

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

加島 聡¹・坂本光重²・鈴木幹啓³・樋口康三⁴

¹正会員 工博 本州四国連絡橋公団 第一建設局長 (〒651 神戸市中央区浜辺通り 5-1-14)

²正会員 工博 本州四国連絡橋公団 第一建設局 機械課長 (〒651 神戸市中央区浜辺通り 5-1-14)

³正会員 本州四国連絡橋公団 第一建設局 洲本工事事務所長 (〒656 洲本市桑間 312-1)

⁴正会員 本州四国連絡橋公団 第二管理局 坂出管理事務所長 (〒762 坂出市川津町 4388-1)

明石海峡大橋主塔基礎は海面下 60m を支持面とする、直径 80m 高さ 70m 体積 35 万 m³ の直接基礎であり、施工上の最大の難関は水中コンクリートの全形型枠となる総重量 1 万 9 千 tf (18 万 6 千 kN) のケーソンの設置であった。明石海峡は最大潮流速が 8kn を超え、しかも 1 日あたり 1400 隻の船舶が航行する海上交通の要衝の地であり、ケーソンの設置にあたっては、強大な外力に対抗するための設備の大型化とともに正確さと迅速性の確保が課題であったが、設置誤差 10cm 以下で設置することができた。本文では、ケーソンの設置にあたって、何が問題であり、それをどのように解決したかについて述べる。

Key Words : caisson, tide, quick joint, linear winch, information control

1. はじめに

明石海峡大橋は中央支間 1990m 全長 3910m の吊橋であり、これを支える 2 基の主塔基礎は海面下 60m を支持面とする、直径 80m 高さ 70m 体積 35 万 m³ の直接基礎である。この主塔基礎は、海底地盤を支持面まで掘削した後、この掘削作業と並行して造船所で建造したケーソンを掘削面に設置し、ケーソン内部に水中コンクリートを打設する設置ケーソン工法で施工した。

海中基礎の全形を一体化したケーソンは、外径 80m 内径 56m 高さ 65m の二重円筒形で、外側の二重壁部の底面を密閉した鋼製の浮体構造物である。曳航や設置に使用する艀装品を含む総重量は 1 万 9 千 tf (18 万 6 千 kN) であり、曳航時の吃水は 8m になる。

ケーソンの曳航には位置の制御のしやすさ (操縦性) より複数の曳船を使用するが、3000PS 級の曳船を 12 隻使用しても曳航速度は 4kn に過ぎない。したがって、係留や設置作業は強潮流を避けた小潮期の潮止まり前後の憩流時に行うことになる。

ケーソンは憩流時に現場海域に進入し、曳船で位置を保ちながら、海底に設置した 8 基のシンカー側

の係留索とケーソン上のウインチに巻き込まれている 8 本の係留索を継続するが、係留索は直径 120mm のワイヤロープであり接続は容易でない。小潮期といえども最大潮流速は 4kn を超えるため、係留索の接続に失敗するとケーソンは漂流することになる。

係留後、ウインチを操作して所定の位置に導きながら二重壁内に注水してケーソンを海底面まで降下させるが、吃水の増加にともない潮流が増加する。ウインチの係留力は降下途上で決まる 400tf (3920kN) であり、仮に降下作業が遅れて、着底直前に 4kn の潮流を受けると潮流力は 400tf (3920kN) を超えて位置決め操作が不可能になる。

いずれの作業も潮流速を見極めながらの作業になるが、潮流は潮止まりの 3 時間後には最大潮流速となり、6 時間後には再び潮止まりとなった後に反転する変化を繰り返す。このように、決して待ってこない自然現象に拘束される作業を確実に施工する要諦は次の 3 点となる。

- ・十分な容量を持ち、確実に作動する施工設備。
- ・正確で迅速な情報管理システム。
- ・施工設備を使いこなす技量。

具体的には、操作力 400tf (3920kN) ・耐力 1000tf



写真-1 明石海峡大橋の状況 (97年10月)

(9800kN) の係留装置と係留索を短時間で接続するクイックジョイント, 50台の水中ポンプで構成する注水装置, 300を超える情報を2秒間隔で収集・変換・表示する情報管理装置であり, また, 訓練海域における1ヵ月を超える訓練で習得した卓抜した操作技量である。

これらが相俟って設置作業は極めて順調に進捗し, 設置誤差10cm以下の高精度の施工を実現した。また, 降下途中において, 従来は明確でなかったレイノズル数が 10^8 を超える領域の抗力係数を測定した。

2. ケーソンの構造

主塔基礎は写真-1に示すように, 舞子側(2P)と淡路島側(3P)の2基設置しているが, ほぼ同等の寸法のためここでは2Pに代表して述べる。ケーソンは潮流力の低減と位置決め容易さより円形とした。構造は図-1に示すように, 外壁と内壁を有する二重壁構造であり, 二重壁部の底面を密閉して浮力を確保した。この二重壁部は, 注水した水の遊水化の防止・全体剛性の確保・水中コンクリートの打設量の調整等のため円周方向に16区画に仕切った。また, 内壁部の天端には犠装架台や水中コンクリート打設時の足場を設置するためトラス骨組のストラットを格子状に配置した。本体の鋼重は1万5千tf(14万7千kN), 犠装品を含む総重量は1万9千tf(18万6千kN), 曳航時の吃水は8mである。

