

円筒型波浪制御構造物の現地計測

FIELD OBSERVATION OF CYLINDRICAL BREAKWATER CAISSON

清宮 理* 黒澤 馨**

By Osamu KIYOMIYA* and Kaoru KUROSAWA**

Double cylindrical breakwater caisson has been newly developed to obtain calm water area. Structural configuration of this new caisson differs from ordinary box type breakwater caissons. The limit design method was adopted to this caisson and its construction work was scrutinized. Field observation has been carried out since 1989, in order to confirm validity of the adopted design method and security of construction work. Strains due to pre-stressing, during the caisson and after completion are obtained. This paper discusses about comparison between observation and calculation by FEM.

1. まえがき

二重円筒ケーソン¹⁾は、高波浪・大水深海域において外海からの波浪の進入を有効に制御し沿岸域を静穏に保つため開発された構造物である。このケーソンは、鉄筋コンクリートあるいはプレストレストコンクリートで作されており、本体は二重の円筒壁で構成され、外側の円筒壁に多数の開口部が設けられている。その二つの円筒壁で形成される遊水部に波を取り込み、波どうしを互いに衝突させることにより波エネルギーを低減させる仕組みとなっている。この独特の構造上、従来の箱型のケーソンの設計・施工法をそのまま二重円筒ケーソンに適用することはできない。そのため各種の試験や数値計算^{2) 3)}を実施することにより新たに設計・施工法を取りまとめた。しかしながら、実用的な設

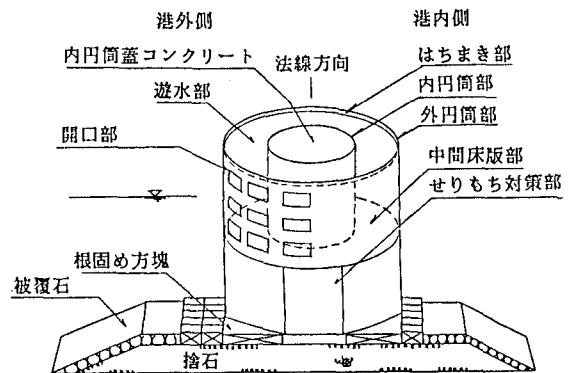


図-1 二重円筒ケーソン堤概念図

* 工博 運輸省港湾技術研究所 構造部 構造強度研究室長 (〒239神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

** 運輸省第三港湾建設局 神戸調査設計事務所 (〒650神戸市中央区海岸通神戸地方合同庁舎)

計・施工が可能な段階に達していたものの、その機能が効率的に発揮できる海象条件の厳しい海域に適用するには多くの課題が残されており、実海域において当該ケーソンのもつ機能の有効性、設計法の妥当性、及び施工性を確認する必要があった。このため、平成元年度より比較的海象条件の穏やかな境港において実物の二重円筒ケーソン4函を適用することとし、これを用いて各種の現地実証試験を行なうこととした。本論文ではこのうち施工時において実施された試験であるプレストレス導入時、ケーソンの吊り上げ時、及び波浪時に部材に生じる応力度の現地計測について述べる。

2. 境港に適用した二重円筒ケーソンの概要

二重円筒ケーソンの基本的構造は図-1のとおりである。また境港で製作された二重円筒ケーソンは鉄筋コンクリート製(以後RC函と称することとする。)2函、プレストレストコンクリート製(以後PC函と称することとする。)1函、そして波に対する堤体の滑動試験用ケーソン1函の計4函である。そのケーソン寸法は堤体高さ10.4m、外円筒壁直径16.2m、そして内円筒壁直径8.1mとなっており、設置水深10.6m、海岸より沖合い約2kmの地点に設置されている。このケーソンの施工時及び波浪時に生じる断面力は有限要素法により計算し、部材断面の諸元は限界状態設計法により設計されている。

施工法の手順は、ケーソンは陸上ヤードにおいて配筋、コンクリート打設、プレストレス導入を行ない、製作完了後クレーン船で海上へ吊り上げて設置場所まで曳航した。更にマウンド上に設置後、円筒壁内側へ土砂を投入して工事は完了した。

3. プレストレス導入時の計測

3.1 プレストレスの導入方法

二重円筒ケーソンの主たる外力は波力である。この波力により円筒壁には面内引張り力が生じるが、PC函はこの引張り力に対し使用限界状態でコンクリートにひびわれが生じないようにプレストレスを導入する仕組みとなっている。但し、プレストレスを導入する部材は外円筒壁と内円筒壁部分だけであり、両円筒壁に直接接合されている隔壁や中間床版などの部材との不連続性から、施工時に二次応力によるひびわれ発生が懸念されたため、設計時において有限要素法により使用限界状態と二次応力に対する検討を行なった。その結果、プレストレストの導入量を鉛直方向 $20\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、円周方向に $10\text{kgf}/\text{cm}^2$ と設定した。これに対応するために円筒壁の鉛直方向にはPC鋼棒(28φ、SBPR95/120)を45箇所、円周方向にはPCより線(1T21.8、SWPR19)を21箇所を設置することとした。また、このときの鋼棒の1本当りの有効プレストレスト力は約30tf、PCより線は約20tfであった。

