

防波堤ケーソンの自動設置システムの 開発とその実験的検証

米山治男¹・白石 悟²

¹正会員 工修 独立行政法人港湾空港技術研究所地盤・構造部主任研究官 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail:yoneyama@pari.go.jp

²正会員 工博 独立行政法人港湾空港技術研究所地盤・構造部海洋構造研究室長 (同上)

防波堤ケーソンの据付作業の省力化、作業員の安全性の確保等に寄与することを目的として、現状では作業員が直接手で実施しているウインチ操作作業をコンピュータを用いて自動化することにより、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。本システムは、ケーソンの位置制御用に引船を使用する引船方式、周辺海底地盤に設置されたアンカーにワイヤを展張させ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。本研究では、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着目して、これら2方式による自動設置システムの制御アルゴリズムの妥当性および有効性を水理模型実験により比較検証した。

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

1. 緒言

近年、様々な分野の建設現場において、施工を自動化・省力化するための技術開発が進められているが、港湾の建設のような海洋工事では、陸上と比較して厳しい自然環境条件のために、自動化・省力化施工技術の導入が遅れているのが現状である。港湾の建設工事の中でも外洋性港湾における防波堤ケーソンの据付作業は、波浪・風・流れなどの自然環境の影響を大きく受ける状況の下で、経験を積んだ多数の熟練作業員の労働力に依存した従来式の手法で行われている^{1,2}。このような現行の防波堤ケーソンの据付作業に対して、最近では、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。具体的には、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、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、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、ケーソン据付作業の省力化および稼働率の向上による建設コストの縮減などが求められている。

一方、我が国において、自動化・省力化施工技術が導入された大型海洋構造物の据付・設置の事例としては、本州四国連絡橋の橋脚ケーソンの設置³⁻¹¹、沈埋トンネルの沈埋函の据付¹¹⁻¹⁵、釜石港湾口防波堤の大型ケーソンの据付¹⁶⁻¹⁸等があげられる。対象構造物の重量が大きいこれらの例では、海上に浮上させた構造物の位置をウインチで最適に制御しながら注水を行い、構造物の据

付を実施している。しかしながら、ウインチによる構造物の位置制御の自動化に関しては、比較的穏やかな波浪条件下で行われる沈埋函の据付において実現されているのみであり、他の事例では、ウインチを遠隔手動操作する方法が採用されている。すなわち、外洋性港湾における防波堤ケーソンの据付作業を含め、厳しい気象・海象条件下で大型海洋構造物の据付・設置を自動的に行うシステムは、現在まで実用化されていない状況にある。

以上のことから、本研究では、先に示した要請に応えるために、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¹⁹⁻²¹。自動設置システムは、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ものである。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。また、本システムは、ケーソンの位置保持用に引船を使用する引船方式、周辺海底地盤に設置されたアンカーにワイヤを展張させたアンカーワイヤ方式の2種類のケーソン据付手法に対する制御プログラムを組み込んでおり、どちらの方式でもケーソンの自動据付作業を実行できる。

本研究では、これら 2 方式による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、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ついて詳細な検討を行うことにより、両方式によるシステムの有効性に関して比較検証した。

2. 防波堤ケーソンの自動設置システム

(1) 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、最終的に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各種計測機器により計測する。
- 2) 作業船に搭載したコンピュータを用いて、計測データに基づくケーソンの運動方程式により、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。
- 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。

図-1 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。

①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・繰出し量等をデータ計測機器により計測する。

②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。

③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。

④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。また、波高、ケーソンの位置および動揺、ワイヤ張力等の計測データを時刻歴グラフとしてモニター上に表示する。

⑤処理指示部

運転管理者の指示をコンピュータへキーボードから入力する。

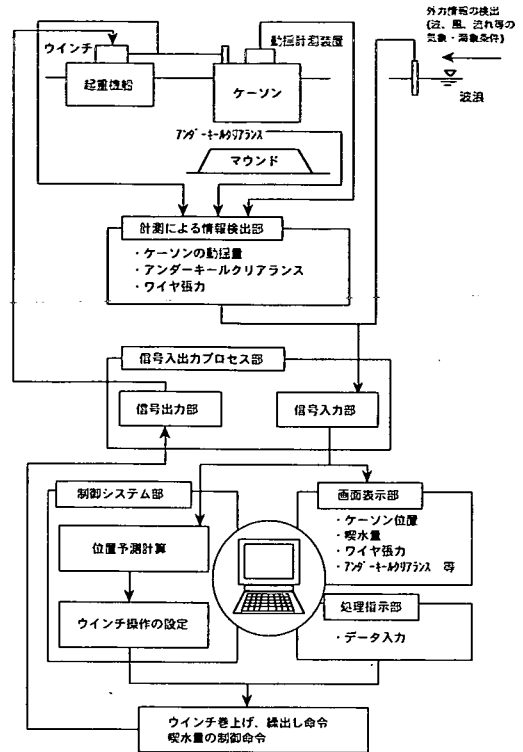


図-1 自動設置システムのブロック図

これら 5 つの機能は、①計測による情報検出部が観測データ計測機器に関連し、②信号入出力プロセス部が A/D・D/A 変換装置に、そして③制御システム部、④画面表示部および⑤処理指示部はコンピュータに組み込まれている。

(2) ケーソン据付方式

防波堤ケーソンの自動設置システムでは、引船方式およびアンカーワイヤ方式の 2 方式でケーソンの自動据付作業を行うことができる。本システムでは、据付工事の状況に応じて、両方式のいずれかを選択することが可能である。ケーソン据付方式の設定にあたっては、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 16 事例についての実態調査の結果を参考にした。このとき、ケーソンの据付方式を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分類、整理して、本システムに採用するケーソン据付方式を選定した。

図-2 および図-3 は、それぞれ引船方式およびアンカーワイヤ方式による据付作業を示す。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

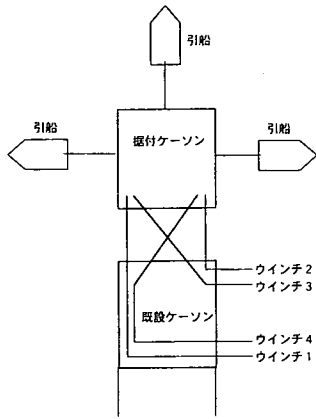


図-2 引船方式による据付作業

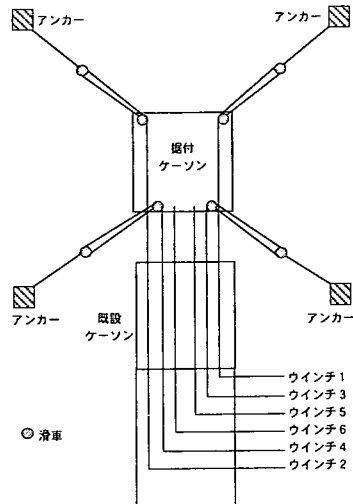


図-3 アンカーワイヤ方式による据付作業

ソーンである場合に比較よく用いられる方法である。引船方式では、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るが、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。一方、アンカーワイヤ方式では、引船の代わりに海底に沈設された4個のアンカーを用いてケーソンの位置保持をするため、ケーソンの位置制御が完全に自動化されている。なお、アンカーワイヤ方式については、図-3で示したアンカーおよびワイヤの配置形式の他に2種類の配置形式を選択できる。