3. 全体工程

ケーソンの組立には80m×80m以上のドライドック

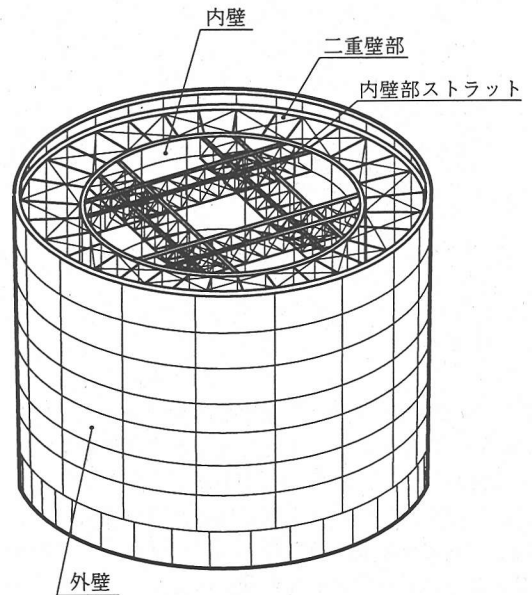


図-1 2Pケーソン構造図

クが必要になるため, 瀬戸内海周辺の造船所で製作した112のブロックを, 2Pは津市の造船所, 3Pは玉野市の造船所で一体に組み立て, 曳航と設置に必要な各装置を犠装した。

設置は掘削工事の先行した2Pから開始し, 津市から小豆島沖合に設定した訓練海域まで約300マイル曳航して係留の上, 2ヵ月間犠装品の試運転と習熟訓練を実施した。訓練の完了した1989年3月26日の夕刻に小豆島を出発し, 27日昼間に神戸市沖に到着して仮泊した。28日の早朝に現場海域に入域し午前中の憩流時に係留して, 吃水27.5mまで注水降下させ,

表-1 ケーソンの設置工程

区分	1	2	3	4	5	6	7	(暦月)
2P		艀装						
		艀航 (津～小豆島)						
			試運転・訓練					
				艀航・沈設 (29日)				
						艀装架台撤去 (玉野へ)		
3P				艀装				
				艀航 (玉野～小豆島)				
				試運転・訓練				
				艀航・沈設 (11日)				
						艀装架台撤去		

29日の午前の潮止まりに着底させた。その後、ケーソンに搭載した艀装品を撤去し、3Pを組み立てている玉野市の造船所に運搬した。

3Pは2Pから撤去した艀装品を1ヵ月で再艀装し、小豆島沖合の訓練海域に艀航・係留した。ここで1ヵ月間、試運転と習熟訓練を行い、6月8日の午後に小豆島を出発して9日の夕刻に淡路島の大磯沖合に到着して仮泊した。10日の早朝に現場海域に入域し午前の憩流時に係留して、吃水27.5mまで注水降下させ、11日午後の潮止まりに着底させた。以上述べた一連の工程を表-1に示す。2P・3Pとも設置誤差は10cm以内であり、ほぼ同等の手順で施工しているため、以下は潮流条件の厳しい3Pに代表して述べる。

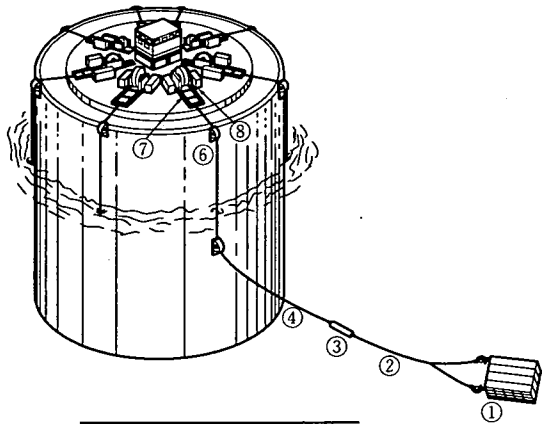
4. 艀航と係留

(1) 係留装置の構成

ケーソンの係留はあらかじめ海底に設置されているシンカー側の8本の係留索と、ケーソンに搭載されたウインチ側の8本の係留索を接続する作業である。具体的には、シンカー側の係留索は揚錨船の甲板に巻き上げて置き、ケーソン側の係留索はウインチで繰り出しながら索取船で揚錨船まで運び甲板上で接続する。接続後は直ちに、揚錨船のクレーンで接続金具を吊り下ろしながら、ウインチで係留索の余長を巻き取ることになる。したがって、係留索は図-2に示すように、シンカー・係留索・接続金具(クイックジョイント)・フェアリーダ・リーディングブロック・ウインチで構成することになる。以下、これらの各装置の課題と解決策について述べる。

(2) ウインチ

ウインチの仕様は巻込力と巻込速度で表されるが、係留索の接続時と位置決め時で異なる。係留索の接続時には係留索を200m程度繰り出し、接続後に



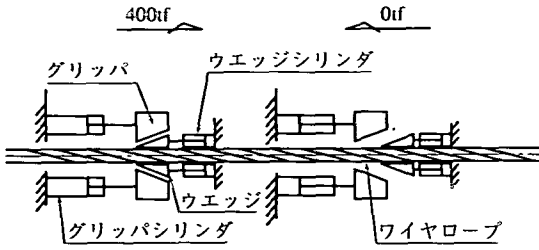
名 称	
①	シンカー
②	係留索 (シンカー索)
③	クイックジョイント
④	係留索 (ケーソン索)
⑤	フェアリーダ
⑥	リーディングブロック
⑦	リニアウインチ
⑧	油圧パワーユニット