次にプレストレスの導入工程であるが、コンクリート打設はケーソン下部の不透過部(高さ4.85m)と上部

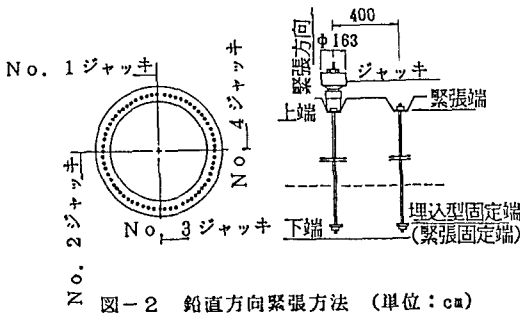


図-2 鉛直方向緊張方法 (単位: cm)

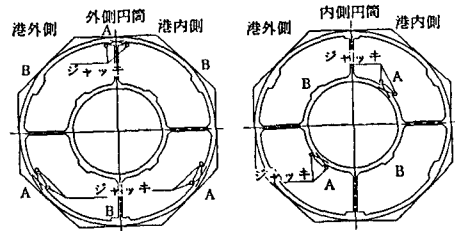


図-3 円周方向緊張方法

の透過部(開口のある部分、高さ5.55m)の2段階で行なったため、プレストレス導入は中間床版下部の不透過部をまず緊張し、その後透過部を緊張した。図-2は鉛直方向のプレストレス導入の概要である。鉛直方向の鋼棒は底版内に定着をとり緊張端に容量50tfの油圧ジャッキで片引きで緊張することとし、4台のジャッキを90度ずつずらして4箇所から同時に緊張した。一方、図-3は円周方向のプレストレス導入の概要であり、外円筒壁ではビラスターを一断面に3箇所設けて3本のより線に6台のジャッキを取付けて両引きで緊張した。また、内円筒壁ではビラスターを一断面に2台設けて2本のPCより線で外円筒壁と同様に緊張した。

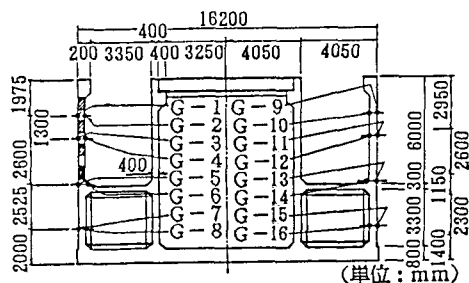


図-4 ひずみゲージの位置

3.2 計測方法

コンクリート表面にひずみゲージを図-4に示す位置に貼り付けた。測点数は16点で3成分のひずみゲージを用いた。

3.3 有限要素法による解析

図-5に使用限界状態での波圧強度の分布を示す。図中の波圧分布は水理模型実験から、また波圧強度は一年確率波より設定した。図-6はここで用いた有限要素分割であり、総節点数は936、総要素数は890とした。但し、モデル図では外円筒壁と底版のみを示し、また外円筒壁は円筒であるが図では展開して示してある。

解析方針であるが、波圧に対しては引張り応力が部材内に生じるため、必要プレストレス導入量の計算では鉛直方向には円筒壁上端より集中荷重を、また円周方向には等分布荷重をかけて部材内の圧縮応力度を算出し、これにより発生する引張り応力度を打消すように圧縮のプレストレスを計算した。一方、二次応力の検討では、プレストレスの導入手順を有限要素法で再現させ、円筒壁等の部材端にコンクリートの引張り強度以上の引張り応力が生じないような方法を模索した。これらの計算結果からプレストレスの導入順序として①外円筒壁の鉛直方向、②内円筒壁の鉛直方向、③外円筒壁の円周方向、④内円筒壁の円周方向と設定した。

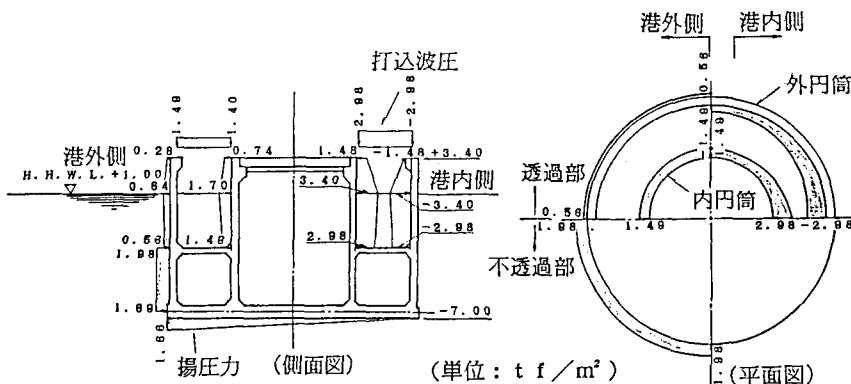


図-5 波圧強度の分布(使用限界状態)

