

# 港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 600 Sept. 1987

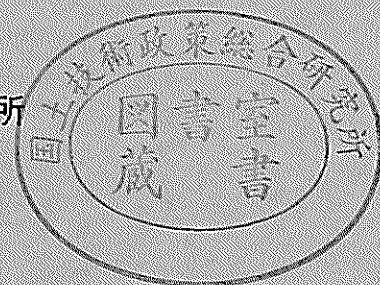
大水深波浪制御構造物に関する水工的研究 (その4)  
—二重円筒ケーソン(海底設置型)の水理特性と試設計—

谷	本	勝	利
片	岡	眞	二
原	中	祐	人
鈴	木	慎	也
下	迫	健	一
宮	崎	啓	郎

付録 港湾技研資料目録 (No.501~600)

企 画 室

運輸省港湾技術研究所



# 目 次

要 旨 .....	3
1. ま え が き .....	3
2. 実験の概要 .....	4
2.1 対象とした構造 .....	4
2.2 実験の方法と条件 .....	4
3. 反射・伝達波特性 .....	5
3.1 開口率とエネルギー消費率 .....	5
3.2 有義波高の反射および伝達率 .....	5
3.3 伝達波のスペクトルと有義波周期の変化 .....	6
4. 波 力 特 性 .....	7
4.1 円筒部に働く波力 .....	7
4.2 基部ケーソン前面に働く波圧 .....	8
4.3 二重円筒ケーソン全体に働く波力 .....	9
5. 設計波力の算定法 .....	9
6. 試 設 計 .....	11
6.1 試設計の条件 .....	11
6.2 基本断面および計算結果 .....	11
6.3 施工法の検討 .....	15
6.4 今後の課題 .....	18
7. む す び .....	20
参 考 文 献 .....	20
記 号 一 覧 .....	21
付 録 港湾技研資料目録 (No.501~600).....	23

**Hydraulic Characteristics and Design Wave Forces of  
Double-cylindrical Caisson**  
— A Study on Development of Deep-water Breakwater (Part 4) —

Katsutoshi TANIMOTO\*  
Shinji KATAOKA\*\*  
Suketo HARANAKA\*\*\*  
Shinya SUZUKI\*\*\*\*  
Kenichirou SHIMOSAKO\*\*\*\*\*  
Keiji MIYAZAKI\*\*\*\*\*

**Synopsis**

Random wave experiments have been carried out to investigate hydraulic characteristics of a double-cylindrical caisson breakwater, which was selected as a reasonable structure in the rough deep sea. In this note, the calculation method of design wave forces and the results of trial design are presented as well as the description of general characteristics of wave reflection, transmission and wave force.

The structure tested in the experiments is a caisson of double vertical cylinders fixed on a rectangular base caisson. The upper section of outer cylinder having a number of opening is permeable for one third of the total height and forms a wave chamber of doughnut shape bounded by the impermeable inner cylinder. The different opening ratios of the permeable outer wall can be selected appropriately for the fore and rear sides, which are denoted as  $\epsilon_f$  and  $\epsilon_r$  respectively. An extreme caisson with  $\epsilon_r=0$  is called as a wave dissipating type in contrast with the permeable type for which the both sides of fore and rear are permeable. High energy dissipation is achieved for the permeable type with  $\epsilon_f=0.25$ ,  $\epsilon_r=0.10$  and the wave dissipating type with  $\epsilon_f=0.25$ . The rate of energy dissipation is 60~70% for the permeable type and 65~75% for the wave dissipating type.

The proposed calculation method of design wave forces gives the distribution of wave pressure modified from the intensity predicted by Goda's formula for an ordinary vertical wall. The modification factors for all structural elements are presented for two phases around wave crest when the wave pressure at the outer face of caisson is predominant and when the wave pressure in the wave chamber is predominant. On the other hand, the negative wave pressure at the wave trough can be obtained appropriately according to the fourth order approximation theory of finite standing wave. The residual water level in the wave chamber, however, must be given separately from the theory.

The trial design is made for the depth of 50 m. For the design significant wave height of 9 m, the PC-caisson having the outer cylinder of 40 m in the diameter is stable against sliding with safety factor of 1.2, if 35% of total volume excluding the wave chamber is filled by sand.