(3) ケーソンの位置制御アルゴリズム

自動設置システムの実態調査の結果および八戸港におけるケーソン据付作業の現地観測の結果を基にして構築した。八戸港におけるケーソン据付作業は引船方式で行われ、現地観測では実際のウインチ操作の状況を把握することを主目的とした。この現地観測結果によると、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。従って、引船方式によるシステムについては、ケーソン据付作業を引寄せ作業、接近作業、設置作業の3段階の制御フェイズに分けて位置制御アルゴリズムを構築した。一方、アンカーワイヤ方式によるシステムについては、ケーソン据付工事の実態調査を参考にし、アンカーおよびワイヤの配置の関係から、制御フェイズを引寄

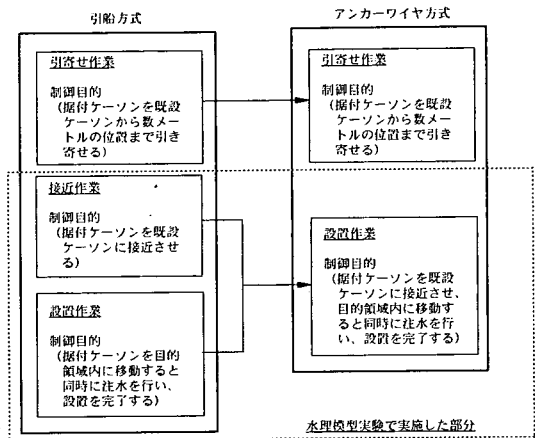
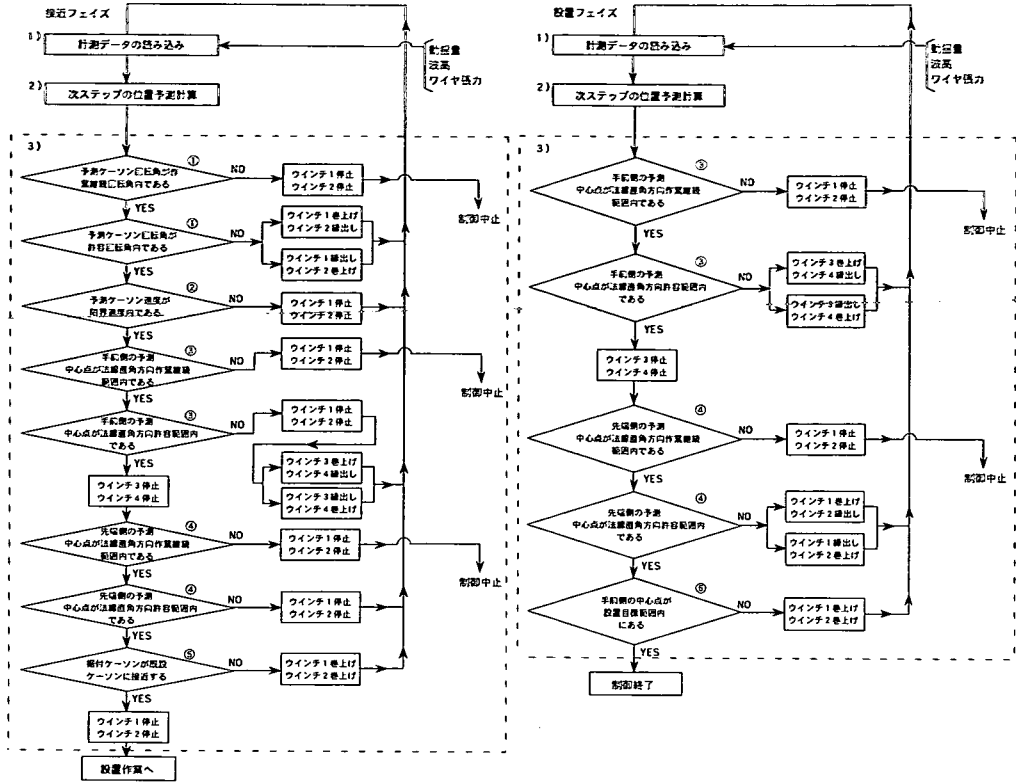


図-4 引船方式とアンカーワイヤ方式の据付作業の関係

せ作業、設置作業の2段階として位置制御アルゴリズムを構築した。図-4は、両方式の制御フェイズの対応関係を示したものである。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。

引船方式によるシステムについて、図-5(1)、(2)は接近作業および設置作業の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-6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。また、アンカーワイヤ方式によるシステムについて、図-7は設置作業の制御フェイズの位置制御アルゴリズムのフローチャートを示し、図-8はこの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-5(1)、



(1) 接近フェイズ

(2) 設置フェイズ

図-5 位置制御アルゴリズムのフローチャート (引船方式)

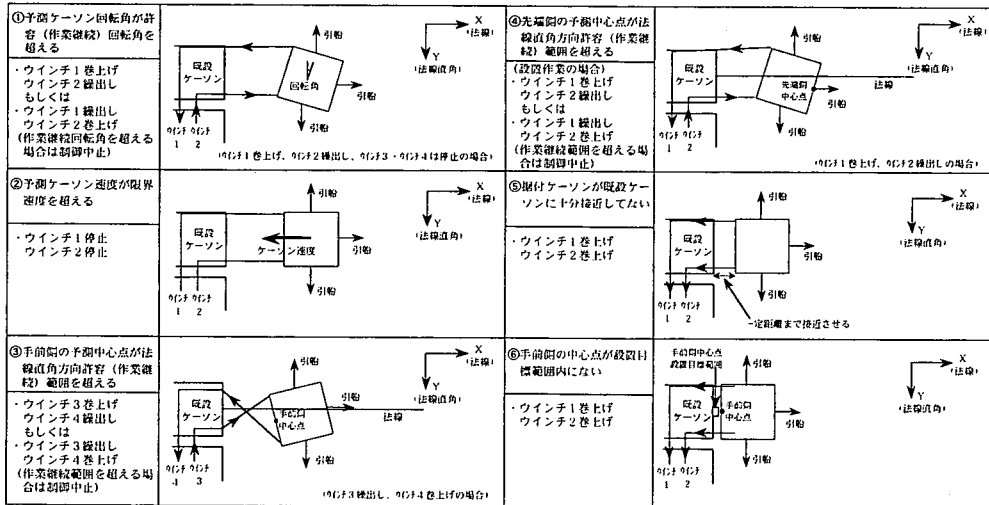


図-6 主要な制御モードと制御動作 (引船方式)