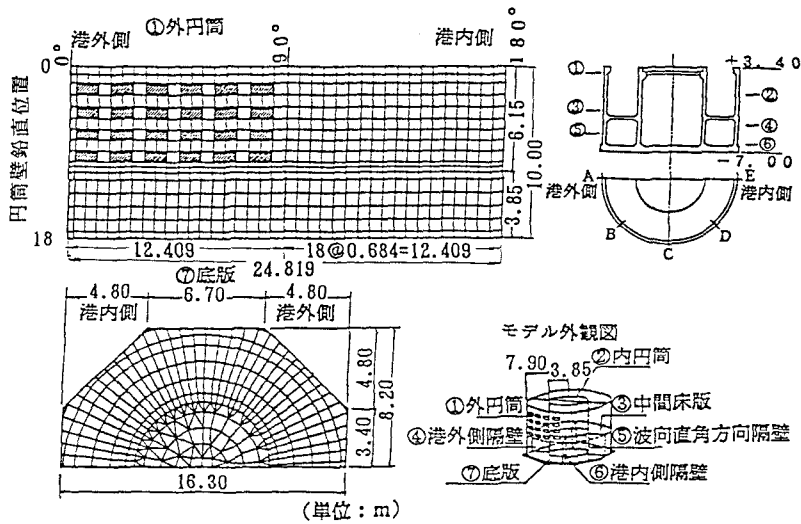


図-6 波浪時の有限要素法モデル

3.4 計算結果と計測結果の比較

図-7は透過部のみにプレストレスを導入したときの港外側の円筒壁での計測値と計算値との比較を示し

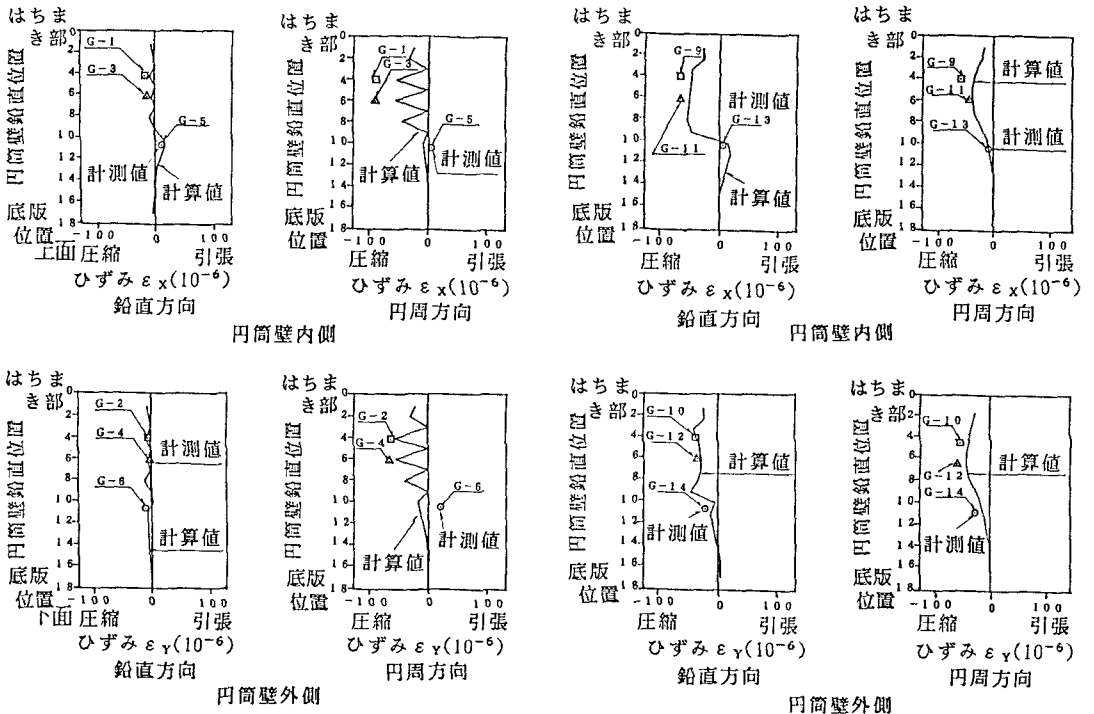
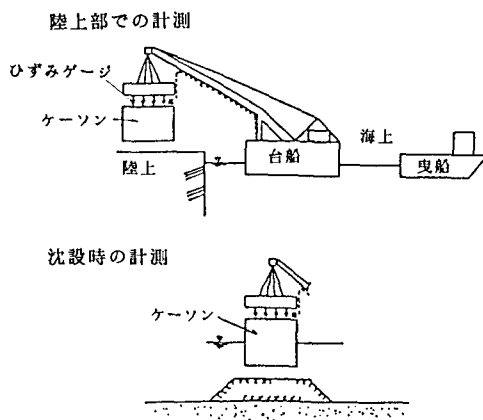
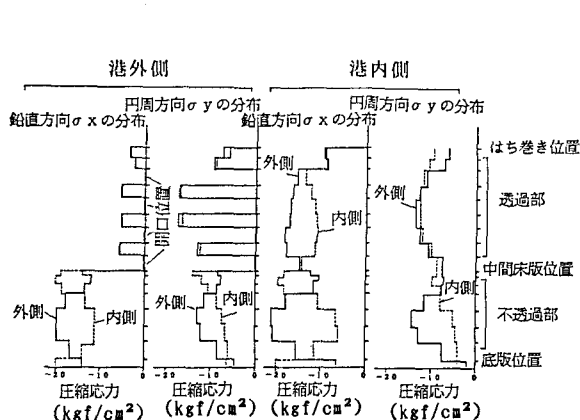
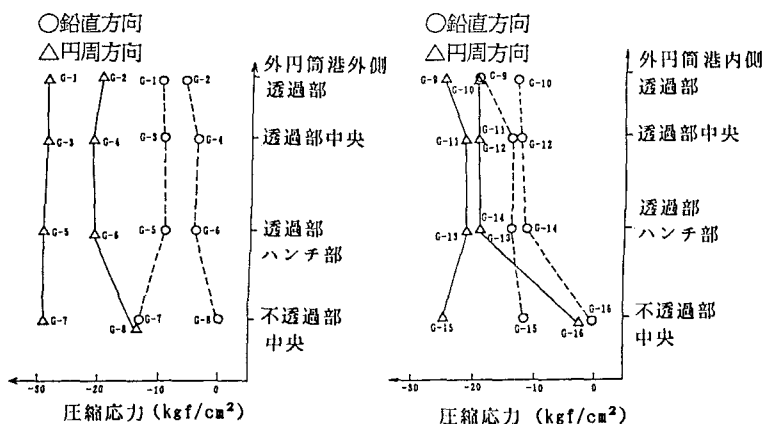


