

同筒波浪制御構造物でのプレストレス導入の検討

清宮 理*

1. まえがき

外海からの波浪の進入から沿岸域を守るため二重円筒ケーソン堤による波浪制御構造物が開発されている。この構造物の実海域での適用性を調べるため運輸省第三港湾建設局により境港で実証試験が行われている。円筒部材には、波力により面内引張力が生じるのでプレストレスの導入が有効となる。二重円筒ケーソンは、円筒壁のほか、隔壁や中間床版などの部材で構成されている。また円筒壁には、多数の開口が存在する。このためプレストレスの導入が十分にかつ安全に行われるか、事前^{1),2)}に検討する必要がある。そこで今回有限要素法によりプレストレス導入手順と二次応力の検討を行い、現場計測により検討方法が妥当であるかを確認したので、これらの結果について述べる。

2. 二重円筒ケーソンの概要

図-1 に二重円筒ケーソンの概要を示す。本構造物は高さ 10.4 m、直径 16.2 m と 8.1 m の二重の円筒壁および床版、中間床版、4枚の隔壁で構成されている。それぞれの部材端は、剛結である。円筒壁の壁厚は 40 cm、底版の厚さは 80 cm である。外円筒壁の外海側は、波を遊水部に導くため多数の長方形の開口が設けられている。基礎マウンド上に置かれたこのケーソンは、円筒壁間の遊水部で波のエネルギーを消費する。また内円筒内には、中詰土を投入しケーソンの波浪に対する安定性を確保する。二重円筒ケーソンは、大水深域で経済的な建

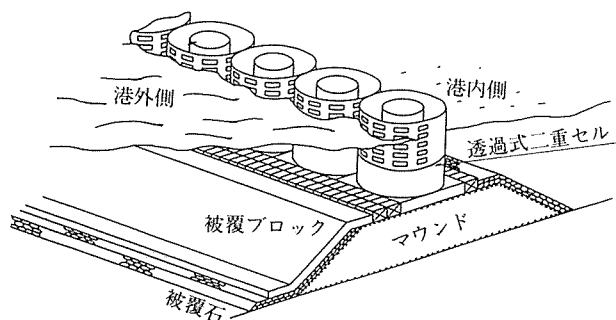


図-1 二重円筒ケーソンの概要

設が図れる有力な波浪制御構造物の一形式である。ここで紹介する事例は、境港での実証試験の例である。ケーソン本体の製作工事は、平成2年度の6月より10月にかけて行われ、同年10月に水深10.6mの現地に据え付けられた。二重円筒ケーソンは、ほかにも三重県の紀伊長島では、離岸堤として本格的な建設が始まっており、また柴山港では避難港の防波堤として採用が検討されている。また防波堤の堤頭函として2,3の計画が進行中であり、いずれも景観性や経済性の観点から採用が検討されている。このように二重円筒ケーソンの採用が次第に広まってきている。

3. プレストレス導入量の設計

3.1 構造設計法

二重円筒ケーソンの構造設計は、プレストレスコンクリート港湾構造物設計マニュアル³⁾に示される限界状態設計法により行う。荷重作用の状況は、施工時と完成時である。施工時の荷重として考慮する状況は、ケーソン吊下げ時とマウンド上への沈設時であり、それぞれの状況に対して終局限界状態と使用限界状態の設計をする。完成時では、波浪作用時が設計上支配的となる。二重円筒ケーソンに作用する波浪の状況としては、3種類の波圧強度を設定⁴⁾する。すなわち波圧強度の分布は、押し波Ⅰ、押し波Ⅱおよび引き波である。図-2に示すように、押し波Ⅰは波の峰が外円筒の前面に到着したとき、押し波Ⅱは内円筒の前面に到着したとき、引き波は波の谷が外円筒の前面に位置したときの状況を表す。それぞれの波圧強度に対して終局限界状態、使用限界状態および疲労限界状態の設計をする。終局限界状態の波浪として50年確率波（最大波高が7.9m）を設定する。荷重係数は、1.5を用いた。この値は、海外などでの事例