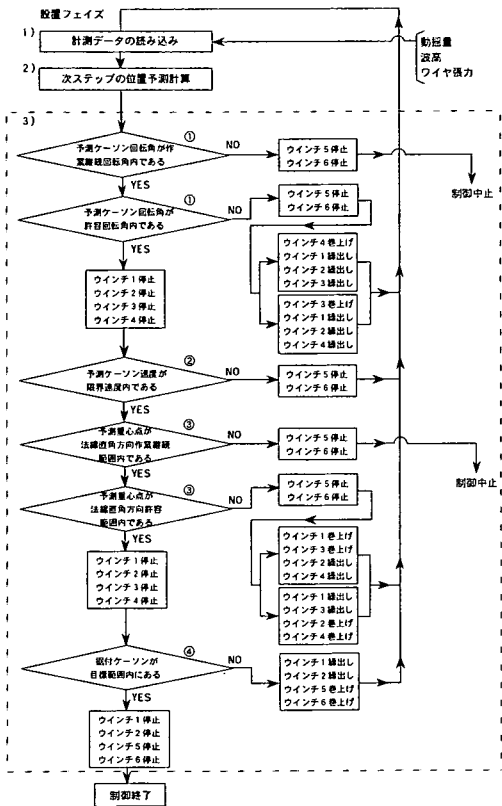


図-7 位置制御アルゴリズムのフローチャート
(アンカーワイヤ方式)

(2)のフローチャート中の①~⑥の番号は、図-6の各制御モードの番号に対応しており、図-7のフローチャート中の①~④の番号は、図-8の各制御モードの番号に対応している。また、フローチャート中の1)~3)の番号は、計測、予測、制御の一連の手順1)~3)に対応する。ここで、引船方式の場合は、ケーソンの据付作業が進行し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ェイズが移行する。

各制御フェイズにおいては、各タイムステップごとに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の状況に応じ、位置制御アルゴリズムに基づいて異なった制御動作がケーソンに対して実行される。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(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)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。

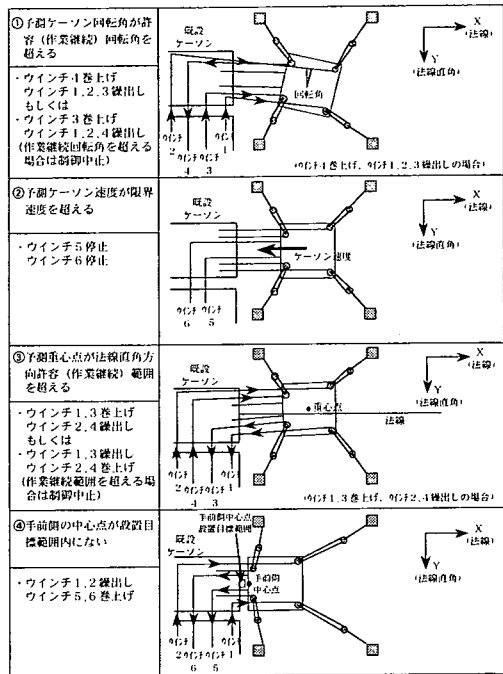


図-8 主要な制御モードと制御動作
(アンカーワイヤ方式)

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、コンピュータへのキーボード入力によ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行われる。すなわち、自動設置システムでは、後の図-11に示すケーソンの動揺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行われる。現行のケーソン据付作業におけるウインチやワイヤの配置状況では、スウェイおよびヨウ以外の動揺4成分に対する制御が行えないことから、本システムでは、このようなスウェイおよびヨウの制御を基本とするケーソンの位置制御アルゴリズムとした。

(4) 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

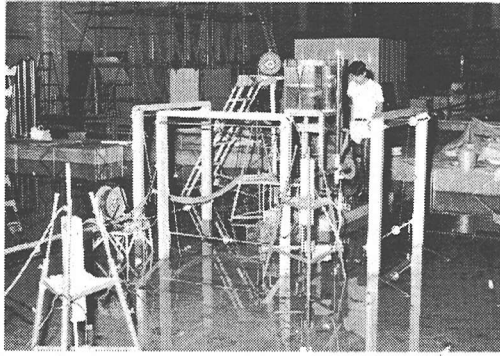


写真-1 実験模型の設置状況 (引船方式)

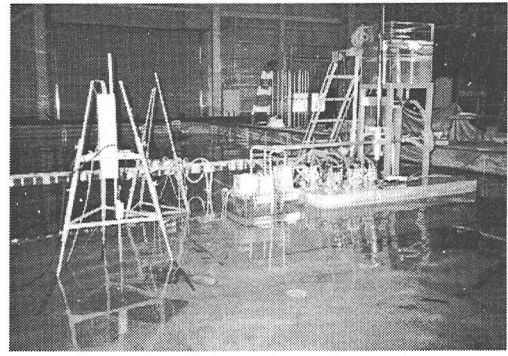


写真-2 実験模型の設置状況 (アンカーワイヤ方式)

を Runge-Kutta 法を用いて時間領域で解いている。ケーソンの運動方程式は、一般に、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 =ヒーブ、 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た上でケーソンの位置および動揺の予測を行い、ウイ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、ウイ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。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、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ことに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^{24)~26)}により計算した。三次元特異点分布法とは、三次元流体中において流体のわき出しを表現する特異点を用い、ポテンシャル理論に基づいて計算される浮体周りの速度ポテンシャルから、波力、流体力を求める方法である。速度ポテンシャルは、特異点を浮体の表面上に分布させ、未知数である特異点の強さとグリーン関数の積を浮体表面上で積分した積分方程式を解いて計算される。また、波力、流体力は、得られた速度ポテンシャルから浮体表面の圧力を計算することで求められる。

3. 水理模型実験

(1) 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、ウインチ模型およびウインチ制御装置に加え、引船方式の場合は引船を模擬した架台、また、アンカーワイヤ方式の場合はアンカーおよび滑車から構成される。据付ケーソン模型は、長さ 25.0m、幅 20.0m、型深さ 19.0m、重量 735×10³kN の実機ケーソンの 1/40 スケールのもので、水理模型実験はフルード相似則に従って実施した。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。

写真-1 および写真-2 は、それぞれ引船方式およびアンカーワイヤ方式による自動設置システムの実験模型の配置状況を示す。引船方式の場合は、3 隻の引船を実物の縮小模型として再現することが困難なため、3 台の架台によって模擬し、重錘を用いることで引船による引張力を一定としてモデル化した。実際の据付作業では、引船からの引張力は一定ではなく、ケーソンの位置および動揺に対して適切に増減されるため、模型実験と比較してケーソンの位置制御はより効果的に行われると考え

