を検証した。

水理模型実験結果によると、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、十分な精度で据付けられることが確認できた。一方、高波高あるいは長周期波の場合には、ケーソンの動揺量が大きくなるためにケーソンの据付作業の安定性が低下し、ケーソンが許容設置誤差を越えて据付られる例もあることがわかった。しかしながら、このような場合でも、引船によるケーソンの位置制御を強化することや最終着底の段階でケーソンへの急速注水を実施することにより、ケーソン据付作業の安定性およびケーソンの設置精度はより向上するものと考えられる。

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ものである。また、研究を進めるにあたり、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』の各委員の方々に数多くの貴重な御意見、御助言を頂いている。ここに記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 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, pp.459-466, 1995.
- 2) 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, pp.523-530, 1996.
- 3) 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, 29p., 1996.
- 4) 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, pp.91-106, 1974.
- 5) Garrison, C.J.: Hydrodynamic Loading of Large Offshore Structures: Three dimensional Source Distribution Method, *Numerical Method in Offshore Engineering*, John Wiley & Sons, 1978.
- 6) 白石悟, 米山治男, 上田茂, 谷口武志, 伊藤公明, 小斉祐祐: 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, 38p., 1995.

(2000 年 9 月 14 日 受付)