図-8 鉛直・円周プレストレス力による外円筒壁港内側ひずみ量の比較



たものであるが、鉛直方向の計測値では、ひずみゲージを貼り付けた部分には開口部が隣在するため、ほとんどひずみは生じていなかった。また、円周方向に関して計測値の方が若干計算値よりも大きいひずみが発生したが、ひずみの分布形状は類似していた。一方、図-8は同じく不透過部の港内側での両者の比較を示したものであるが、この部分は開口がないのでひずみの乱れも少なく両者の傾向は類似していた。

プレストレス導入の最終段階における外円筒壁のプレストレスト量の分布についての計算値及び計測値は図-9、図-10のとおりである。開口部のない港内側では計算値と計測値がほぼ同じ傾向を示したものの港外側部分ではやや差がみられ、また鉢巻きのある円筒壁上部及び底版や中間床版との接合部では円筒壁中央部よりも導入プレストレスト量は小さくなるとともに、これらの接合部では曲げの影響で円筒壁の内側と外側でひずみの差が生じた。しかしながら有限要素法で算出した計算値と同様、計測値においてもコンクリートにひびわれを生じさせるような大きな二次応力の発生はみられなかった。

4. 吊り上げ時の計測

4.1 吊り上げ時の状況

ケーソンは陸上ヤードで製作し、設置地点までクレーン船で吊り上げて曳航した。その後海水をケーソン内に注水しながらマウンド上に設置し、波に対する安定性を図るために中詰砂をケーソンの内円筒内部と遊水部下部に投入した。この状況を図-11に示す。ケーソンを吊り上げるときに使用した吊り筋は外円筒壁に22本、内円筒壁に10本の計32本で構成されている。また、設計時において吊り上げ時の各段階での安全性を確認するために有限要素法を適用し、ケーソン部材に作用する応力を算定した。