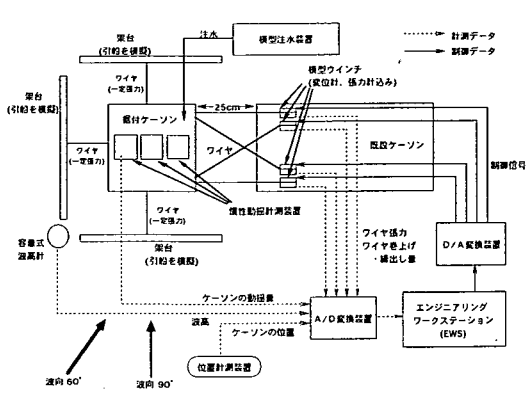


図-9 データ計測およびウィンチ制御の概略図 (引船方式)

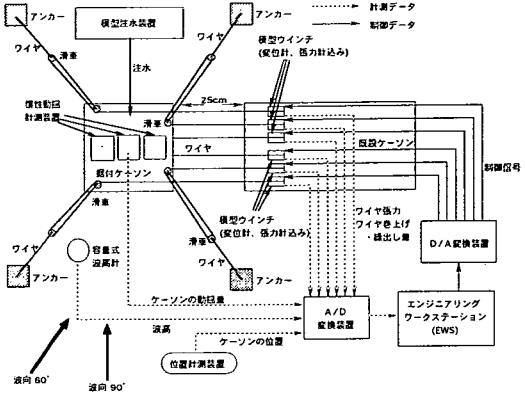


図-10 データ計測およびウィンチ制御の概略図 (アンカーワイヤ方式)

られる。一方、アンカーワイヤ方式の場合に用いる4個のアンカーは、スチール製の長方形底板の上にウェイトを置いた重力式のものとした。また、両方式の場合ともに、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。水理模型実験では作業船の模型を製作せず、ウィンチ模型は既設ケーソン上に設置した。

(2) データ計測およびウィンチ制御

図-9 および図-10 は、引船方式および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におけるデータ計測およびウィンチ制御のフローと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。また、コンピュータからの出力データは、ウィンチの制御信号である。据付ケーソン上には慣性動揺計測装置²⁾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。また、位置計測装置であるX-Yトラッカーによって、2台のCCDカメラで鉛直および水平方向から据付ケーソン上の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、ヒーブ)が計測される。既設ケーソン上のウィ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、模型実験では、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を使用した。

図-11 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

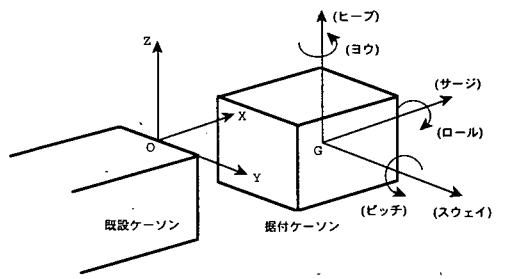


図-11 ケーソンの動揺6成分および座標系

心点に関して計測され、動揺の並進運動成分(サージ、スウェイ、ヒーブ)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される。

(3) 検証条件

自動設置システムの水理模型実験上の検証条件とするために、現行のケーソン据付作業時における波浪状況を調べておく必要がある。そこで、先に示したケーソン据付工事16事例の実態調査において工事日における波浪状態を取りまとめた²⁾。図-12 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・海象予報や作業日の朝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

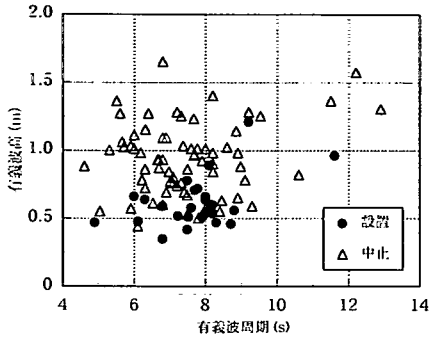


図-12 ケーソン据付作業時の有義波高・有義波周期

浪条件で実施されていることがわかる。従って、本研究では、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。

(4) 実験条件

水理模型実験は不規則波中で実施した。実験条件のうち有義波高および有義波周期については、図-12 を参考にして、上述した検証条件を考慮できるような範囲として設定した。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、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。マウンド模型は高さ 12.5cm (5.0m) の台形状であるため、ケーソン設置水深は 37.5cm (15.0m) となる。ここで、波浪の浅水係数を算定すると 0.93~0.95 程度²⁸⁾となり、マウンド上で多少波高が減少する。しかしながら、砕波による波浪変形は発生しないため、マウンド模型の波浪変形への影響は小さいと考えられる。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。また、据付ケーソンの初期位置は既設ケーソンから 25.0cm (10.0m) の距離とし、引船方式の場合の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) の位置とした。ケーソンの許容動揺範囲および許容回転角は実験開始前に事前に設定する必要があるが、許容動揺範囲は後に示すような既設ケーソンの中心法線を含む平均幅 1.0cm (0.4m) の細長い区間とし、許容回転角は 20° とした。ここで、許容動揺範囲は、実機ケーソンにおけるスウェイの限界動揺量の有義両振幅 0.75m の 1/2 程度として設定した。また、許容回転角は、実機ケーソン端部の左右

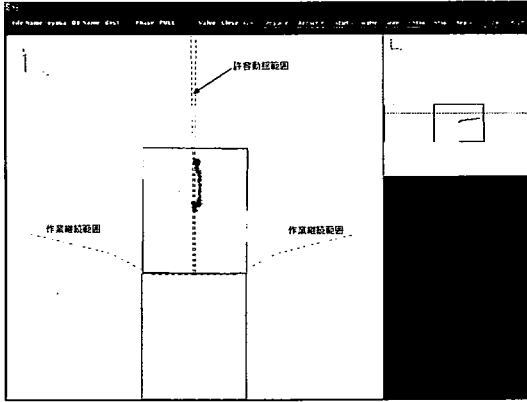
変位を 0.75m としてヨウの限界動揺量の有義両振幅を求め、その片振幅の値を基に設定した。ここで、限界動揺量とは、現行の防波堤ケーソンの据付作業において、ケーソンの据付が可能な動揺量の限界値を意味している²⁾。