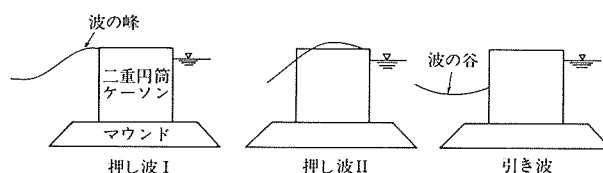


図-2 波の状況

* Osamu KIYOMIYA : 運輸省港湾技術研究所 構造強度研究室

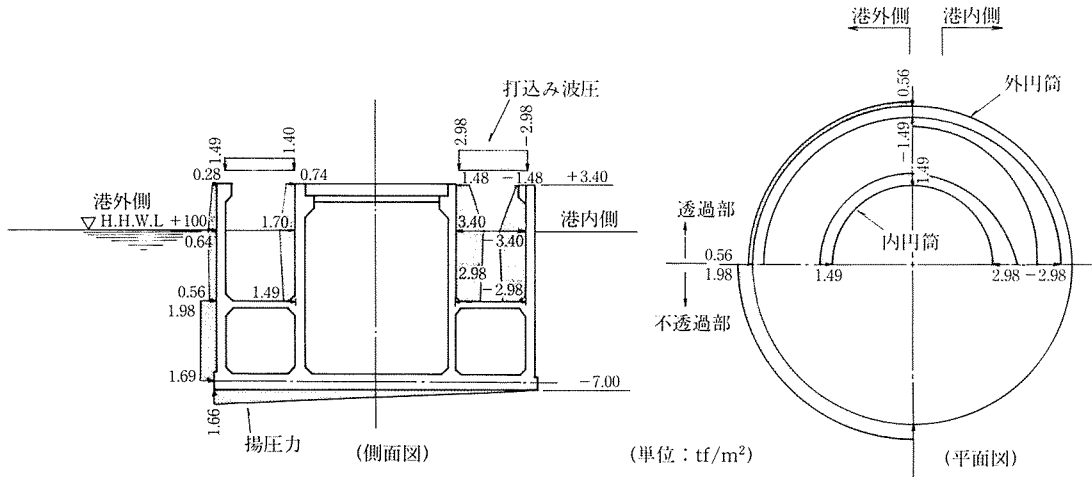


図-3 波圧強度の分布 (使用限界状態)

を参考に決めたものであるが、現在日本近海での波浪条件、構造物の設置状況などを考慮して再検討中である。使用限界状態の波浪として一年確率波高 (3.8 m) を採用する。疲労限界状態⁵⁾では50年間の累積波を用いる。このように二重円筒ケーソンの設計においては、円筒部材が波浪を直接受け、かつ最も厳しい腐食環境下にあることを配慮する。波浪時に円筒壁には、軸引張力と曲げモーメントが生じ、この断面力に対して版厚と鋼材量が設定される。とくに軸引張力に対しプレストレスを導入して使用限界状態でのひびわれの発生を抑える。境港での二重円筒ケーソンでは、有限要素法により各波浪状況に対して部材断面力の計算を行う。今回、押し波Ⅱと引き波で部材諸元が設定された。

プレストレスを導入する構造部材は、外側と内側の円筒部分であり、底版、隔壁および中間床版はRCであるため、全体としてはPC部材とRC部材との混合構造物である。ただしコンクリートの強度は、PC部材とRC部材とで同じで $\sigma_{ck}=300 \text{ kgf/cm}^2$ である。

プレストレスの導入量の設定は、前述のとおりであるが、プレストレスを導入する際の二次応力の問題が懸念される。二重円筒ケーソンは、構造が比較的単純ではあるが、中間隔壁、開口部、せりもち部 (隣り合うケーソンの衝突防止用にケーソン横に取り付けた部材)、鉢巻き部 (円筒部材頭部の補強用の部材) などの構造部材がある。このためプレストレス導入手順、導入方法によっては、導入途中に部材にひびわれを生じる可能性がある。したがって、ひびわれを生じさせないように、施工方法を検討する必要がある。このため通常行われている単純な円筒部材としてのプレストレス導入の解析では、精度良く二次応力の断面力を算定できないので、ここでは有限要素法により構造計算を行う。