---

\* Chief of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division  
\*\* Former Chief of Design Standard Laboratory, Design Standard Division  
\*\*\* Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division  
\*\*\*\* Senior Research Engineer, Design Standard Division  
\*\*\*\*\* Member of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division

# 大水深波浪制御構造物に関する水工的研究 (その4) —— 二重ケーソン (海底設置型) の水理特性と試設計 ——

谷 本 勝 利 \*  
片 岡 眞 二 \*\*  
原 中 祐 人 \*\*\*  
鈴 木 慎 也 \*\*\*\*  
下 迫 健 一 郎 \*\*\*\*\*  
宮 崎 啓 司 \*\*\*\*\*

## 要 旨

外海大水深域における合理的な波浪制御構造物として選定した二重円筒ケーソンについて、不規則波実験により反射・伝達波および波力特性を明らかにし、設計波力の算定法を提案するとともに、試設計を行って実用化への問題点などを検討した。

対象とした構造は、基部く形ケーソンの上を二重円筒構造とし、かつ外側円筒壁の上方部分（全高の1/3）に適当な孔を開けて透過性にして、不透過な内側円筒との間をドーナツ状の遊水室としたもので、海底に直接設置する形式である。透過円筒部は前半分と後半分の開口率（それぞれ $\epsilon_f$ 、 $\epsilon_r$ と表記）を任意に選択可能で、前後ともに孔の開いている構造を透過型、後半分を不透過としたものを消波型と呼ぶ。透過型は $\epsilon_f=0.25$ 、 $\epsilon_r=0.10$ 、消波型は $\epsilon_f=0.25$ の場合、エネルギー消費率はそれぞれ60～70%、65～75%と高い。

提案した設計波力の算定法は波の峰に対応する正の波力については通常直立壁に働く合田式による波圧を適当に修正して分布させるもので、外側での波圧が卓越する位相および遊水室内部での波圧が卓越する位相の2種の分布に対し、各構造要素ごとの波圧の修正係数を与えた。一方、波の谷のときの負の波力は第4次近似有限振幅重複波理論により求めることができる。ただし、遊水室内の残留水位を別に考慮する必要がある。

試設計は水深50mを対象としたもので、設計有義波高9.0mに対し、外側円筒の直径が40mのPCケーソンの場合は遊水部を除く全容積の35%の中詰めで滑動安全率1.2を確保できる。

## 1. まえがき

外海海洋空間の有効利用のためには、巨大な波浪を制御して適度に静穏な海域を造成する技術が重要であり、そのための構造物を波浪制御構造物と呼んでいる。

この大水深波浪制御構造物について、筆者らは新しい合理的な構造を開発すべく、昭和57年度から研究を進めてきた。すなわち、その第一段階の研究では、3種の海

底設置型の透過性構造物（水平板付立体骨組構造、上半円形断面構造、透過壁式二重セル構造）の水理特性を模型実験によって概略明らかにするとともに<sup>1),2)</sup>、同一条件下で試設計を行って、施工性や経済性を比較した<sup>3)</sup>。

これに続く第二段階の研究では、第一段階の研究で有望であった透過壁式二重セル構造を対象を絞って、構造的には外側内筒の後半分を不透過とした構造を加え、さ

\* 水 工 部 防波堤研究室長  
\*\* 前設計基準部 設計基準研究室長（第二港湾建設局）  
\*\*\* 水 工 部 主任研究官（水理計測担当）  
\*\*\*\* 設計基準部 主任研究官（特殊設計担当）  
\*\*\*\*\* 水 工 部 防波堤研究室

らに一般的に水理特性を明らかにするための実験を行った。本資料は、本構造を二重円筒ケーソンと称し、主に第2段階での実験に基づき反射・伝達波および波力特性をまとめるとともに、提案した設計波力の算定法や試設計の結果を示すものである。

## 2. 実験の概要

### 2.1 対象とした構造

研究の対象とした構造は、図-1に示しているように、基部ケーソンの上を二重円筒構造とし、かつ外側円筒壁の上方部分に適当な孔を開けて透過性にして、不透過な内側円筒との間をドーナツ状の遊水室としたものである。