4. 実験結果および考察

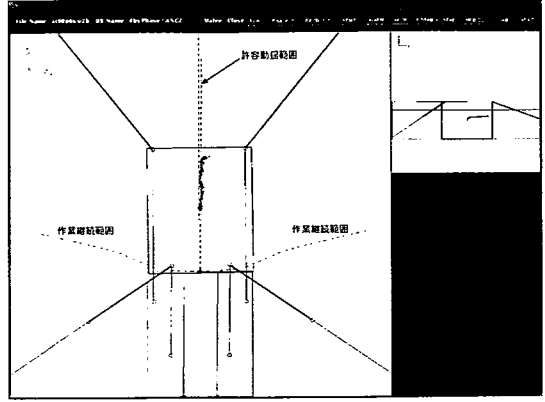
(1) ケーソンの重心点の軌跡

図-13 (1), (2)および図-14 (1), (2)は、それぞれ引船方式およびアンカーワイヤ方式による自動設置システムを用いた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。これらの図はコンピュータのモニター上に表示されている画面のケーソン据付作業後の状況を示すが、この画面を見ることで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) を表し、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) を表している。X-Y 平面図中にはケーソンの法線直角方向の許容動揺範囲が 2 本の点線で表示されている。先に示したように、ケーソンのスウェイがこの許容動揺範囲を越えた場合にスウェイ方向の位置制御が実行される。ここでは、ケーソンの重心点の軌跡と許容動揺範囲とを比較することで、自動設置システムを用いたケーソン据付作業の安定性を評価する。なお、以下の論文中では、有義波周期 0.95s (6.0s), 1.27s (8.0s) の波浪を短周期波、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表記するものとする。

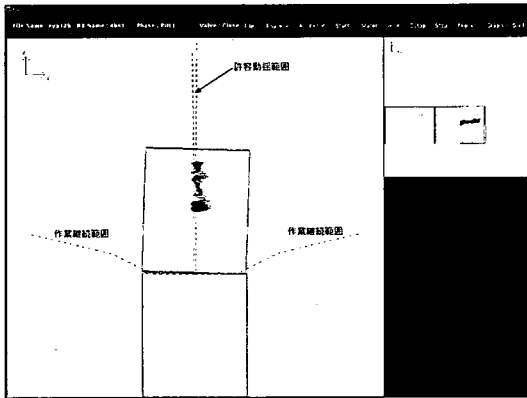
図-13 の引船方式の場合は、短周期波中では波漂流力の影響によりケーソンが少し波下側に漂流するが、ケーソンの動揺は小さく許容動揺範囲から大きく離れることもないため、据付作業を安定して行うことができ、目標とするケーソン設置位置にケーソンを据付けることができていた。また、据付ケーソンが既設ケーソンに 5.0cm (2.0m) まで接近したとき法線直角方向の位置制御が行われて法線上にケーソン重心点が移動しており、位置制御アルゴリズムが効果的に機能していることがわかる。一方、長周期波中では、ケーソンの動揺、特にスウェイとヒープが大きくなるが、注水を進めて行くにつれてヒープは減少し、最終的にはケーソンは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許容動揺範囲から大きく外れることが多いために、ケーソンの据付作業の安定性は低下している。図-12 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を考慮すると、長周期波中でケーソンの動揺を許容動揺範囲内に維持す



(1) 有義波周期: 0.95s (6.0s)

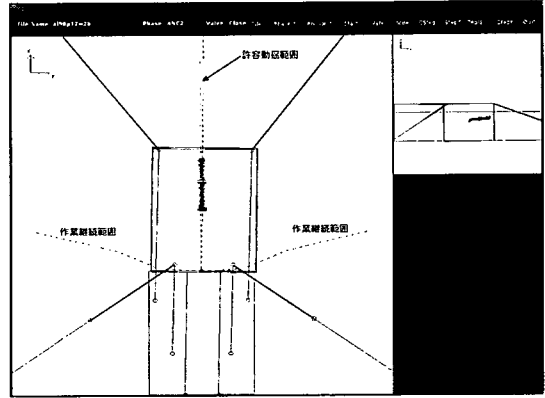


(1) 有義波周期: 0.95s (6.0s)



(2) 有義波周期: 1.90s (12.0s)

図-13 ケーソンの重心点の軌跡 (引船方式)



(2) 有義波周期: 1.90s (12.0s)

図-14 ケーソンの重心点の軌跡 (アンカーワイヤ方式)

るようにケーソンの据付を安定的に行うことは困難であると理解できる。このような波浪条件下では、実際の据付作業において、無線による指示に従って、3台の引船の中でも特に港外側およびケーソン先端側の引船による引張力を適切に調整することにより、ケーソンのスウェイの動揺制御を強化する必要がある。

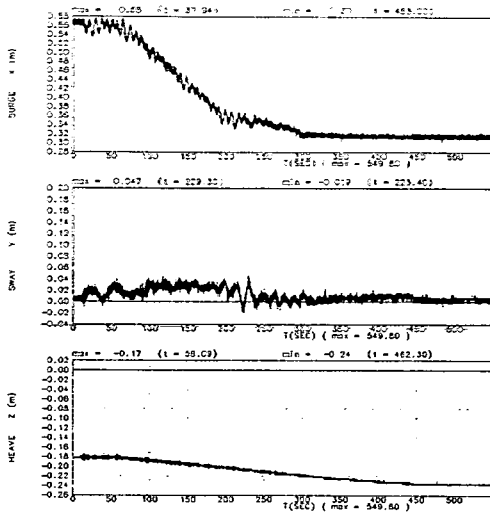
これに対し、図-14のアンカーワイヤ方式の場合は、短周期波中ではケーソンの動揺は小さく、波漂流力によるケーソンの漂流もほとんど発生していない。一方、長周期波中ではケーソンの動揺の中でスウェイとヒープが大きくなるが、スウェイについては短周期波中と長周期波中における動揺量の差異はそれほど大きくなく、ヒープも注水を進めて行くにつれて減少していく。従って、短周期波中、長周期波中ともに、ケーソンの重心点は許容動揺範囲内の既設ケーソンのほぼ中心法線上を推移し、引船方式の場合よりも安定して据付作業を行うことができ、最終的にケーソンは設置目標内に据付けられ

ている。これは、アンカーワイヤ方式の場合は、アンカーに向かって4方向に展張されたワイヤによる拘束力によりケーソンの大きな動揺が抑制されるとともに、据付作業開始後すぐにケーソンの重心点を許容範囲内に保持するようにウインチによる位置制御が行われることが理由と考えられる。

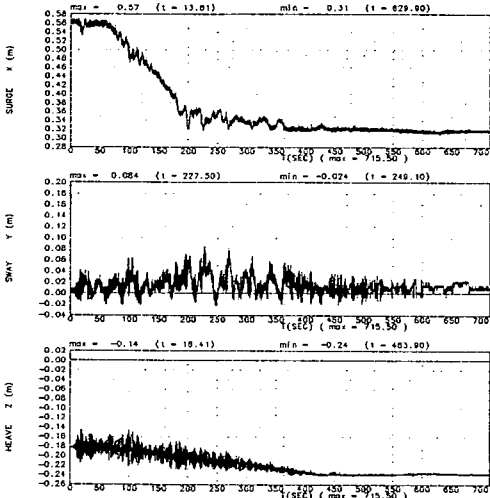
(2) ケーソンの動揺の時系列

図-15(1)、(2)および図-16(1)、(2)は、それぞれ引船方式およびアンカーワイヤ方式による自動設置システムを用いた据付作業におけるケーソンの動揺量の時系列のうち、サージ、スウェイ、ヒープを示す。波浪条件は図-13、図-14の場合と同様である。