3.2 有限要素解析

図-3 に使用限界状態での波圧強度の分布の一例 (押

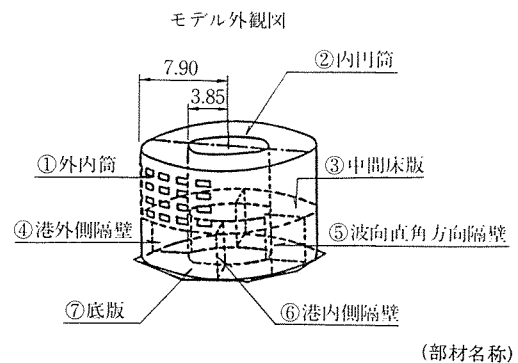
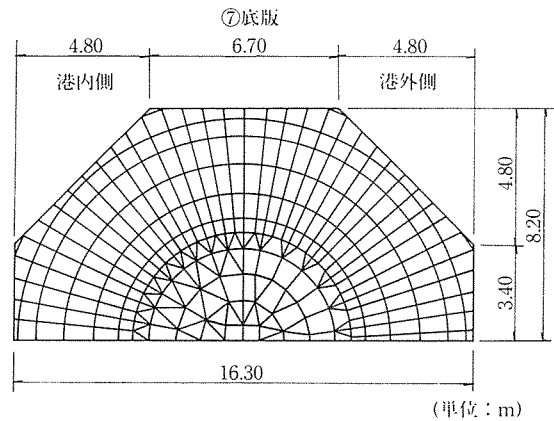
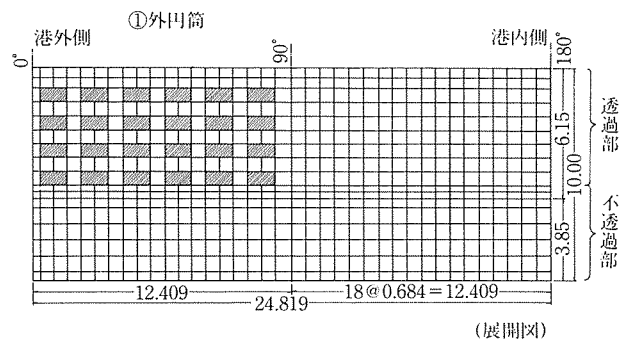
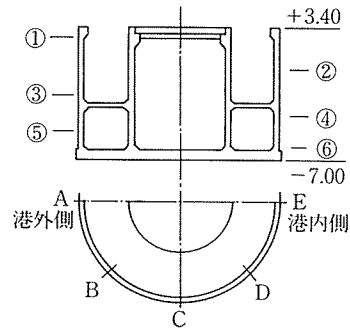


図-4 波浪時の有限要素モデル

し波Ⅱ)を示す。図-4に有限要素分割を示す。総節点数は936,総要素数は890である。図では,外円筒壁と底版のモデルのみを示してある。また外円筒壁のモデルは,円筒形状であるが,図は展開してある。表-1に断面力の計算結果を示す。押し波Ⅱのとき円周方向に22.78 tfの軸引張力と3.38 tf・mの曲げモーメントが,引き波のとき鉛直方向に1.81 tfの軸引張力と2.61 tf・mの曲げモーメントが計算された。この使用限界状態での断面力に対して引張応力がコンクリートに生じないようにプレストレスを導入する。プレストレスの導入量は,鉛直方向の場合円筒壁の上端に単位の集中荷重を,円周方向には単位の等分布荷重を要素外側よりかけて部材内の軸圧縮力を計算する。この軸圧縮力がさきほどのコンクリートの引張応力を打ち消すように荷重の大きさを設定する。この結果,プレストレスの導入量は,鉛直方向に20 kgf/cm²,円周方向に10 kgf/cm²と設定した。

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,部材の端部にコンクリートの引張強度以上の引張応力が出ない方法を模索する。すなわち,どの部材のどの方向から緊張を行うかを調べる。計算モデルを図-5に示す。このモデルでは,外円筒壁の不透過部のみを展開図で示してある。図-6に荷重条件を示す。図中の表に示す集中荷重を,円筒壁の上端と下端に鉛直方向に節点荷重としてかける。また円周方向には,面外の等分布荷重としてかける。透過部についてもほぼ同じモデルである。計算結果からプレストレスの緊張手順を外円筒鉛直方向,内円筒円周方向,外円筒円周