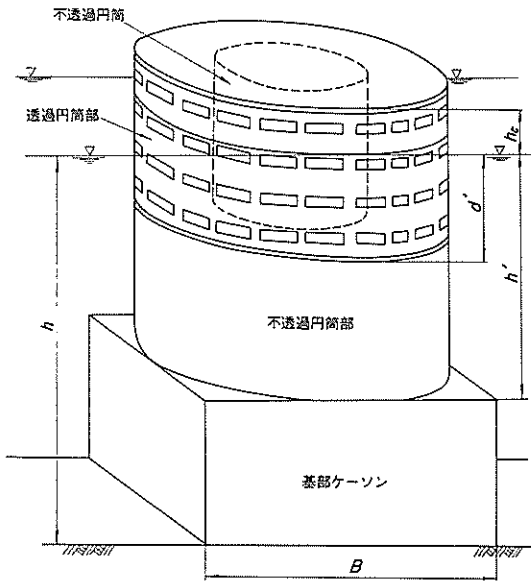


図-1 二重円筒ケーソン

外壁に孔の開いている上方部分を透過円筒部、孔の開いていない下方部分を不透過円筒部と呼ぶ。透過円筒部は前半分(波の入射側)と後半分の開口率(それぞれ  $\epsilon_f$ ,  $\epsilon_r$  と表記)を任意に選択可能で、前後ともに孔の開いている構造を透過型、後半分を不透過( $\epsilon_r = 0$ )とした構造を消波型と呼ぶ。こうした構造を、一般の防波堤であれば、捨石マウンドの上に据え付けるのが通常であるが、本研究では海底に直接設置する形式を対象とした。しかし、実際の適用ではマウンドを設けることも十分考えられる。図中、 $h$  は水深、 $h'$  は基部ケーソン上面すなわち円筒部下端の深さ、 $d'$  は透過円筒部下端の深さ、 $h_c$  は静水面上天端高さを表し、 $B$  は基部ケーソンの幅で、この場合外側円筒壁の直径に等しい。

### 2.2 実験の方法と条件

#### (1) 実験水路と模型

実験は幅 1.0m、深さ 1.5m、長さ 163m の長水路で行った。二重円筒ケーソンの模型は基本的には第一段階(以後、前回という)の波力実験<sup>2)</sup> で用いたものと同じである。すなわち、円筒部がアクリルおよび塩化ビニール製、基部ケーソンが鋼製で、外側、内側円筒の直径はそれぞれ 98cm、50cm、高さは基部ケーソン、不透過円筒部、透過円筒部いずれも 50cm、全高が 150cm のものである。水深  $h$  は 125cm で一定としたので、 $h' = 75$ cm、 $d' = 25$ cm、 $h_c = 25$ cm とする。

#### (2) 反射・伝達波実験

実施した実験の種類は反射・伝達波実験と波力実験に大別される。このうち、反射・伝達波実験では前回での実験<sup>1)</sup> が前後の開口率を同じとした透過型 ( $\epsilon_f = \epsilon_r = 0.10, 0.25, 0.40$ ) のみであったのに対し、今回は前後の開口率を 0~0.4 の範囲で適当に組み合わせた 6 種を対象とした。実験波は前回とほぼ同じで、有義波周期  $T_{1/3}$  が 1.27~2.84s (相対水深  $h/L_{1/3}$  が 0.14~0.50) の 5 種類の不規則波である。波高レベルは有義波高  $H_{1/3}$  が 22cm までの範囲でそれぞれの周期条件ごとに 3 種に変化させた。いずれも各条件ごとに 200~250 波程度の波群を 3 種用意し、実験結果はこれらの 3 波群による結果の平均値で整理するのを原則とした。

#### (3) 波力実験

波力実験は小型波圧計による局部的強度と全波力測定装置による全波力を同時に測定したものである。構造条件は前回は  $\epsilon_f = \epsilon_r = 0.25$  の透過型 1 種であったのに対し、今回は  $\epsilon_f$  を 0.25 に固定し、 $\epsilon_r$  を 0, 0.10, 0.25 に変化させた 3 種と、比較のために加えた  $\epsilon_f = \epsilon_r = 0$  の不透過型の合計 4 種を対象とした。全波力測定装置は基部ケーソンの中に 4 個の 2 分力検出器を設置して、これに円筒部の模型を固定したもので、円筒部に働く波力の水平・鉛直成分を測定することができる。詳細は文献 2) を参照されたい。ただし、局部的強度については、今回は基部ケーソンに働く波圧のみに測定を限っている。実験波は前回は規則波であったのに対し、今回は相対水深  $h/L_{1/3}$  が 0.140, 0.179, 0.234 の 3 種の不規則波(波高レベルは 3 種)である。