図-15の引船方式の場合は、サージは既設ケーソンに据付ケーソンが徐々に接近していることを表しており、最終的にサージが一定値になったときに据付ケーソンは既設ケーソンに接触している。長周期波中では、短周期



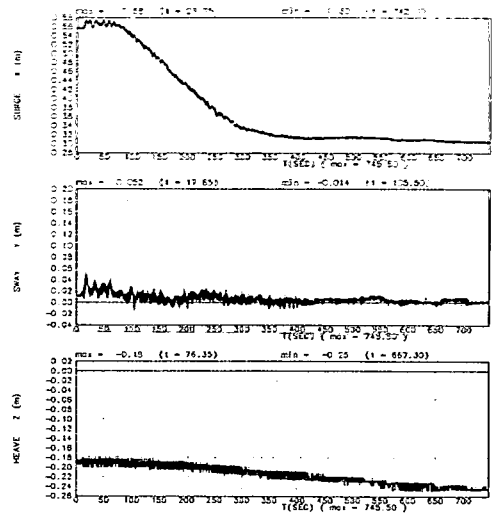
(1) 有義波周期：0.95s (6.0s)



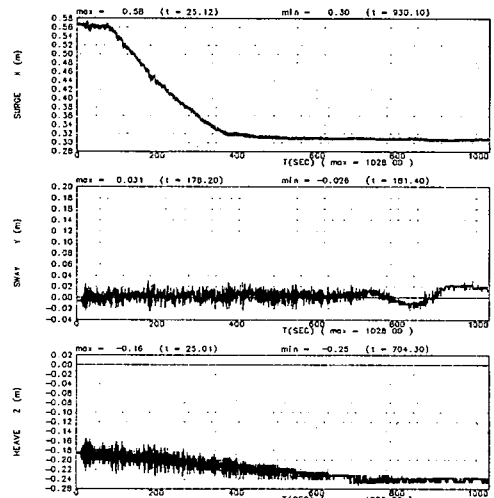
(2) 有義波周期：1.90s (12.0s)

図-15 ケーソンの動揺の時系列 (引船方式)

波中と比較してスウェイとヒープが大きくなるが、ヒープは注水が進むにつれ徐々に減少して最後には一定値に落ち着く。このとき、掘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、ケーソンの噴水量が増加して、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する。一方、ヒープが一定値になったときにスウェイが完全に一定値にならないのは、ある程度注水が進みケーソンが十分な重量を持ってマウンド上に着底するまでは、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、実際の掘付工事においてはケーソンの着



(1) 有義波周期：0.95s (6.0s)

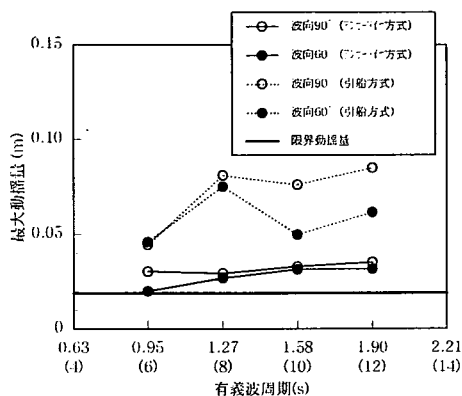


(2) 有義波周期：1.90s (12.0s)

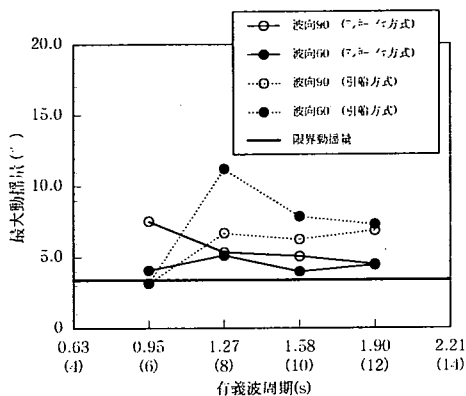
図-16 ケーソンの動揺の時系列 (アンカーワイヤ方式)

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滑動現象を抑制することは可能であると考えられる。

図-16 のアンカーワイヤ方式の場合は、サージは引船方式の場合と同様に既設ケーソンへの掘付ケーソンの接近を表している。また、短周期波中と比較して長周期波中ではスウェイとヒープが大きくなるが、スウェイについては引船方式の場合ほどその増加量が大きくない。一方、ヒープは、引船方式の場合と同様に、注水が進むに従って減少し最後にはおおむね一定値になる。このときスウェイが一定値にならないのは、滑動に抵抗できる



(1) スウェイ



(2) ヨウ

図-17 ケーソンの最大動揺量

ほど十分な重量がケーソンにないために、波浪によりケーソンが滑動するからである。ただし、アンカーワイヤ方式の場合は、据付ケーソンがワイヤによって十分に拘束されているため、この滑動量自体は引船方式の場合と比較して小さくなる。引船方式の場合と同様に、実際の据付工事のようにケーソン着底前の急速注水を実行すれば、滑動量をさらに低減できるものと考えられる。

(3) ケーソンの最大動揺量

図-17 (1), (2)は、それぞれ有義波高 2.5cm (1.0m) の場合のスウェイおよびヨウの最大動揺量と有義波周期との関係を示す。パラメータは、据付方式および波向であり、ここで示す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意味する。不規則波中実験では全てのケースについて 2 回実施しているため、図にはそれらの平均値を載せている。また、最大動揺量との比較のために、スウェイおよびヨウの限界動揺量の最大片振幅を図中に示す。ここでは、限界動揺量の最大片振幅を算定するために、限界動揺量の最大両振幅を有義両振幅の 2 倍²⁸⁾と仮定して計算した。スウェイについては、実機ケーソンにおけるスウェイの限界動揺量の有義両振幅 0.75m から限界動揺量の最大片振幅を求めた。また、ヨウについては、実機ケーソン端部の左右変位を 0.75m としてヨウの限界動揺量の有義両振幅を求め、その値から限界動揺量の最大片振幅を計算した。スウェイおよびヨウの限界動揺量の最大片振幅は、それぞれ 1.88cm (0.75m) および 3.4° であり、図中に実線で示している。