表-1 外円筒に生じる断面力

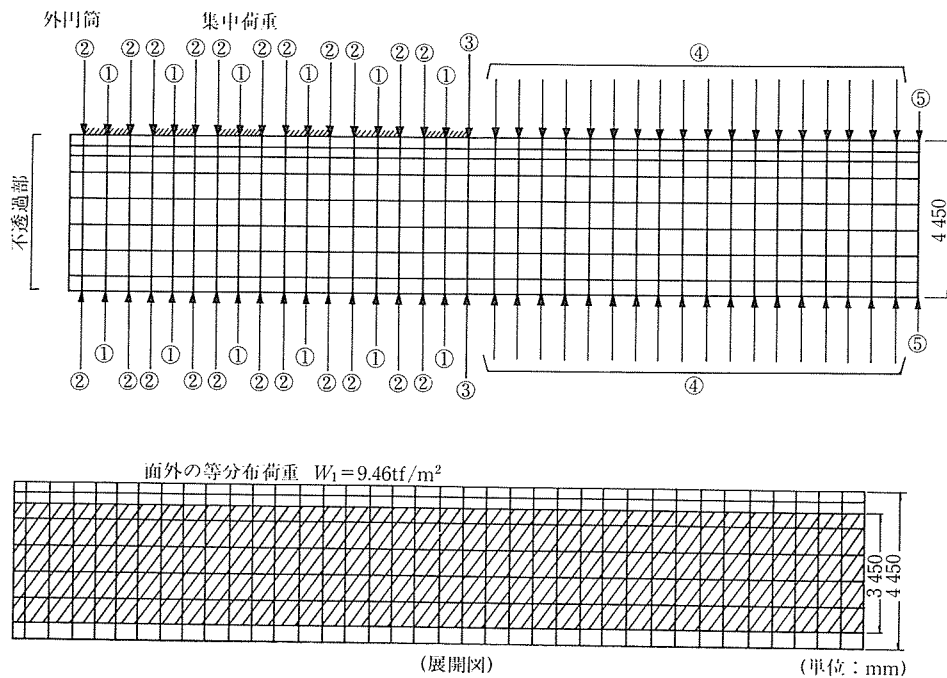


使用限界状態

	鉛直方向			円周方向		
	曲げ (tf・m)	軸力(tf)		曲げ (tf・m)	軸力(tf)	
		圧縮	引張		圧縮	引張
押し波Ⅰ	1.71 (A 3)	14.67 (B 3)	0 (-)	2.87 (1 A)	18.18 (2 A)	5.54 (5 E)
押し波Ⅱ	1.99 (E 3)	28.02 (A 3)	0 (-)	3.38 (1 C)	7.17 (2 A)	22.78 (2 E)
引張	2.61 (B 6)	20.58 (A 3)	1.81 (D 6)	0.98 (5 A)	0 (-)	16.19 (5 A)

終局限界状態

	鉛直方向			円周方向		
	曲げ (tf・m)	軸力(tf)		曲げ (tf・m)	軸力(tf)	
		圧縮	引張		圧縮	引張
押し波Ⅰ	7.38 (A 3)	27.18 (E 6)	15.11 (A 3)	15.77 (1 A)	68.76 (2 A)	8.72 (3 E)
押し波Ⅱ	8.51 (E 3)	44.52 (E 5)	30.39 (C 3)	12.77 (1 C)	26.88 (2 A)	101.57 (1 E)
引張	4.49 (B 6)	14.64 (A 6)	3.95 (D 6)	1.75 (5 A)	1.79 (1 C)	21.74 (5 C)



	節点荷重 (tf)
①	36.63
②	54.95
③	54.95
④	43.56
⑤	21.78

図-5 プレストレス導入の有限要素モデル

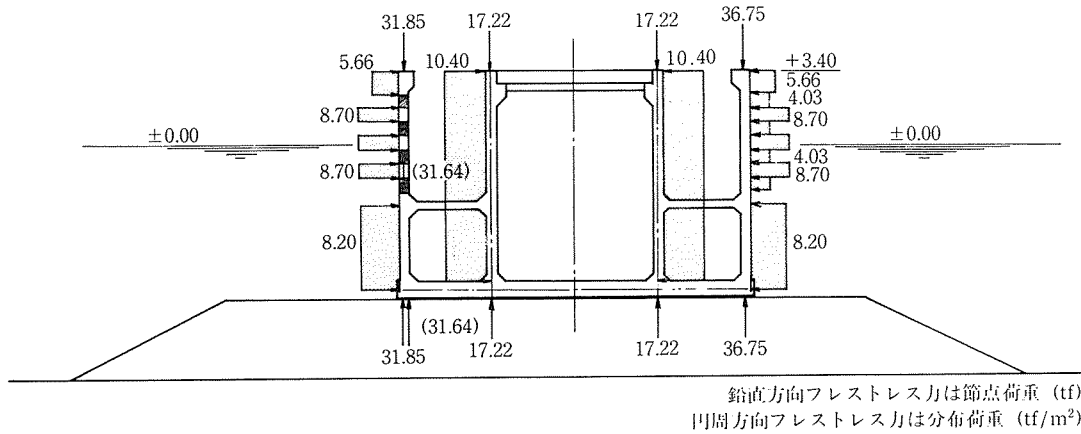


図-6 プレストレス力の荷重条件

方向、内円筒円周方向に設定した。

4. プレストレスの導入方法

4.1 PC 鋼材の配置

円筒壁の鉛直方向には PC 鋼棒 (26φ, SBPR 95/120) を、円周方向には PC 鋼より線 (1 T 21.8, SWPR 19) を使用する。PC 鋼棒は 45 箇所、PC 鋼より線は、21 箇所設置する。PC 鋼棒の 1 本当りの有効プレストレス力は約 30 tf、PC 鋼より線は約 20 tf である。PC 鋼棒は不透過部と透過部の境界でカプラーにより連結される。

今回コンクリート打設は、不透過部 (高さ 4.85 m) と透過部 (高さ 5.55 m) の 2 段階で行う。そこでプレストレス導入に際しても中間床版より下部分をまず緊張し、その後上部分を緊張する 2 段階で作業を行うこととした。