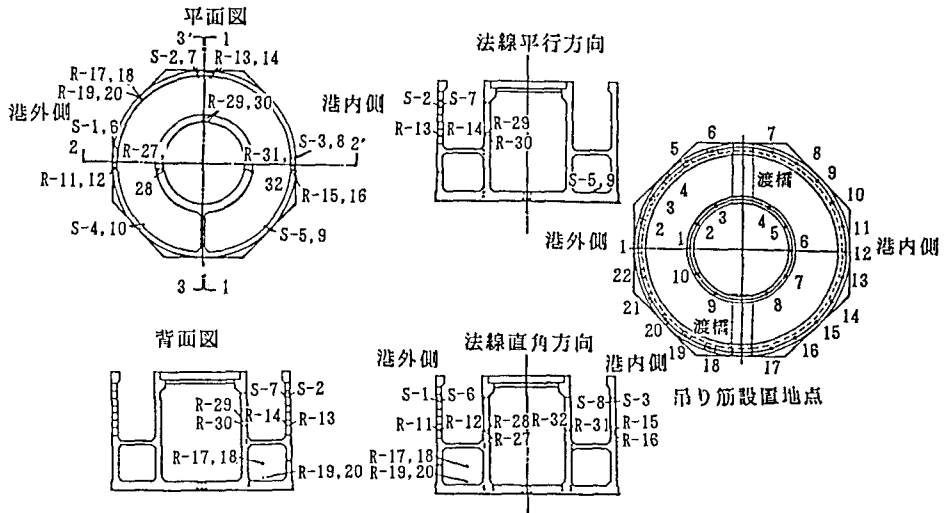


図-12 計測機器の配置 (R:鉄筋計 S:コンクリートひずみ計)

表-1 施工時計測の概要 1989.10.16.計測

ケース	計測No	測定時期	ケーソンの状況	測定時刻
①	1 2	吊ワイヤーセット前 吊上げ開始前	吊上げ準備	8:00:52 9:29:02
②	3 4 5 6 7 8 9~35	吊上げ予想荷重の 50% 70% 80% 85% 90% ケーソン完全吊上げ後 曳航中(3分間隔)	主ワイヤー 巻き上げ 完全吊上げ 離岸・曳航	9:41:39 9:50:33 10:00:48 10:20:07 10:29:35 10:33:12 10:36:00 11:54:00
③	36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49	吊降ろし前 ケーソン着水 draft=3.95m ケーソン着水 draft=9.40m 内円筒注水 2 ロット 3 ロット 4 ロット ケーソン吊上げ 完了後 draft=8.4 m 7.4 m 6.4 m 5.4 m 4.85m 据付後 ワイヤー取外し前 ワイヤー取外し後	仮置き位置 ケーソン着水 仮置き位置 ケーソン吊上げ 完全着底	11:55:18 12:05:57 12:29:03 12:43:18 12:44:55 12:54:31 13:05:06 13:05:06 13:07:24 13:12:43 13:15:02 13:17:05 13:56:42 14:01:46

4.2 計測方法

図-12は計測器の配置である。計測項目は、鉄筋ひずみ、コンクリートひずみ、吊り筋軸力、及び起重機船での吊り上げ荷重であり、そのための計測器は鉄筋計65個、コンクリートひずみゲージ12枚、吊り筋ひずみゲージ32枚、及び荷重計5台を使用した。表-1に計測した時期を示した。

4.3 計測結果

図-13は鉄筋の応力度の経時変化である。その応力度の最大値は約120kgf/cm²で、応力度は吊り上げ途中で漸増したものの曳航完了まではほぼ一定値であった。更にケーソンの着水時に応力度は小さくなり、沈設中