#### (4) 多重反射による波高増大率

不規則波実験では波を長時間連続して作用させるため、造波板からの再反射波の影響が問題となる<sup>4)</sup>。これについては、200~250 波の波を繰り返して連続して造波し、造波板と模型との間で形成される多重反射系が十分定常となるのを待って、有効な波数の時間だけ測定する方法

をとった。したがって、この状態での構造物への入射波高は模型を設置しない状態で測定した通過波高とは一般に異なる。そのため、波力と同時に測定した構造物前方約9m地点での波形から多重反射系での分離入射波高を求め、次式で定義した波高増幅率 $\phi$ を通過波高に乗じることによって、構造物への入射波高（最高波高、1/10最大波高、有義波高など）を与えた。

$$\phi = H'_{1/3} / H_{1/3} \quad (1)$$

ここに、 $H'_{1/3}$ は構造物設置後の分離入射有義波高、 $H_{1/3}$ は構造物設置以前での同じ造波信号による発生波の通過有義波高である。図-2はこの波高増幅率を、横軸に反射率 $K_R$ をとってプロットしたものである。 $\phi$ の値は反射率が大きいほど、また周期が長いほど大きくなる傾向があるが、本条件の場合最大でも1.3程度である。

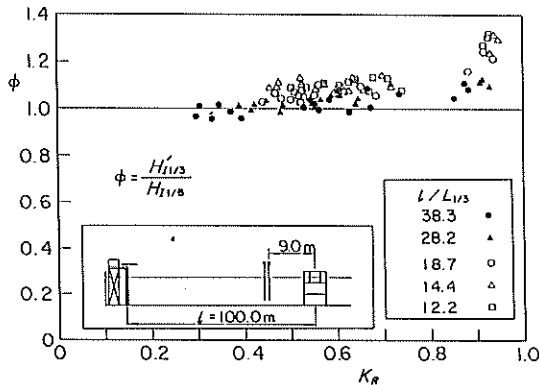


図-2 多重反射による波高の増幅率

### 3. 反射・伝達波特性

#### 3.1 開口率とエネルギー消費率

二重円筒ケーソンの不規則波による反射・伝達波の特性を明らかにした。図-3は前回および今回実験を行った全構造条件別のエネルギー消費率 $K_{Loss}$ を、横軸に有義波長に対するケーソンの相対幅 $B/L_{1/3}$ をとって、入射波の波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ が0.024の条件に対し例示したものである。 $K_{Loss}$ は次式で定義される。

$$K_{Loss} = 1 - K_R^2 - K_T^2 \quad (2)$$

ここに、 $K_R$ 、 $K_T$ は有義波高の反射率および伝達率を表す。ただし、本実験では入射有義波高に対する相対天端高 $h_e/H_{1/3}$ は1.14以上で高く、伝達率は不透過型や消波型では0に近く、また透過型では透過部を通過するエネルギーによる伝達率を表していると考えてよい。

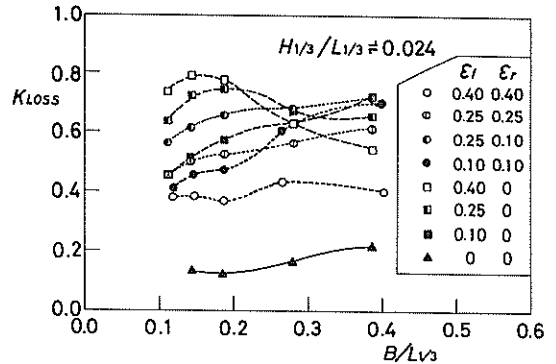


図-3 各種構造（開口率）のエネルギー消費率

この結果によると、 $\epsilon_f = \epsilon_r = 0$ の不透過型のエネルギー消費率は20%以下と低く、反射性構造物であることが確認できる。これに対し、消波型や透過型のエネルギー消費率は開口率によって大きく変化するが、適切な開口率を選定することによって、相当程度のエネルギー消費が期待できる。これらのうち、 $\epsilon_r = 0$ の消波型については、 $\epsilon_f = 0.10, 0.25, 0.40$ の3種の結果が示してあるけれども、周期の長い( $B/L_{1/3}$ の値が小さい)条件では開口率の大きいほうが、短い条件では小さいほうが、それぞれエネルギー消費率が高い傾向にある。全体的にみれば、 $\epsilon_f = 0.25$ の条件で、消費率は65~75%と高く、この程度の開口率とするのがよいといえる。ただし、この開口率は透過円筒部の前半分の展開面積に対する開口部の総面積の比率で定義したもので、全高の2/3は不透過であるから、構造物全体に対する開口率としては0.083となる。