4.2 緊張方法

鉛直方向の PC 鋼棒は、底版内に定着をとり緊張端に容量 50 tf の油圧ジャッキで片引きで緊張を行った。図-7 に示すように 4 台のジャッキを 90 度ずらし 4 箇所から同時に緊張を行った。円周方向の緊張については、外

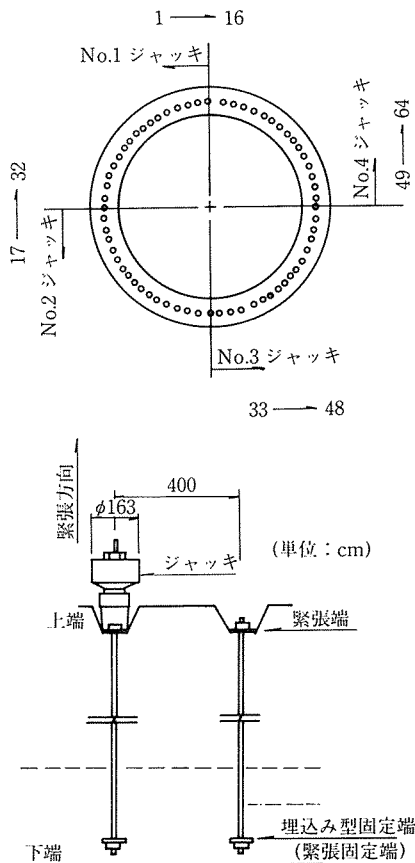


図-7 鉛直方向の緊張方法

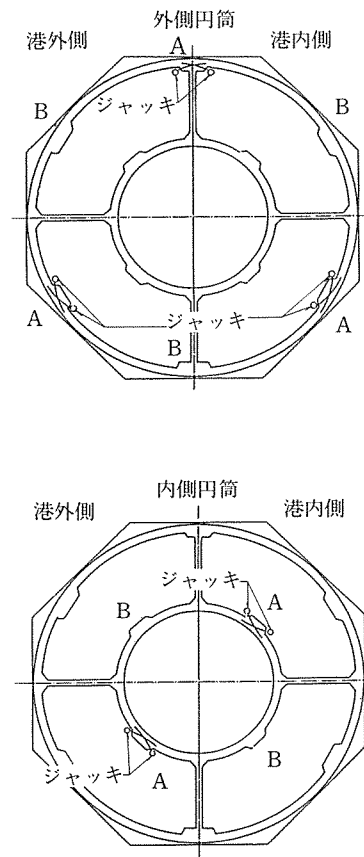


図-8 円周方向の緊張箇所

円筒では図-8に示すようにピラスターを一断面に3箇所設けて、3本のPC鋼より線に6台のジャッキを取り付け両引きで行った。緊張は、底版側から上方向に向かって最下端より一段おきに行い、次に残りを同じようには下端から上端に向かって順次行った。内円筒では、ピラスターを一断面に2箇所設けて2本のPC鋼より線であら円筒と同じように緊張した。

円筒壁の円周方向に関しては12本のPCケーブルを対象に試験緊張を行った。試験緊張より、PCケーブルとシース間の摩擦係数(μ)とPCケーブルの見かけのヤング係数(E_p)を求めた。

$$\mu = \frac{1}{\alpha + \lambda \cdot l \cdot \mu} \log \{P_a/P_b (1+\gamma)^2\} \dots (1)$$

$$E_p = \sqrt{P_a P_b \cdot l A_j / (\delta_l A_p)} \dots (2)$$

ここに、

α: ケーブルの角変化 (rad)

λ/μ: 0.0133

P_a: 緊張側ジャッキの圧力計の読み (kgf/cm²)

P_b: 固定側ジャッキの圧力計の読み (kgf/cm²)

γ: 定着具およびジャッキの摩擦損失 (2%)

l: ケーブル長 (cm)

δ_l: PCケーブルの伸び量 (cm)

A_j: ジャッキの受圧面積 (cm²)

A_p: PCケーブルの断面積 (cm²)

この結果、摩擦係数は0.242、ヤング係数は1.99×10⁶ kgf/cm²となった。

緊張後、表-2の管理値で示されるグラウトをシース内に注入した。夏期に工事を実施したので、グラウトの温度管理を慎重に行い、練りませ水を氷で冷却して管理温度値以下にした。定着用箱抜き部の跡埋めは、特に海洋環境下にあることから、構成材料として十分な耐久性を確保する必要がある。そこで図-9に示すように無収