図-2 係留装置の構成

100m程度の余長を巻き込むことになるが、憩流時の短時間に制限されるため30m/分程度の巻込速度と20tf (196kN)程度の巻込力が必要になる。位置決め時には潮流力・波力・風力に対抗してケーソンを所定の位置に誘導するための400tf (3920kN)程度の巻込力が必要になるが、移動距離は数mのため巻込速度は2m/分程度で十分である。

すなわち、低張力・高速巻込と大張力・低速巻込の仕様ポイントの異なるウインチが必要になる。瀬戸大橋でも20tf (196kN)×20m/分と130tf (1270kN)×2m/分のウインチが必要になり、一般的な多層巻込のドラムウインチと直径76mmのワイヤロープを使用した。下層のワイヤロープの型崩れや、上層のワイヤロープが下層ワイヤロープの間に落ち込む段落ちが生じて対策に苦慮した。ワイヤロープは張力により半径方向に絞られて堅く細くなるため、低張力で巻き込んだ柔らかいワイヤロープの上に大張力の堅いワイヤロープを巻き込むと前述の不具合が生ずる。今回のワイヤロープは張力400tf (3920kN)直径120mmになるため、ドラムウインチではより厳しい不具合となることが予想されるため、この防止措置が必要になる。

これを防止するには400tf (3920kN)の張力をドラム以外の機構で受け持つ必要があり、トラクション



前部と後部のシリンダが交互に伸縮を繰り返す

図-3 リニアウインチ作動原理

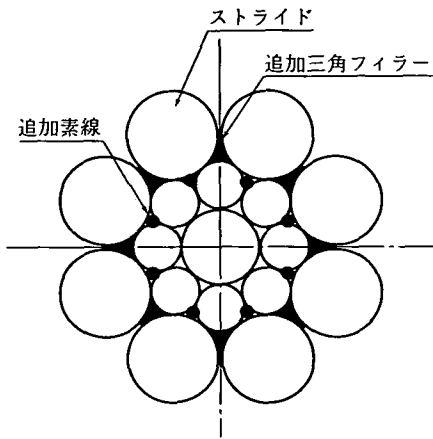


図-4 ワイヤロープの改善断面

ウインチとリニアウインチの2種類考えられるが、ここでは経済性や機構の簡略化よりリニアウインチを採用した。リニアウインチは図-3に示すように、ワイヤロープを楔（ウエッジ）を利用したグリッパで保持し、このグリッパを油圧シリンダで動かしてワイヤロープを巻き込む（繰り出す）ものである。したがって、ドラムウインチの前部にこのリニアウインチを設け、20tf (196kN) × 20m/分をドラムウインチ、400tf (3920kN) × 2m/分をリニアウインチで行えば前述の不具合は解消できる。この機構では、張力は楔によりワイヤロープの半径方向の圧縮力に変わり、楔とワイヤロープの摩擦力で保持するためワイヤロープの滑りや素線の損傷が懸念された。このため、楔・グリッパ・ワイヤロープを試作して引張試験を行ったところ、滑りは生じないものの、耐力が1000tf (9800kN)のワイヤロープが850tf (8330kN)で破断した。素線の破断は徐々に進んでいる（音で判別）ため、途中でワイヤロープをばらして調査したところ、長手方向ではグリッパ、半径

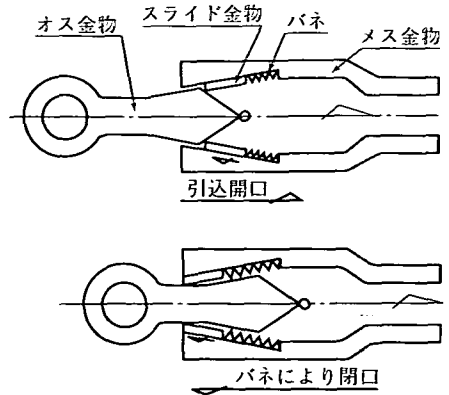


図-5 クイックジョイント作動原理

方向ではストランド同士の当り面で破断されていた。これより、破断の原因は圧縮力により素線の接触部が変形（断面縮小）しているためと考えられた。このため、図-4に示すように、ストランド同士の間に三角形のファイラーと素線を追加し、素線間の圧縮力を緩和して（線接触を面接触）耐力1000tf (9800kN)を確保した。

(3) クイックジョイント

ケーソンの係留の要諦は、係留索の迅速・確実な接続にある。係留索の接続は、係留索の端部に設けたソケット同士を嵌め合わせて両者の孔にピンを挿入する方法が一般的であり瀬戸大橋でもこの方法を踏襲したが、直径76mmの係留索の接続に40分以上費やした。これはピンの重量が70kg f (686N)と重く、また、ソケットの孔が揚錨船の揺れによりズレて数回のやり直しが必要になるためである。今回は係留索の直径が120mmであり、ピンの重量も200kgf (1960N)になるため接続時間が長くなることが予想されるが、逆に憩流時間は短いため、短時間で確実に接続できる継手の開発が必要になった。開発にあたっては、装置の重量より入力によることなく機械力で接続するものとし、前述のリニアウインチのグリッパ機構をヒントに図-5に示すクイックジョイントを開発した。この装置は、シンカー側の係留索にオス金物・ウインチ側にメス金物・メス金物の内部にテーパリングとテーパリングに沿ってスライドするスライド金物で構成している。揚錨船上の5tf (49kN)程度のウインチでオス金物をメス金物内に引き込むと、スライド金物はオス金物に押されて後退開口し、オス金物が入りきるとスライド金物はバネ力により前進縮口して接続を完了する。オス金物とスライド金物の当り面はテーパ状になっているた