一方、透過型については $\epsilon_f$ と $\epsilon_r$ の4種の組み合わせに対する結果を示してある。これらのうちでは、 $\epsilon_f = 0.25$ 、 $\epsilon_r = 0.10$ の組み合わせのエネルギー消費率が60~70%と高い。

#### 3.2 有義波高の反射および伝達率

$\epsilon_f = 0.25$ の消波型、 $\epsilon_f = 0.25$ 、 $\epsilon_r = 0.10$ の透過型について、有義波高の反射および伝達率を示す。図-4はそのうち消波型の反射率を示したものである。図中、マウンド有りとなるのは、基部ケーソンの代わりに同じ高さの捨石マウンドを設け、その上に円筒ケーソンを据え付けたものである。マウンド無しすなわち基部ケーソンの場合、反射率 $K_R$ は0.45~0.65程度である。マウンドを設けた場合には特に周期の長い条件で反射率がやや小さくなる傾向にあり、極小反射率は0.4程度となる。伝達率は前述したように本条件では小さく、結果を示していない。

図-5, 6は透過型の反射および伝達率である。この場合、周期が短い ( $B/L_{1/3}$  が大きい) ほど反射率は小さく、伝達率は大きくなる傾向にある。消波型の場合と同様に、基部ケーソンの代わりに捨石マウンドを設けた形式での結果を合わせて示してあるが、周期の長い条件下で反射率はやや小さく、伝達率はやや大きくなる傾向にある。

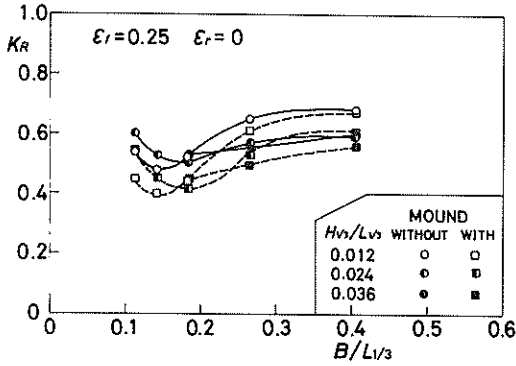


図-4 消波型の反射率

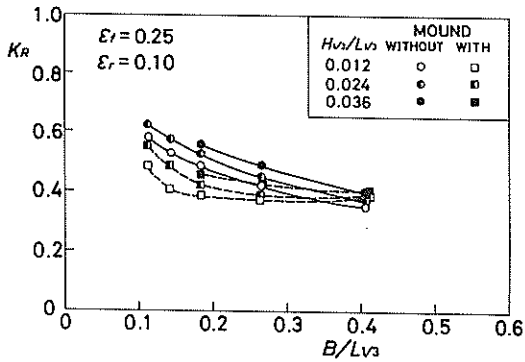


図-5 透過型の反射率

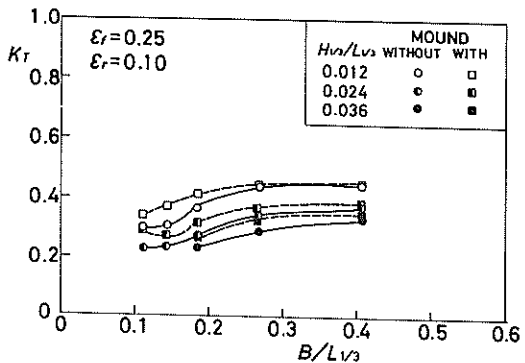


図-6 透過型の伝達率

### 3.3 伝達波のスペクトルと有義波周期の変化

波浪制御構造物としては波高の伝達率ばかりでなく、スペクトルの変化、周期の変化なども重要である。図-7は  $\epsilon_r = 0.25$ ,  $\epsilon_r = 0.10$  の透過型に  $H_{1/3}/L_{1/3} = 0.036$  の入射波が作用したときの前面における入射波の合成スペクトル、分離入射波のスペクトルおよび背後伝達波のスペクトルを例示したものである。ただし、横軸はケーソン幅  $B$  を成分波の周波数に相当する波長  $L'$  で割った無次元値で、図中の  $K_T'$  は次式で定義される成分波の伝達率である。