図-17 (1) において、引船方式の場合は、波浪がケーソンの真横から作用する波向 90° の場合にスウェイの最大動揺量が大きくなり、特に有義波周期 1.58s (100s) 以上のときにその傾向が顕著である。一方、アンカーワイヤ方式の場合は、波向 90°、波向 60° の場合ともに、

スウェイの最大動揺量は波周期によらずおおむね一定であり、波向に対する動揺量の差異がほとんどない。従って、アンカーワイヤ方式による自動設置システムは、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言える。また、波向にかかわらず、全ての波周期に対して、アンカーワイヤ方式の場合のスウェイの最大動揺量が引船方式の場合に比べて非常に小さい。これは、アンカーワイヤ方式では、4 方向に展張されたワイヤの張力によってケーソンの動揺が拘束されるため、スウェイの動揺量がより低減されるからである。また、スウェイの限界動揺量と比較すると、引船方式の場合のスウェイの最大動揺量は最大で限界動揺量の約 4 倍、アンカーワイヤ方式の場合は約 2 倍となっている。先に示したように、アンカーワイヤ方式の場合は引船方式の場合よりもケーソン据付作業の安定性が高いことから、アンカーワイヤ方式による自動設置システムを用いた場合は、スウェイの最大動揺量が限界動揺量より大きくても、ケーソン据付作業を行うことができると考えられる。これは、現在のケーソン据付作業の実態調査結果に基づいて設定した限界動揺量と比べて、アンカーワイヤ方式による自動設置システムを用いたケーソン据付作業では、スウェイの限界動揺量が向上することを示していると考えられる。

図-17 (2) において、引船方式の場合は、波向 60° で有義波周期 1.27s (80s) のときにヨウの最大動揺量がピークを示し、波向 90° の場合と比べて波向 60° の場合に動揺量が大きくなる傾向にある。一方、アンカーワイヤ方式の場合は、波向 90°、波向 60° の場合ともに、ヨウの最大動揺量はおおむね一定値を示しており、有義波周期 0.95s (60s) の場合を除いて波向の影響が比較的小さいことがわかる。また、いずれの波向の場合にも、有義波周期 0.95s (60s) ではアンカーワイヤ方式の場合のヨウの最大動揺量が引船方式の場合よりも大きい、

表-1 ケーソンの設置誤差 (引船方式)

波向(°)	90						60					
	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)	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY
有義波高 (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 0.6 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) は欠値を示す。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、実験値を示す。

表-2 ケーソンの設置誤差 (アンカーワイヤ方式)

波向(°)	90						60					
	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)	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY
有義波高 (s)	0.95 (6.0)	0.0 -0.2 0.0 -0.3	0.0 -0.8 0.0 -1.0	0.0 +0.1 0.0 -0.8	0.0 0.0 0.0 +0.4	0.0 -0.7 0.0 -0.7	0.0 -0.5 0.0 -0.2					
	1.27 (8.0)	0.0 -0.5 0.0 -0.9	0.0 -0.8 0.0 -0.4	0.0 -0.5 0.0 -0.2	0.0 0.0 0.0 +0.5	0.0 -0.9 0.0 +0.1	-0.3 -1.0 0.0 -0.1					
	1.58 (10.0)	0.0 -0.9 0.0 -1.0	0.0 -0.7 0.0 -0.6		0.0 -0.1 0.0 +0.5	0.0 -0.3 0.0 0.0						
	1.90 (12.0)	0.0 -0.6 0.0 -0.8	0.0 -1.0 0.0 -0.8		0.0 -0.6 0.0 +0.4	0.0 -0.8 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、実験値を示す。

有義波周期 1.27s (8.0s) 以上の長周期波側ではアンカーワイヤ方式の場合の動揺量が小さい。以上のことから、アンカーワイヤ方式では、引船方式の場合と比べて長周期側においてヨウの動揺が抑制されている。また、ヨウの限界動揺量と比較すると、引船方式の場合のヨウの最大動揺量は最大で限界動揺量の約3倍、アンカーワイヤ方式の場合は約2倍である。従って、ヨウの場合もスウェイの場合と同様に、アンカーワイヤ方式による自動設置システムを用いたケーソン据付作業では、限界動揺量が向上するものと考えられる。

(4) 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-1 および表-2 は、それぞれ引船方式およびアンカーワイヤ方式による自動設置システムにおける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、それぞれ X 方向の設置誤差 ΔX および Y 方向の設置誤差 ΔY と表記する。

表-1 によると、引船方式の場合は、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も大きい。一方、表-2 によると、アンカーワイヤ方式の場合は、有義波高、有義波周期とケーソンの設置誤差との間に明確な関係が見られず、ケーソンの設置誤差に対する波向の影響もほとんどない。すなわち、有義波高が大きい場合や有義波周期が長周期の場合には一般的にケーソンの動揺は大きくなるが、このような場合でも設置誤差が小さいことがある。また、両方式における設置誤差を比較すると、アンカーワイヤ方式の場合の設置誤差の方がはるかに小さいことがわかる。

外洋性港湾等の波浪環境の厳しい海域におけるケーソ

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、引船方式においては、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。一方、アンカーワイヤ方式においては、実験した範囲の全ての波浪条件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。従って、アンカーワイヤ方式による自動設置システムは、引船方式による自動設置システムと比較して、より高精度にケーソンを据付できることが可能であると言える。

ここで、水理模型実験の状況を観察した結果から推測すると、引船方式の場合に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考えられる。すなわち、注水速度が一定の場合は、ケーソンが設置目標範囲に入っているにもかかわらず十分な注水が行なわれて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てしまうため、許容設置誤差を越えた位置で着底することになる。このことから、実際の施工と同じように据付作業の最終段階において注水速度を増加させれば、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、引船方式の場合においても、図-12 で示した現行の防波堤ケーソンの据付限界波浪条件内では、ケーソンの設置誤差が許容範囲内に収まることから、引船方式による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。また、アンカーワイヤ方式による自動設置システムにおいても、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、ケーソンの設置誤差もさらに一層小さくなるものと考えられる。

5. 結論

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、引船方式およびアンカーワイヤ方式の2方式による防波堤ケーソンの自動設置システムを開発した。また、開発した自動設置システムの有効性については、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着目した水理模型実験により検証を行った。