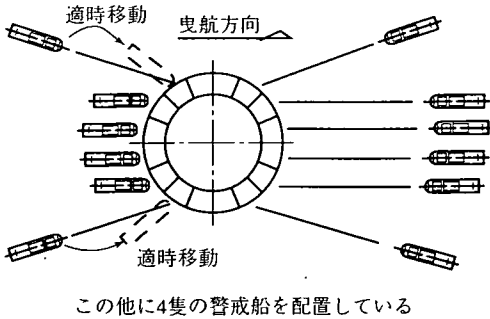


図-6 ケーソンの曳航船団

め、オス金物の張力は圧縮力としてメス金物に伝わり、メス金物はフープテンションとして受けるため、力の流れも取り扱いも単純明快な機構である。本装置は、実大の試験機を製作して 1000tf (9800kN) の耐力試験と実作業と同様な手順で接続試験を行った。この試験によると、接続そのものは数秒で完了し、装置の運搬から余長の巻き込みまで30分以内に完了する見通しを得た。

(4) 曳航

ケーソンは憩流時に潮流に逆らって現場海域に進出し、係留が完了するまで曳船の連携作業で位置を保持しなければならないため、曳航力とともに位置の制御性能が必要になる。曳航時の対水速度を 4kn とすると、曳船の必要出力は 4 万 PS 以上になるが、国内で調達できる曳船の出力は 3200PS~3400PS であり、10 隻以上の曳船が必要になる。曳航中や係留中の位置は付近の地形や主要な構造物の見通しによって把握し、曳船の回頭方向と出力によって制御するが、指揮者の勤と経験に頼る作業のため極力単純にすることが望ましい。したがって、曳航船団は図-6 に示すように、曳航方向の前後各 4 隻の曳線により主として曳航力を、左右各 2 隻の曳船により主として位置決め性能を確保するように 12 隻配置してそれぞれの機能分担を図った。

(5) 係留

ケーソンを係留するシンカーは、潮流力・波力・風力に耐えるとともに所定の位置への誘導が容易な配置が望ましく、角形のケーソンでは瀬戸大橋¹⁾に見られるように直行配置が多用されている。しかし今回は形状が円形のため位置決めは中心のみで足りるとともに、潮流は東西流が卓越しており、この潮流力の緩和を目的に図-7 に示すように、東西方向は

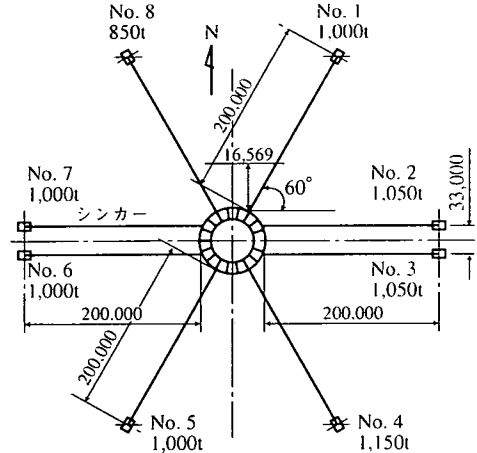


図-7 シンカーと係留索の配置

表-2 係留索に作用する最大張力(計画値)

区分	施工段階	吃水(m)	潮流(kn)	張力(tf)
2P	係留完了	8.2	1.7	19
	一次注水	27.5	3.8	309
	二次注水	43.0	1.5	86
3P	係留完了	8.0	2.5	38
	一次注水	27.5	4.3	385
	二次注水	45.0	2.6	230

*風速は10m/秒、波高は1mである

平行に、南北方向は 60 度開いた放射状に配置し、南北のシンカーでも東西の潮流力を負担する配置にした。ケーソンとシンカーの距離は工事占有海域(東西 1km・南北 500m)の制約と係留時の作業性により 200m とした。この配置における、各係留索に作用する張力は吃水と潮流速によって異なり、代表的な施工段階における係留索の最大張力は表-2 に示すように、385tf (3770kN) になり、これより係留装置の巻込力は 400tf (3920kN)、耐力は 2.5 倍の安全率を考慮して 1000tf (9800kN) にした。なお、最大張力は係留索毎に異なるが、ワイヤロープ・クイックジョイント・リニアウインチは設計と製作の手間より同一の仕様とし、シンカーは鋼スラブを積層したものであり重量調整が容易なため、850tf (8330kN) ~ 1150tf (11270kN) で構成した。以下、3P を例に実際の係留作業を表-3 と図-8 を参照しながら述べる。