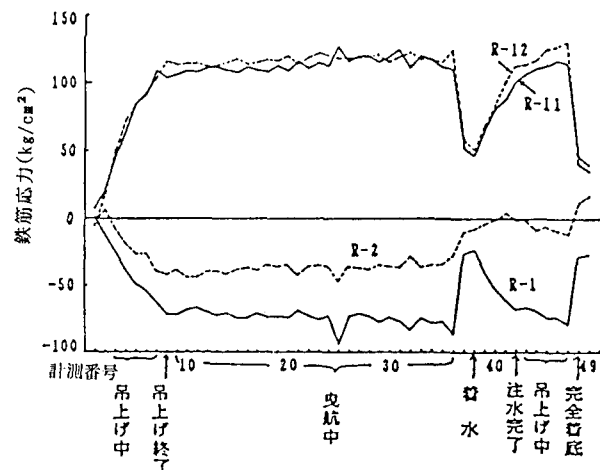


図-13 鉄筋応力の経時変化

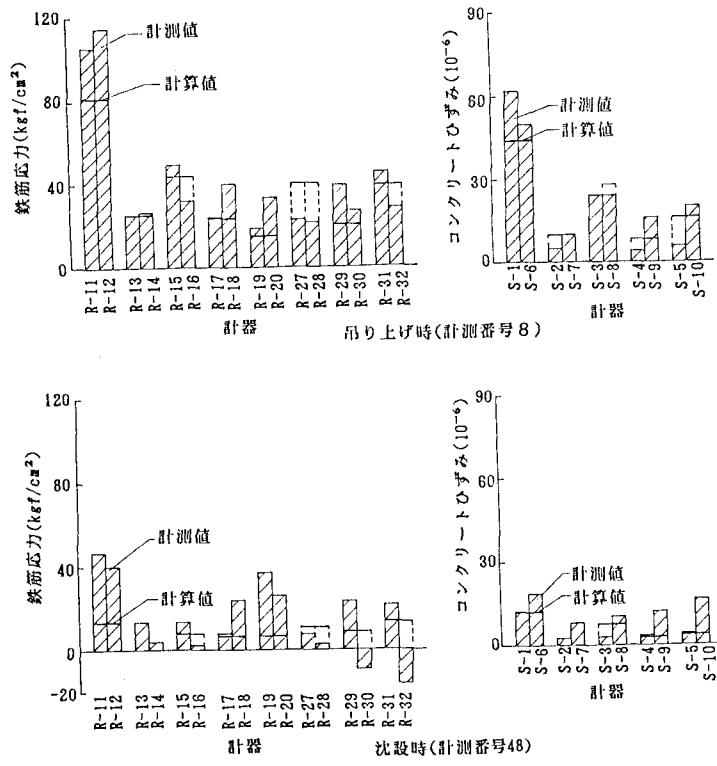


図-14 測定値と計算値の比較

に応力度が再び増加したものの完全に着底すると応力度も減少した。吊り上げ時(表-1内の8段階)と据付け時(48段階)での鉄筋応力度とコンクリートひずみとの測定値と計算値との比較を図-14に示す。これによると有限要素法による計算値と計測値ではやや違いがあったが、これは吊り筋の軸力が均一ではなかったこ

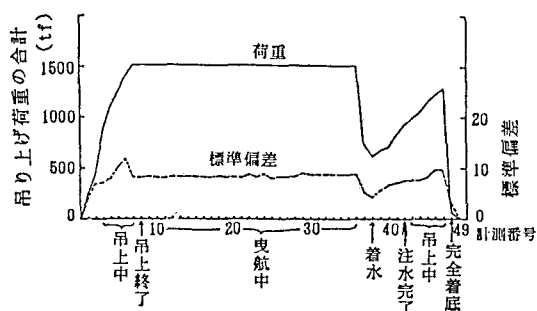


図-15 吊り上げ荷重の経時変化

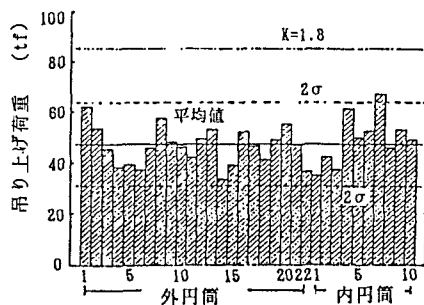


図-16 各吊り筋での軸力分布

と、開口やせりもち対策部(隣接するケーソンと外円筒頂部を互いに接触することにより破損を受けることを避けるためにする部材)の影響で応力の流れに乱れが生じたことが原因であると考えられる。また図-15は各ケーソン状態における32本の吊り筋で得られた軸力の総和と標準偏差を示したものであるが、計測値が計算値にはば一致していることがわかる。図-16はケーソン吊上げから完全着底までの過程で各吊り筋に作用した最大軸力の分布である。各吊り筋間では軸力が異なっており標準偏差は5~10tfであった。更に吊り筋の不均等係数(K_1)を次式と定義して軸力の変動を把握する。

$$K_1 = a_i / (\sum a_i / n) \quad (1)$$

ここで、 a_i : 各吊り筋での軸力

n : 吊り筋の本数

設計時に想定した不均等係数は1.8を用いたがこれは通常の矩形ケーソンの場合に用いている標準的な値である。これに対し計測値の最大値は1.6であり、計算値が安全側であることがわかる。また吊り筋のばらつきは標準偏差のおよそ2倍以内であった。

5. 波浪時の計測

5.1 波浪状況

完成時に二重円筒ケーソンに作用する荷重は主として波力である。図-17にケーソンに到着する波浪の状況を示す。ここで押し波Ⅰは波の峰が外円筒壁正面に、また押し波Ⅱは外円筒前面部の開口部から進入した波が遊水部を通過して外円筒壁内側背後部に到達した状態、また引き波は波の谷が外円筒壁前面部にきた状態と定義される。このときケーソンの波に対する滑動安定性は押し波Ⅰで決定され、また部材の対波安全性に対しては押し波Ⅱの現象が大きく影響を及ぼす。

現地試験では各波力作用時のケーソン部材の応力状態を調べるために波高計、水圧計、鉄筋計、及びコンクリートひずみ計を設置した(その他、水圧計、速度計、土圧計、傾斜計、変位計が設置してあるがここでは述べないこととする。)。但し、現地での設計波高(H_{max})は7.9m、周期は10.5秒である。