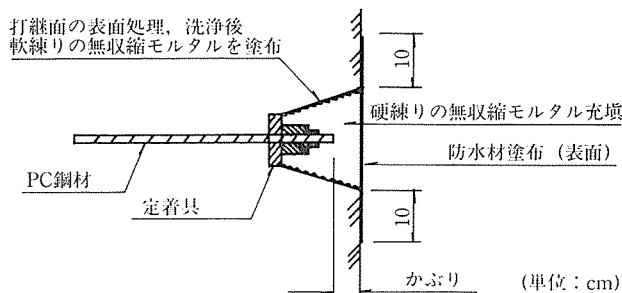


図-9 定着部の跡埋め処理

縮モルタルを箱抜き部に充填し、その上に防水剤を塗布する方法を採用した。PC鋼材のかぶりは7cm以上とした。

5. 現場計測

5.1 計測方法

緊張時に、二次応力およびプレストレスが予想どおり導入されるか調べるために、コンクリート表面にひずみゲージを貼り付け、プレストレス導入段階ごとに静的なひずみ量の計測を行った。ひずみゲージの貼付け位置を図-10に示す。測点数は、20点で各箇所に3成分のひずみゲージを貼り付けた。

5.2 測定値と計算値との比較

図-11に、底版から中間床版までの不透過部のプレストレス導入段階ごとに計算された外円筒壁のコンクリート応力度を示す。この計算結果は、外円筒壁の港外側での鉛直方向分布の値を示しており、鉛直方向にプレストレスを導入したときに鉛直方向に約15 kgf/cm²、円周

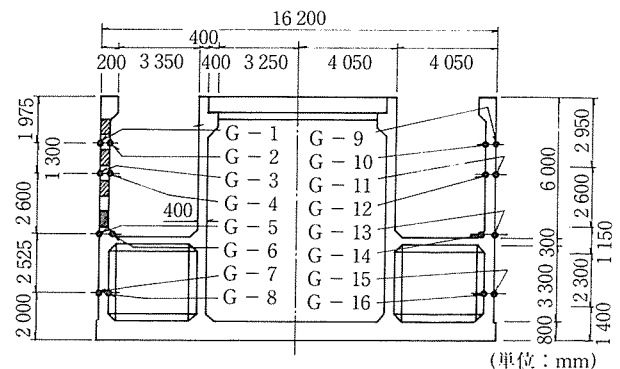


図-10 ひずみゲージの位置

①鉛直方向の導入 ②円周方向の導入 ③最終段階

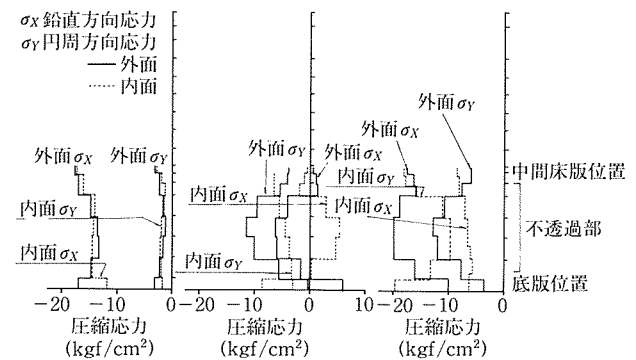


図-11 有限要素法による不透過部での導入応力

表-2 グラウト管理基準値

コンシステンシー 流下時間 (秒)	膨張率 (%)	塩化物含有量 (Cl-重量換算) (kgf/m ³)	ブリー ジング率 (%)	W/C (%)	圧縮強度 σ ₂₈ (kgf/cm ²)	グラウト 温度 (°C)
(JAルート法) 15~30	5~10	0.3以下	1以下	40以下	200以上	10~30

◇研究報告◇

方向に約 2 kgf/cm² の圧縮応力度が計算された。部材内では、ほぼ軸応力度が卓越し、曲げ応力度は底版と円筒壁の接合部に若干出ているもののほとんど生じていなかった。計算では円周方向のみプレストレスを導入したとき、円筒壁中央部では円周方向に約 7 kgf/cm² の圧縮応力度と約 2 kgf/cm² の曲げ応力度が計算され、コンクリートに引張応力度が生じた。また円筒壁と底版との接合部付近にも引張応力度が生じた。円周方向と鉛直方向を合成すると部材内に引張応力度は計算されず、全断面圧縮域となった。この結果、鉛直方向より先にプレ

ストレスを導入するのが良いと判断した。ただし、導入されるプレストレス量は、円筒壁外側の方が内側より大きかった。

図-12 に透過部にプレストレスを導入したときの計算値と測定値との比較を示す。開口のある港外側では、開口の影響で鉛直方向には、プレストレスはほとんど導入されていない。円周方向のみ所定のプレストレス量が導入されており、測定値と計算値とがほぼ一致していた。図-13 に開口の無い港内側での両者の比較を示すが、傾向が良く一致していた。