① 12 隻の曳船で曳航されて現場海域に進出したケーソンを曳船の連携作業より所定の位置に

全周のリング配管から
任意の区画に注水

表-4 注水ポンプの構成

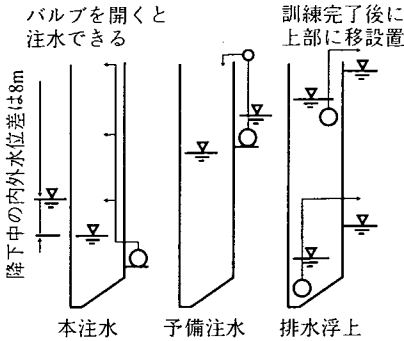


図-9 注水装置の構成

用途	本注水	予備注水	排水浮上
揚水量 (m ³ /分)	10	10	3
揚程 (m)	20	30	30
台数	32	2	16

ーソン内への注水が必要になる。また、着底後の再測量において規定以上の誤差が発見された場合には再浮上が必要であり、各区画に1台づつ再浮上ポンプを設けた。以上の3種類の水中ポンプの構成を表-4に示す。

(2) 降下と着底

3Pは、6月10日14時34分に係留を完了し所定の位置に導いた後、吃水20mまで降下して再下段の注水口を閉じて翌日に備えた。翌朝の8時10分より注水を再開し、吃水34mで中段の周水口を閉じて再降下を開始した。降下にもない係留索が弛んでケーソンの位置がずれるため、途中で2回所定の位置に誘導している。

15時4分に吃水56.3mに達し、ここで最終的な位置決めの後、15時35分より注水を開始し、15時52分に着底した。当日の潮止まりは15時57分であり、計画と寸分狂わない施工であった。また、設置誤差も10cm以下であり測量誤差の範疇である。なお、実際のスケジュールを表-5に示す。

6. 情報の収集と管理

(1) 情報管理と装置構成

係留を完了した後の設置作業は、平面上の目標位置への誘導と基礎底面への降下であり、操作対象は8台のウインチと32台のポンプである。ウインチの運転はワイヤロープの巻き込みと繰り出し、ポンプの運転は揚水と停止の極めて単純な操作である。したがって、運転そのものより「いつ・なにを・どれだけ」操作するか?が重要になる。例えば、目標位置に誘導するには、目標位置との誤差・各ウインチに作用している張力・潮流の方向と速度の把握が必要であり、操作後はその効果(誤差の収束量)の把握が必要になる。これらの情報は種々雑多であり総数300を超えるとともに、時々刻々変化し、さらに出所が広い範囲に点在する。加えて、設置作業は潮止まりを中心とする憩流時に限られる作業のため、速く・正確に収集し・解りやすい形に整理して指揮者

信頼性を優先してポンプ注水を採用した。

ポンプの能力は揚水量と揚程で決まる。必要な揚水量は、ケーソンの降下高さ50mと潮止まり間隔より決まる必要降下速度8m/hに二重壁部の面積2500m²を乗じた2万m³/hであり、市場性(リース調達)と信頼性より10m³/hの水中ポンプを各区画に2台づつ合計32台使用する。揚程は50mであり、1段で揚水すると必要動力が5000kWを超えるとともに、リース調達の困難な高揚程ポンプになるため揚程の低減が必要になった。このため、図-9に示すように、水中ポンプよりケーソンの天端まで伸ばした揚水管の途中の2箇所に注水口を設けた。最初は最下段の注水口を開いて注水し、水位が最下段の注水口まで上昇した時点でこの注水口を閉じて中段の注水口から注水する。同様に、中段の注水口まで水位が上昇した時点でこれを閉じて、最上段から注水すると揚程は市販ポンプの揚程の20m以下になる。

注水する二重壁部の内側スキンプレートの強度は10tf/m²(98kN/m²)であり、吃水は8mであるから各区画の注水高の許容誤差は2mになる。したがって、各区画2台づつ注水している32台のポンプのうちの1台でも故障すると、その区画の注水が遅れるため残りの区画の15台のポンプを停止させなければならない。また、2台故障した区画が現われると降下が不可能になる。特に、着底は潮止まりの短時間を狙って行うものであり、着底直前に故障すると致命的なダメージを招きかねないため信頼性の向上が不可欠になる。このため、2台の予備ポンプとケーソン天端に各区画への注水口を有するリング状の配管を設け、ポンプの故障した区画には直ちに予備ポンプから注水できる構成にした。

訓練海域では、注水ポンプの機能・傾斜の発生とその修正・水位計の精度等の確認のため、実際にケ

表-5 3Pの降下着底スケジュール (6月10日~11日)

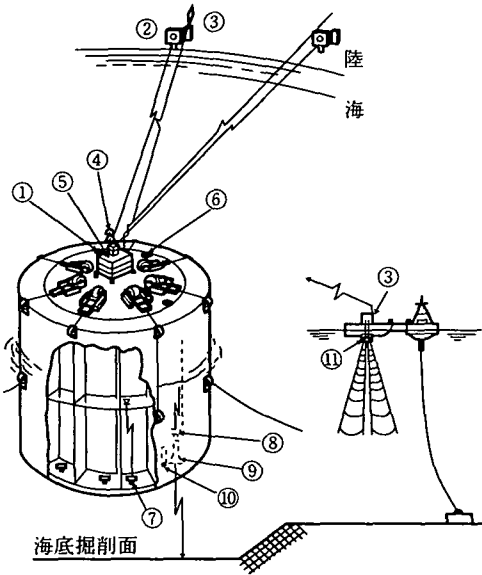
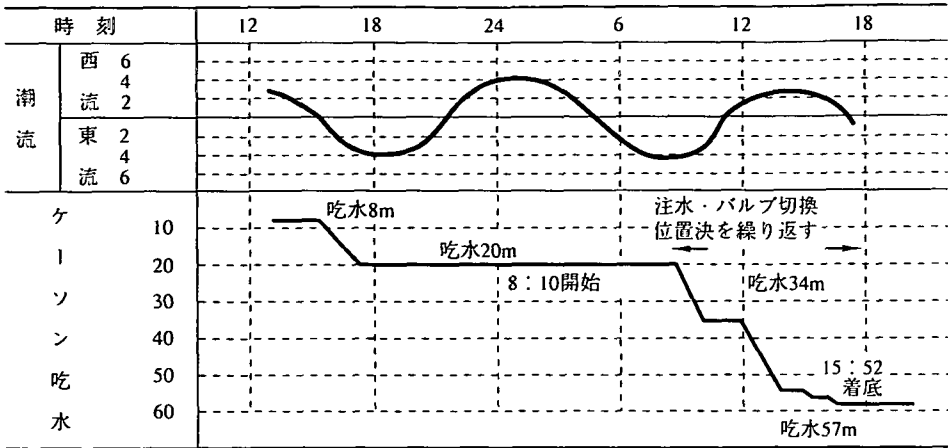