$$K_T'(f) = \{ S_T(f) / S_i(f) \}^{1/2} \quad (3)$$

ここに、 $f$  は周波数、 $S_T(f)$  は伝達波のスペクトル密度、 $S_i(f)$  は入射波のスペクトル密度である。つまり、入射波のスペクトルに  $K_T'(f)$  の2乗を乗じれば伝達波のスペクトルを求めることができる。図-8はその  $K_T'$  をさらに有義波高の伝達率  $K_T$  で割った値を、横軸に  $B/L'(f)$  をとって、まとめて示したものである ( $\epsilon_r = 0.25$ ,  $\epsilon_r = 0.10$  の透過型)。  $K_T'$  は0.6から2程度の範囲にばらついているけれども、それぞれの入射波スペクトルのピーク周波数付近に対してはほぼ1.0で一定とみなしても大差ない。すなわち、透過型の伝達波のスペクトルの主要部分は入射波のスペクトル全体に  $K_T^2$  を乗じることによって求めてよいといえる。

一方、図-9は入射波の有義波周期  $T_{1/3}$  に対する伝達波の有義波周期  $T_{T1/3}$  の比を示したものである。伝達波の有義波周期は入射波の周期の0.9~1.05倍程度で、波

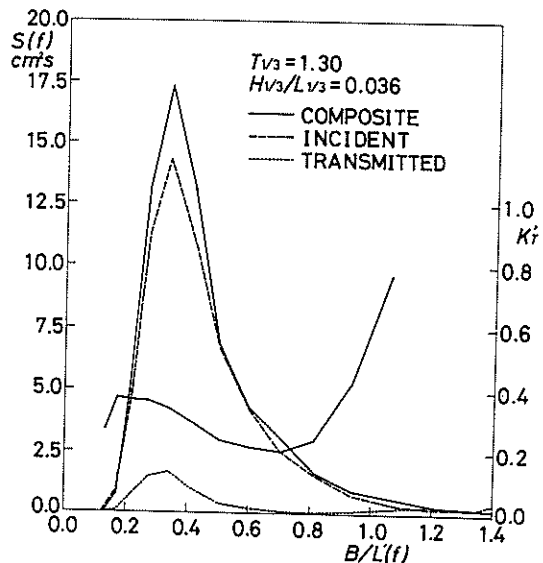


図-7 スペクトルの例

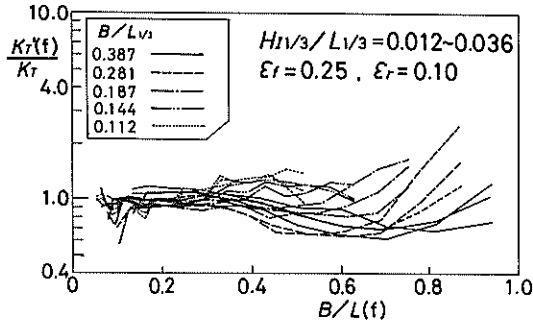


図-8 透過型の成分波伝達率

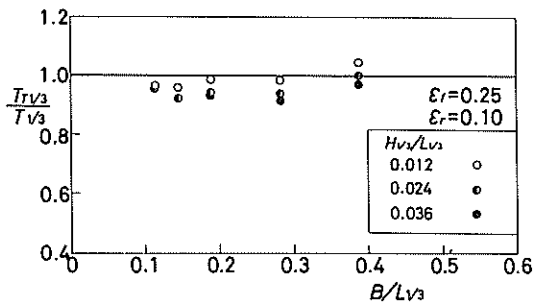


図-9 伝達波の有義波周期

高が小さいほど、また周期が短いほどやや長くなる傾向にある。

## 4. 波力特性

### 4.1 円筒部に働く波力

#### (1) 水平波力の頻度分布

二重円筒ケーソンに働く不規則波力の特性を明らかにした。図-10～12は基部ケーソンを除いた円筒部に働く水平波力の1波ごとの正(押す方向)および負のピーク値の頻度分布を確率密度の形で示したものである。ただし、水平波力は投影面積( $h' + h_c$ ) $B$ で割った平均波力強度 $f_H'$ をさらに $w_0 H_{1/3}$ で割って無次元化している。