5.2 計測方法

波浪時の計測を行なうための計器は4箇のケーソンのうちRC函と滑動試験函の2箇に設置し、前者には水圧計29台、鉄筋計12個、コンクリートひずみ計4個、また後者には水圧計34台、鉄筋計10個、コンクリートひずみ計2個を設置した。また波高計は防波堤法線延長上200m離れた箇所に設置した。この計器設置

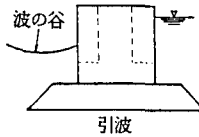
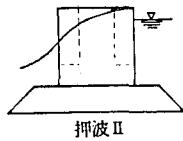
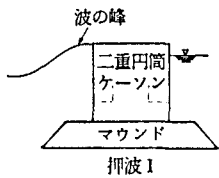


図-17 波の状況

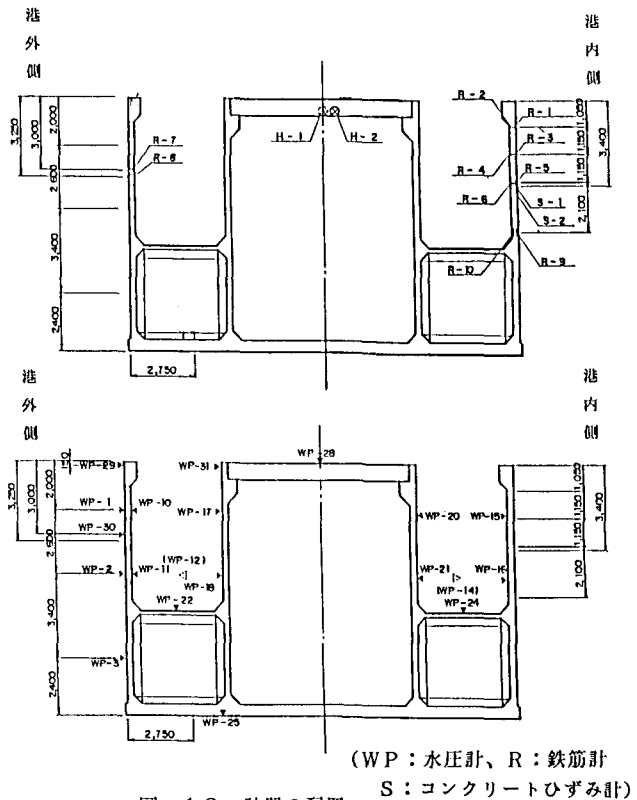


図-18 計器の配置

状況の一例を図-18に示す。これらのデータは延長海底ケーブルで陸上の観測小屋に送られ、また測定はあらかじめ設定された波高以上の波浪が来襲したときに起動し、一回に20分間連続してサンプリング周波数20 Hzで測定される仕組みである。

5.3 計測結果

1990年の測定開始から1991年2月までRC函で38回、滑動試験函で59回の測定が記録された。このうち最高波を記録しているのは1990年9月に測得されたデータで波高6.30mあった。

図-19は1990年11月に測定された滑動試験函の記録で外円筒壁前面の水圧計(WP-30)の位置での波圧とこの位置での水平方向鉄筋計の応力度の時系列を示したものである。このときの最高波は3.09m、周期は6.2秒であり最大波圧は 1.17 tf/m^2 であった。鉄筋応力度は最大で 21.3 kgf/cm^2 (計器R-8)と小さかった。鉄筋応力は波圧の作用時に対応しており位相の時間的ずれはみられなかった。また波圧作用時には鉄筋に圧縮の応力が生じており、かつ円筒壁の内側と外側とで振幅と符号が一致することから、曲げよりも面内力が卓越していることがわかる。一方、図-20は外円筒壁の背面での記録を示したものであるが、波圧計(WP-16)位置では波圧計の立ち上がり時に周期の短い波形があることからやや衝撃的な波圧が生じていたと考えられる。但し、時系列データより円筒壁は波圧に対して部材として自励振幅は生じていないことがわかる。また、この位置では面内力の引張り力が卓越しておりかつ鉄筋の応力度にも短い周期がみられた。鉄筋の応力度及びコンクリートのひずみも設計時に想定された値よりもかなり小さかった。これはコンクリートにひびわれが生じておらず全断面が有効に外力に対して抵抗していたからであると考えられる。