表-6 CRT画面と表示内容

画面	情報の内容	摘要
1	①ケーソンの据付け目標位置と現在位置 ②各ウインチの張力, 索長 ③ケーソンの傾斜, 方位 ④潮流速, 流向 ⑤ウインチの作業状況	①陸上の測量データをテレメータで受信 (メインシステム) ②バックアップ測量データは音声で送受信する
2	①ケーソンの吃水 ②ケーソン下端からの水深 ③各注水区画水位 ④ケーソンの傾斜 ⑤注水用ポンプの作業状態	ケーソンに取付けた各センサの情報を表示する
3	①推定潮位および潮流速 ②実測潮位および潮流速 ③ケーソン下端からの水深の履歴	ケーソン近傍で測定した潮流速をテレメータで受信する

No.	名称	数量	No.	名称	数量
①	コンピュータシステム	1	⑦	水位計	16
②	測距測角儀	2	⑧	吃水計	1
③	テレメータ	3	⑨	水深計	4
④	反射プリズム	2	⑩	水温計	1
⑤	方位計	1	⑪	流向流速計	1
⑥	傾斜計	2			

図-10 情報管理装置の構成

に提供することが重要になる。このため、図-10に示すように、各所に配置したセンサで収集し、電算機で処理してCRTにグラフィック表示した。主要な情報は、ケーソンの平面位置・海底面までの距離・

潮流の方向と速度・各装置の作業状況であり、表-6に示す3画面に分けて表示した。なお、これらの情報の収集と表示はオンラインであり、画面の更新ピッチは約2秒である。

(2) 位置情報

ケーソンの形状は円筒のため中心位置を測量すればよい。測量に先立ち、ケーソンの設置位置と陸上の光波測距儀の座標値を電算機に入力して測量を開始する。測量網は図-11に示すように、2距離測量をメインにし、前方交会法と測距測角法をバックアップとして3系統設けた。メイン系では、2台の測距

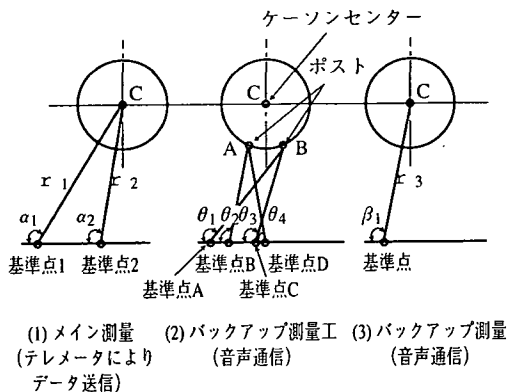


図-11 位置の計測要領

儀でケーソンの中心に設けた反射プリズムを視準し、2距離と仰角をケーソンにテレメータ送信する。ケーソンでは受信したデータにケーソンの傾斜を乗じて下面の中心位置を決め、目標位置との誤差としてCRT画面に表示した。また、この画面には、各ウインチの張力・ケーソンの傾斜・潮流の方向と速度等も合わせて表示し、指揮者はこの画面を見ながらウインチの操作指令を発した。

バックアップ系はメイン系の故障時と測量開始時や最終位置決め時の確認測量に使用するもので、音声で送信して別の電算機で位置を求めた。これらの測量値は10cm以内に入るものであり、設置中は適時、3系統の値を確認しながら作業を進めた。

(3) 注水降下情報

ケーソンは50m以上注水降下させるが、降下途中において注水口の変更と、着底直前に最終位置決めのために停止しなければならない。また、16区画の水位を均等に保って水平に降下させなければならないため、降下中はケーソンの高さ・傾斜・各区画の水位を管理しなければならない。ケーソンの高さは先に述べた光波測距儀の仰角で求めることができるが、設置作業では絶対高さよりむしろ着底面までの距離が重要であり、4箇所(東西南北)に超音波測探器を配置して着底面までの距離を直接測量した。ケーソンの傾斜する要因は、各区画の注水量のアンバランス・潮流力・係留索の張力の鉛直成分の差等であるが、注水のアンバランスが支配的なため各区画に水位計を配置して水位を計測した。これらの着底面までの距離・各区画の水位・傾斜の方向と大きさ等の情報もCRT画面にグラフィック表示し、指揮者はこの画面を見ながら注水ポンプの操作指令を発した。