ここに、 $w_0$ は水の単位体積重量である。 $T_{1/3} = 2.35s$ ,  $H_{1/3} = 18.8 \sim 21.0cm$ の入射波が作用したときの例で、順に透過型、消波型、不透過型に対応する。図中に波高と同様に定義した1/10最大波力強度( $f_{H'1/10}$ ), 1/3最大波力強度( $f_{H'1/3}$ )の無次元値も示してある。正負のピーク値をそれぞれ+, -を上付けして区別しており、負の値は絶対値である。また、最大値( $f_{H'max}$ )は3波群の平均値をとると、透過型、消波型、不透過型の正の無次元値( $w_0 H_{1/3}$ で割った値)でそれぞれ0.62, 0.92, 0.91, 負の無次元値でそれぞれ0.71, 0.76, 0.80となる。こ

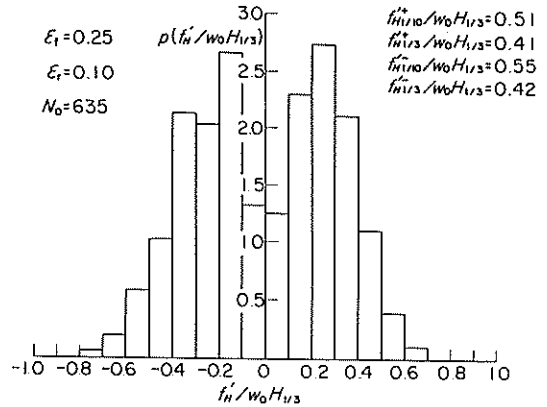


図-10 水平波力の頻度分布(透過型)

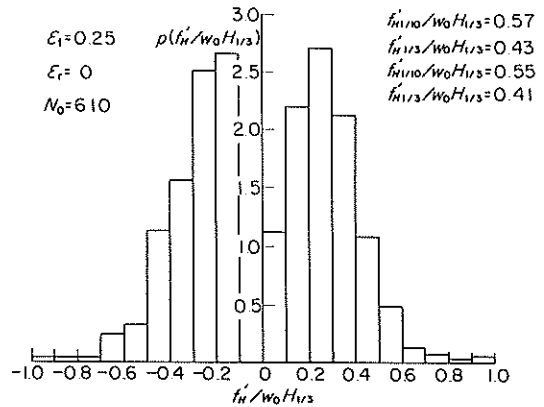


図-11 水平波力の頻度分布(消波型)

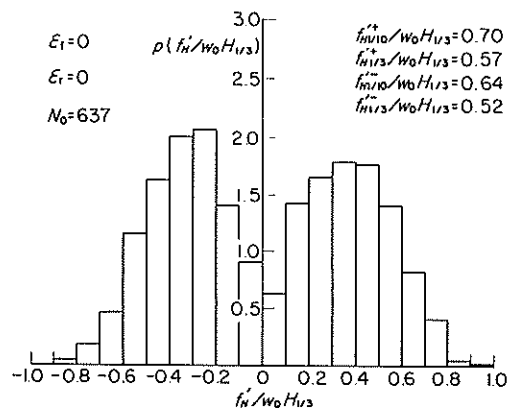


図-12 水平波力の頻度分布(不透過型)

れから特に透過型の波力が不透過型の波力に比べて小さくなるのがわかる。消波型も全体には小さくなるが、正の最大値はこの例の場合不透過型と変わらない。



## (2) 波高と水平波力の関係

図-13は円筒部に働く水平平均波力強度  $f_H'$  の代表値をそれぞれ対応する代表波高に対しプロットしたものである。また、図中の実線は同じ高さの直立壁に働く波力の計算値から求めた値で、正については後述の合田式、負については第4次近似有限振幅重複波理論<sup>5)</sup>を用いた。破線は後述する透過型、消波型の設計波力の算定法による計算値である。合田式や有限振幅重複波理論による計算値は不透過型に対応するものであるが、正の波高の大きい条件を除いていずれも実験値によく合っている。つまり、本実験で対象としているような大水深での不透過な円筒列に働く波力は通常の直立壁に働く波力算定式でほぼ推定できることが確認できる。ただし、正の波高の大きい条件では実験値がやや小さくなる傾向にある。