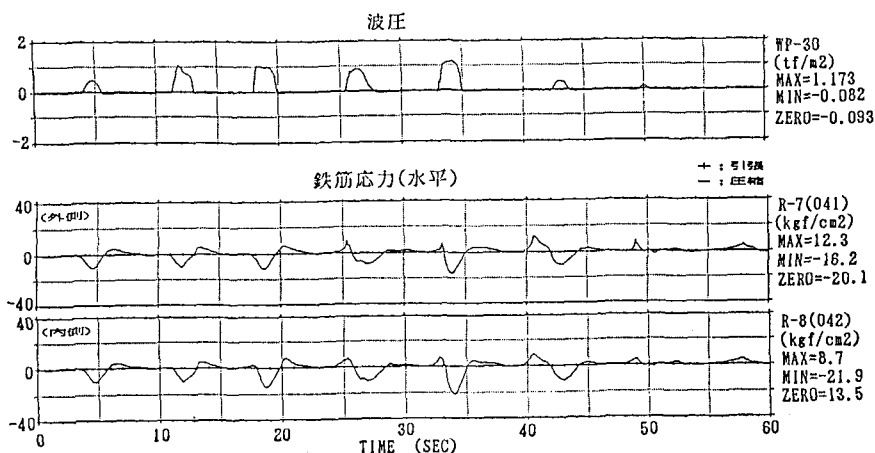


図-19 外円筒壁前面(+0.55M)の鉄筋応力作用状態

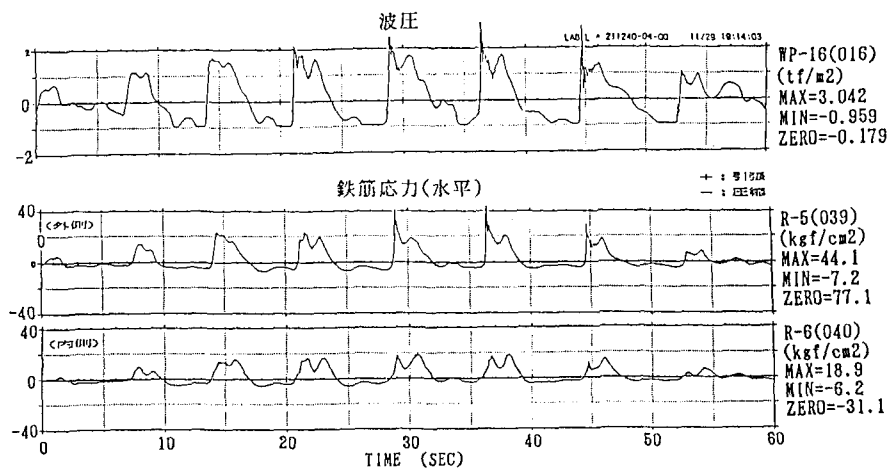


図-20 外円筒壁背面(+0.45M)の鉄筋応力作用状態

6. まとめ

今回の実証試験から得られた結論は以下のとおりである。

プレストレス導入時の計測結果に対し、

- ① 二重円筒ケーソンでは施工時の二次応力の検討が必要であるが、今回有限要素法によりプレストレスの導入手順を設定し施工したところ、有害なひびわれは発生しなかった。
- ② 現場計測によれば円筒壁にはほぼ所定のプレストレスト量が導入されたが円筒壁と底版との接合部及び鉢巻き部には所定値よりも小さな導入量となった。
- ③ 有限要素法による計算値と計測値はほぼ一致をみた。

ケーソン吊り上げ時の計測結果に対し、

- ④ 約1520tfのケーソンを32本の吊り筋を用いて起重機船で曳航沈設作業を行なったところ、各吊り筋には特に大きな偏心荷重は作用しなかった。計測された不均等係数は1.6で設計時に想定した値より幾分

小さかった。

- ⑤ 吊り上げ時に円筒壁に生じたひずみ量は、部材の計測位置により大きな差が生じた。これは開口部やせりもち部の影響と考えられる。

波浪時の計測結果に対し、

- ⑥ 波浪時の計測によると円筒壁前面では水平方向圧縮、背面では水平方向引張りの水平方向の面内軸力が卓越した。但し、円筒壁には部材の全断面有効で外力に抵抗したために鉄筋応力度は設計値よりもかなり小さかった。

- ⑦ 衝撃的な波圧が作用しても円筒壁においては波圧と鉄筋応力の波形は類似しており、外力に敏感に反応していることが分かる。但し、自励振幅は生じていなかった。

7. あとがき

二重円筒ケーソンの実証試験は、現在海上での波浪時に関する計測を継続しているところであり、これについてもデータの解析が完了した段階で再度報告したい。またデータの測得、及び解析には運輸省第三港湾建設局境港工事事務所他、多くの方々の協力を頂いた。ここに関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 谷本勝利、他5名：大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その4)二重円筒ケーソンの水理特性と試設計、港湾技研資料、No.600、1987年9月、21p
- 2) 清宮理、横田弘、白崎正弘：多数の開口を有する円筒壁の耐荷力の実験的研究、構造工学論文集、Vol.36 A、No.3、April、1990、pp.1176-1184
- 3) 清宮理、白崎正弘：2方向から面内引張り力を受けるコンクリート板の力学特性、港湾技研資料、No.632、1988年8月、29p

(1991年9月30日受付)