(4) 潮流情報

ケーソンの係留や降下着底は潮止まりを中心とする憩流時に行わなければならないため、潮止まりの把握が必要になる。潮止まりの時間の予測は可能であるが、気象条件によってずれる可能性があるとともに、現場海域は潮流が速くその変化も複雑である。このため、潮流の流速流向計を搭載した測量船を配置して実際の潮流を観測した。この流速流向計は超音波式であり、上層・中層・下層の流速と流向を計測し、データはテレメータでケーソンに送信した。受信したデータは予想潮流と合わせてCRT画面にグラフィック表示し、指揮者はこの画面を見ながら、現場海域への進入開始・係留開始・注水開始・着底開始の指令を発した。

(5) 習熟訓練

係留と設置作業の中核になる、リニアウインチ・クイックジョイント・情報管理装置等は新しく開発したものであり、機能の確認とともに取り扱いに習熟させなければならない。また、情報を収集表示しても指令を発するにはノウハウが必要であり、これを会得するには実際に操作して体感するのが確実である。このため、小豆島沖に訓練海域を設け、ケーソンを回航係留して試運転と習熟訓練を実施した。試運転の主要な確認項目は、ウインチの巻込力と巻込速度・注水ポンプの揚水量・情報管理装置の精度と表示項目の適否等であり、実際に操作して規定仕様の範囲にあり、使用上不具合がないことを確認した後、設置作業に従事する50人の作業員と4隻の揚錨船を特定して習熟訓練に移った。係留索の接続訓練は、メス金物の引き出しから余長の巻き込みまでを30分で完了するまで訓練を繰り返したところ、各船とも3回~4回で目標に達し実施に適用できる見通しを得た。

平面位置の誘導訓練では、係留直後を想定して10mの誤差を1m以下にする誘導と、着底直前を想定して1mの誤差を10cm以下にする誘導の2種類に分けて実施した。これらは、当所は誘導開始から完了まで30分以上要していたが、回数を重ねるごとに技量が向上し10回程度で10分以内に完了するようになった。特に、リニアウインチは1cmオーダで係留索の巻き込みと繰り出しが容易にできるため、高精度の設置に明るい見通しを得た。

注水降下の訓練では、20mの降下と再浮上を2回繰り返す。降下にもなう係留索の張力の変化・注水アンバランスの発生量を、次いで、強制的に1mのアンバランスを発生させて傾斜量と修正時間を確認

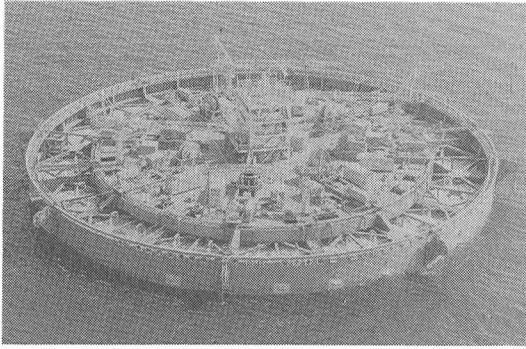


写真-2 ケーソン上の機装品の配置状況

した。これによると、降下にもとない張力は弛むが10分程度でもとの位置と張力に回復できる（増し締め）こと、注水量のアンバランスは微量（数cm）であること、1mのアンバランスは10分程度で回復できること等、実施工上の問題は見当たらなかった。

また、メイン測量系故障時のバックアップ測量系による誘導や、注水ポンプ故障時の予備ポンプによる注水等のトラブル対応等の訓練も実施した。

これらの試運転と訓練に、最初に施工した2Pでは2ヵ月、続いて施工した3Pでは1ヵ月を要したが、各自が係留と設置の作業における担当職務の位置付けを明確に把握するとともに、機器の操作と操作時のケーソンの挙動を体感する（体で覚える）ことができ、極めて有効であった。なお、ケーソン上の機装品の搭載状況を写真-2に示す。

7. 抗力係数の測定

(1) 計画抗力係数

ケーソンが曳航と係留時に受ける外力は潮流力が支配的であり、曳航船団や係留装置の計画にあたっては抗力係数の算定が重要になる。抗力係数は物体の形状とレイノズル数によって決まることが知られているが、今回のケーソンのような、二重円筒形の抗力係数の研究例は見当たらない。このため、尺度1/100の模型による水槽実験を行い、抗力係数は吃水8mで0.7、吃水50mで0.75の結果を得た。これを既往の研究²⁾の円柱の抗力係数と比較すると図-12に示すように、無限円柱の抗力係数1.2に対して58%~63%の値になるが、これには一般的に三次元影響といわれる無限円柱と有限円柱の差を含んでおり、空気力学では縦横比（部材長/部材径）により表-7³⁾に示す補正係数が提案されている。模型の縦横比は4以下であることから補正係数は0.6になり、前述の58%~63%とほぼ一致する。