本研究で得られた成果は以下の通りである。

- 1) 自動設置システムを用いたケーソン据付作業の安定性について、ケーソンの重心点の軌跡とスウェイの許容動揺範囲とを比較して検討した。その結果、引船方式の場合よりもアンカーワイヤ方式の場合の方が、ケーソンの据付作業を安定して実行できることがわかった。引船方式の場合にケーソン据付作業の安定性を向上させるためには、引船からの引張力によるケーソンの位置保持を強化して、スウェイの動揺低減を図る必要がある。
- 2) ケーソンのスウェイおよびヒープの時系列に関する検討から、ケーソンがマウンド上に着底する直前に、波浪によるスウェイ方向の滑動現象が発生することがわかった。ただし、その滑動量は、アンカーワイヤ方式の場合が引船方式の場合と比較して小さい。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、この滑動現象を抑制することは可能であると考えられる。
- 3) ケーソンのスウェイおよびヨウの最大動揺量の検討結果により、アンカーワイヤ方式の場合は、最大動揺量に対する波向の影響が比較的小さく、引船方式の場合に比べて最大動揺量が小さくなることがわかった。また、スウェイおよびヨウの最大動揺量は、現在のケーソン据付作業における限界動揺量よりも大きいことから、ケーソン据付作業の安定性が高いアンカーワイヤ方式の場合については、限界動揺量が向上するものと考えられる。
- 4) 最終的なケーソンの設置精度について検討するために、据付作業終了後のケーソンの設置誤差を調べた。引船方式の場合、限界波浪条件内（有義波高 0.8m 以下、有義波周期 9.0s 以下）ではケーソン設置目標位置に十分な精度で設置できるが、高波高あるいは長周期波の条件下ではケーソンが許容設置誤差を越えて設置される場合がある。一方、アンカーワイヤ方式の場合は、実験した範囲の全ての波浪条件に対して、許容設置誤差以内でケーソンを目標位置に設置できることがわかった。
- 5) 以上のことから、引船によるケーソンの位置保持や最終着底段階におけるケーソンへの急速注水の効果について検証する必要性はあるものの、防波堤ケーソンの据付作業における引船方式およびアンカーワイヤ方式による自動設置システムの有効性について実験的に確認することができた。

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、据付用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、据付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。本研究では、最も重要な基幹部分である自動設置システムについてのみ開発を行い、水理模型実験による検証を実施している。一方、自動ワイヤリング装置および自動注排水装置については、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、実際の現場に適用する場合の基本仕様に関して検討を行っている²¹⁾²²⁾。

謝辞：防波堤ケーソンの自動設置システムの開発に関する検討は、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で実施した。また、現場におけるケーソンの据付工事の現状を把握し、より現実的なシステムを構築するために社団法人日本埋立浚渫協会に委員会を設置し、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、関係者の方々に深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 上田茂，白石悟，板生考司，内藤周二：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.754，46p.，1993。
- 2) 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。
- 3) 野崎兼肇：本州四国連絡橋海上工事の現況，作業船，No.127，pp.53-60，1980。
- 4) 杉田秀夫：橋梁基礎の海中工事（南北備讃瀬戸大橋の海中基礎），土木学会論文集，No.361/VI-3，pp.11-20，1985。
- 5) 杉田秀夫：長大橋を支える海中土木技術，山海堂，251p.，1994。
- 6) 高塚正修，佐々木雅敏，北口雅章：明石海峡大橋 2P・3P 鋼ケーソン設置，本四技報，Vol.14，No.53，pp.19-32，1990。
- 7) 若竹隆，岸野勝，安藤護，小川清，植田英夫：明石海峡大橋 3P 鋼ケーソン（第1報）—構造設計，艤装品及び現場施工の基本計画—，三井造船技報，第139号，pp.25-37，1990。
- 8) 若竹隆，岸野勝，安藤護，小川清，植田英夫：明石海峡大橋 3P 鋼ケーソン（第2報）—製作，施工—，三井造船技報，第140号，pp.1-11，1990。
- 9) 吉田巖：明石海峡大橋の基礎—調査と計画—，土木学会論文集，No.418/III-13，pp.1-15，1990。
- 10) 加島聰，坂本光重，鈴木幹啓，樋口康三：明石海峡大橋海中基礎工事における超大型ケーソンの設置，土木学会論文集，No.581/VI-37，pp.27-37，1997。
- 11) 情報化施工技術総覧編集委員会：情報化施工技術総覧，pp.725-945，1998。
- 12) 久保田信雄，柄川伸一，松岡彰，清水徹：高速湾岸

- 線多摩川・川崎航路沈埋トンネルの設計・施工，コンクリート工学，Vol.30，No.5，pp.25-37，1992.
- 13) 出淵諒，米谷彰，成瀬圭弘，山口和久：ブレーシングバージ用ウインチの制御システム，石川島播磨技報，第30巻第5号，pp.372-377，1990.
- 14) 運輸省第一港湾建設局新潟港工事事務所：新潟みなとトンネルパンフレット.
- 15) 運輸省第一港湾建設局新潟機械整備事務所：平成3年度大型構造物施工技術調査研究報告書，241p.，1992.
- 16) 三上武彦：大型構造物施工技術－大型異形ケーソンの曳航及び掘付工法の開発－，作業船，No.187，pp.36-44，1990.
- 17) 柿崎秀作：釜石港湾口防波堤築造工事，作業船，No.187，pp.65-72，1990.
- 18) 志村守一：大型ケーソン掘付用ウインチ台船「マリン2」，作業船，No.195，pp.18-20，1991.
- 19) 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，pp.459-466，1995.
- 20) 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，pp.287-292，1996.
- 21) 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，83p.，1996.
- 22) 米山治男，白石悟，名里健吾：防波堤ケーソンの掘付作業の自動化に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.47A，pp.939-950，2001.
- 23) Yoneyama, H. : Development of an Automatic Installation System of Breakwater Caissons, *PIANC Bulletin*, Vol.109, pp.23-40, 2002.
- 24) Falinsen, O.M. and Michelsen, F.C. : Motions of Large Structures in Waves at Zero Froude Number, *Proc. of International Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves*, pp.91-106, 1974.
- 25) Garrison, C.J. : Hydrodynamic Loading of Large Offshore Structures: Three Dimensional Source Distribution Method, *Numerical Method in Offshore Engineering*, John Wiley & Sons, 1978.
- 26) 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会：海岸波動【波・構造物・地盤の相互作用の解析法】，土木学会，pp.313-330，1994.
- 27) 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.799，38p.，1995.
- 28) 合田良實：港湾構造物の耐波設計（波浪工学への序説），鹿島出版会，333p.，1990.

(2002.2.4受付)

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC INSTALLATION SYSTEM OF BREAKWATER CAISSONS AND ITS EXPERIMENTAL VERIFICATION

Haruo YONEYAMA and Satoru SHIRAIISHI

The authors have developed an automatic installation system of breakwater caissons with the aim of saving labor and improving worker safety during caisson installation work. This system enables automatic construction of offshore breakwaters by automatizing the present hand-powered winch operation on a floating craft using a personal computer. In addition, this automatic system includes programs that manage caisson installation work using two associated units: a tugboat support method and an anchor wire method. In this study, focusing on the stability of the caisson installation work and the accuracy of the final caisson installation, the authors confirmed the validity and effectivity of the control algorithm of the automatic installation system by the hydraulic model experiments.