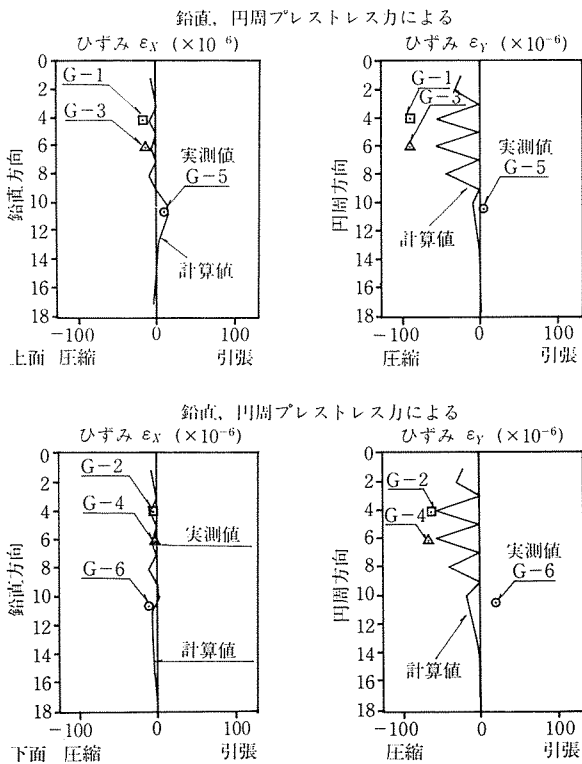


図-12 港外側（開口側）のプレストレス量の比較

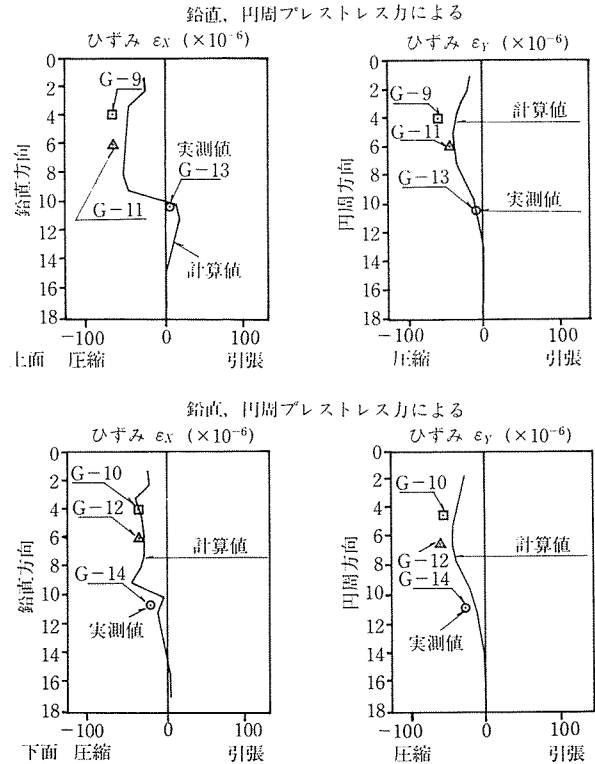


図-13 港内側のプレストレス量の比較

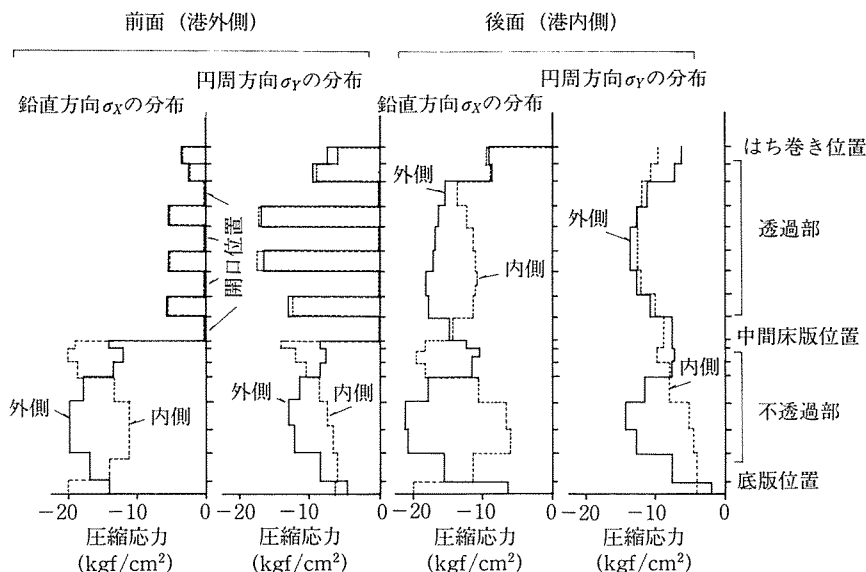


図-14 有限要素法によるプレストレス導入量の最終状態

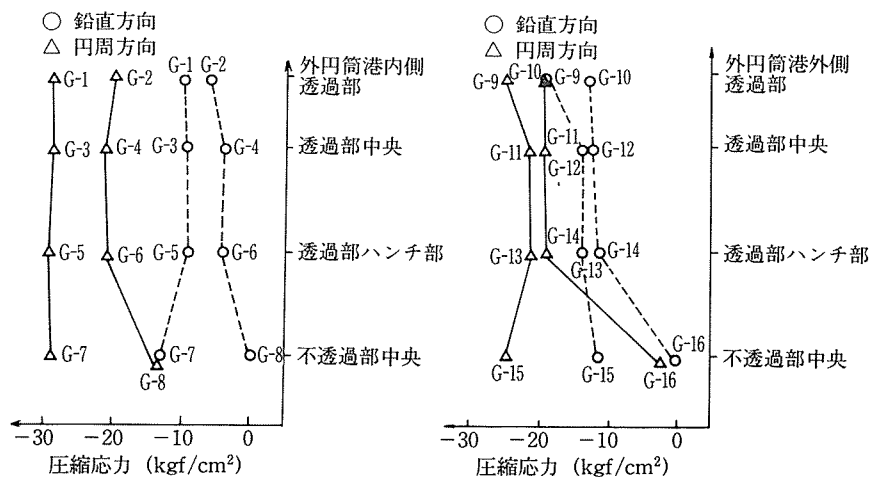


図-15 実測によるプレストレス導入量の最終状態

図-14 に最終段階での鉛直方向と円周方向のプレストレス導入量の計算値を港外側（開口のある側）と港内側について示す。図-15 に最終段階でのプレストレス導入量の測定値を示す。港内側では、測定値と計算値での応力の状況は、ほぼ一致した。港外側では、測定値の方が、計算値よりもやや大きなプレストレスが導入されていた。ただし港外側では、円周方向に予定どおりプレストレスが導入されたが、鉛直方向では、開口の影響で梁部分にはプレストレスが導入されていない。一方、港内側では、鉛直方向、円周方向ともに予定どおりプレストレスが導入された。ただし円筒壁上端の鉢巻き部と底版との接合部近傍では、プレストレス量は中央部より小さかった。このように有限要素法により複雑な構造物に対するプレストレス導入量と二次応力の検討が行えるとともに、プレストレス導入に関しても今回の二重円筒ケーソンでは、ほぼ満足のいく結果を得られた。

6. 結 論

得られた主要な結論は以下のとおりである。

- ① 二重円筒ケーソンは幾つかの構造部材で構成されており、円筒部のみにプレストレスを導入する場合、施工中にコンクリートにひびわれが生じないように、二次応力の検討が不可欠である。有限要素法解析により、この二次応力の検討を行い、プレストレスの導入手順を検討した結果、初めに鉛直方向にプレストレスを導入し次に円周方向に導入するのが良いことがわかった。