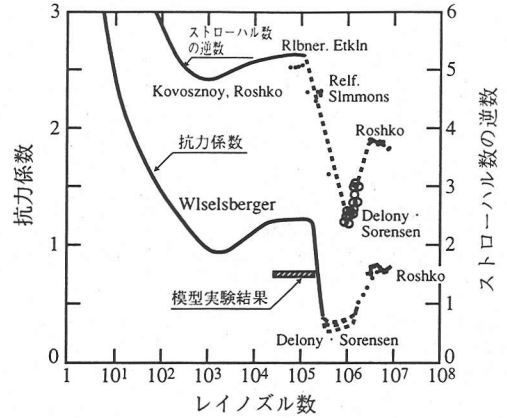


図-12 レイノズル数と円柱の抗力係数およびストローハル数の関係

表-7 部材の縦横比に対する補正係数³⁾

縦横比	補正係数
4以下	0.6
4~8	0.7
8~40	0.8
40以上	0.9

すなわち、二重円筒形と円筒形の差は少ないようである。一方、抗力係数はレイノズル数によっても異なり、図-12に示すように、10⁵を超えると急激に減少し、10⁶を超えると増加する不連続な傾向を示すが、10⁷を超える研究例は見受けられない。レイノズル数は流体の運動粘性係数に反比例し、流速と物体の大きさに比例するため、模型実験では10⁵実施工では10⁸程度になる。実施工では0.7以下になる可能性はあるものの安全性を考慮して0.7として計画を進めた。

ケーソンの係留装置は係留索の張力計を備えており、また、係留中に4knを超える潮流を受けるため、既往の研究例に無いレイノズル数が10⁸を超える領域の抗力係数を測定した。これは、8本の係留索と潮流力の総和が0になるとして求めた潮流力と（当日は平穏であり風と波は無視しうる）、ケーソンの受圧面積・潮流速度より抗力係数を求めたものである。この結果は図-13に示すように、バラツキは見られるが0.2~0.5の範囲にある。高レイノズル数における抗力係数の研究例が見られないため妥当性の検証はできないが、今回採用した0.7以下に低減できる可能性のある貴重なデータが提供できたと考えている。

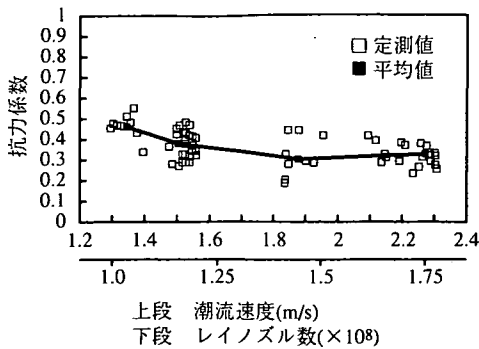


図-13 鋼ケーソンのレイノズル数、潮流速度と抗力係数の関係

8. おわりに

2P・3Pともに誤差10cm以下で設置することができた。この施工で得た知見をもとに成功の要因を整理すると次のようになる。

- ① 低張力高速巻込用のドラムと高張力低速巻込用の油圧シリンダをコンバインしたリニアウインチは円滑に稼働し、1cmオーダで係留索長を制御できる。
- ② リニアウインチを使用した場合、通常のワイヤロープの耐力はグリップ部の圧縮力により15%程度低下するが、ストランド間に素線とファイラーを挿入すれば耐力の低下を防ぐことができる。
- ③ 平面位置・海底面までの距離・各区画の水位・潮流速と方向等をリアルタイムに表示する情

報管理装置は極めて有効である。

- ④ 作業に従事する作業員に実際に装置を操作させ、操作の習熟と操作時のケーソンの挙動を体感させる習熟訓練は極めて有効である。
- ⑤ 抗力係数は水槽実験の結果より0.7として計画を進めたが、レイノズル数が 10^8 領域の実施工で計測した抗力係数は0.2~0.5の範囲にあり、今後は低減できる可能性があるデータを得た。

今回のケーソンの設置は規定時間に確実に来襲する潮流の間隙を狙った、自然現象が相手の作業である。2万tf(19万6千kN)近い浮体を海面下60mの地盤に10cm以下の精度で設置した事実からは、超人的な力や劇的な展開を想像しがちであるが、実際は淡々と施工している。成功の要因は、十分な装備・的確な判断・装備を使いこなす技量・定められた時間に定められた職務を実行した協力体制である。この面で、装備の製作を担当されたケーソン製作JVと設置を担当された下部工JVの皆さんに敬意を表するとともにお礼を申し上げて報告を終える。

参考文献

- 1) 杉田秀夫：橋梁基礎の海中工事，土木学会論文集，第361号/VI-3，pp. 11-20，1985年9月。
- 2) (社)国際科学技術協会：海洋構造物の振動問題，pp. 240，1988年9月。
- 3) 日本海事協会：係留システム設計指針，pp. 72，1983年。

(1997. 4. 14 受付)

LAYING-DOWN OF LARGE-SCALE CAISSON AT AKASHIKAIKYO BRIDGE FOUNDATION WORK

Satoshi KASHIMA, Mitsushige SAKAMOTO,
Motohiro SUZUKI and Kozo HIGUCHI

The foundation of main tower the Akashi Kaikyo Bridge, which has the scale of 80 ms dia. by 70 ms height, amounting volume of 350 thousand cubic meters, is the direct foundation mounted on an excavated seafloor 60 meters below the sea level. The utmost difficulties for its construction work were the laying down of 19 thousand tons of steel caisson as the wholeshape mold for the casting of underwater concrete. The strait's harsh physical conditions such as swift tidal currents of up to eight knots, as well as heavy sea traffic in which 1,400 ships cruise every day, required swift laying-down operation of large scale construction facilities, with the setting accuracy within ± 10 cms.

This paper introduces the problems concerning the laying-down of steel caisson, and the ways and means employed to overcome those difficulties.