- ② 施工中にコンクリートひずみの計測を行ったとこ

ろ、ほぼ所定のプレストレス量が円筒部材に導入されたことが確認できた。またコンクリートにひびわれを与える有害な二次応力もほとんど生じなかった。ただし底版と円筒壁の接合部と鉢巻き部近傍は、予定より小さなプレストレス導入量となった。

③ 施工段階ごとに、有限要素法による計算値と測定値の比較を行ったところ、両者のひずみの状況はほぼ一致していた。

あ と が き

二重円筒ケーソンの製作および現地観測は、第三港湾建設局境港工事事務所で実施している。データの取得に労を取られた関係各位、またデータの取りまとめに際して協力を頂いた（社）プレストレスコンクリート技術協会の森下昭吾氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 清宮 理, 森下昭吾, 古賀尚宏, 岡島武博: 多孔を有するPC円筒波浪制御構造物の耐荷力, プレストレスコンクリート, Vol. 32, No. 1, Jan., 1990
- 2) 清宮 理, 白崎正浩, 横田 弘: 多数の開口を有するコンクリート円筒壁の力学特性, 港湾技研資料, No. 690, Dec., 1990
- 3) 運輸省港湾局: プレストレスコンクリート港湾構造物設計マニュアル, 昭和62年, 3月
- 4) 谷本勝利, 下迫健一郎: 大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(5), 二重円筒ケーソンの水理特性と設計波力, 港湾技研資料, No. 637, 1988, 12
- 5) 清宮 理, 本多宗隆: 周波数がコンクリートの引張強度に及ぼす影響, 構造工学論文集, 1991年4月, Vol. 37

【1991年6月24日受付】