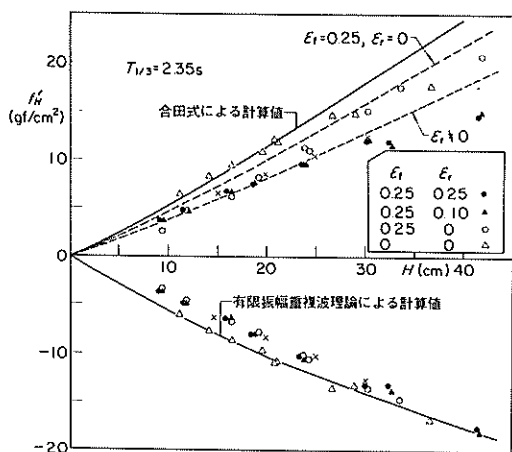


図-13 波高と水平波力の関係

一方、透過型や消波型に働く波力は正負ともに不透過型の波力よりも一部を除いて小さい。特に、透過型の正の波力は不透過型の計算値の70~75%に減じており、波力の低減効果が明らかである。これに対し、消波型の正の波力は波高が大きいとき透過型よりやや大きい傾向にある。これはドーナツ状遊水室の後半分が不透過であるため、波高が大きくなると流入してきた水がそこで勢いよく衝突するためと考えられる。後述する設計波力の算定法では透過型と消波型でこの違いを考慮している。負の波力については透過型と消波型で差がない。なお、図中の×印のデータは前回の規則波による波力であるが、正負ともに不規則波による波力によく一致している。これは不規則波による波力であっても、有義波周期を持った規則波である程度検討できることを表している。

## (3) 波高と鉛直波力の関係

透過型や消波型では、遊水室内部に働く波圧によって鉛直方向の波力成分が生じる。図-14は円筒部（基部ケーソン上面を含む）に働く波力の鉛直成分を  $B^2$  で割った見掛けの平均波力強度  $f_V'$  を同様にプロットしたものである。この場合、上向きを正としている。波の峰のとき負すなわち下向きの波力が働き、谷のとき正すなわち上向きの波力が働く。図中の破線は後述の設計波力の算定法によって求めた波力強度であるが、実験値にはほぼ合っている。また、規則波実験による強度を×印で示しているけれども、この場合も不規則波実験結果によく合っている。

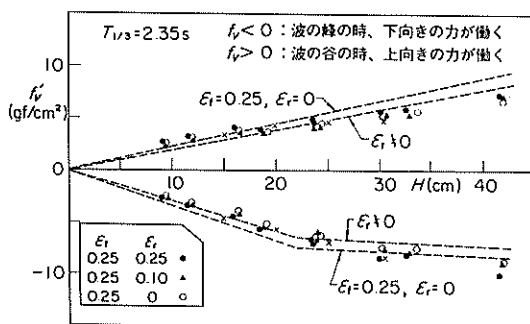


図-14 波高と鉛直波力の関係

## 4.2 基部ケーソン前面に働く波圧

図-15は不透過型の基部ケーソン前面の中央での波圧の正負のピーク値と波高との関係を3種の周期条件に対し示したものである。図中の実線は、正の波圧は合田式、負の波圧は有限振幅重複波理論による計算値を表している。実験および計算値ともに周期の長いほうが波圧は大きく、正のピーク値で周期が長くかつ波高の大きい条件で計算値が大きい傾向があるものの、それを除けば計算値は実験値によく合っている。波高の大きい条件すなわち最高波高に対応する実験値が小さくなるのは、この場合水路の余裕高さが小さく、多重反射で増幅された大きな波の峰の一部が水路からあふれることによるピークカットの影響があったのかもしれない。

正負の波圧を比較すると、絶対値はいずれも負の値が大きく、周期が2.84sのとき正の波圧の1.15倍、2.35sのとき1.25倍、1.95sのとき1.3倍程度と、周期が短いほどその傾向が顕著となる。透過型と消波型の基部ケーソンに働く波圧は、正の波圧は合田式による波圧の約9割、負の波圧は有限振幅重複波理論の8~9割程度である。

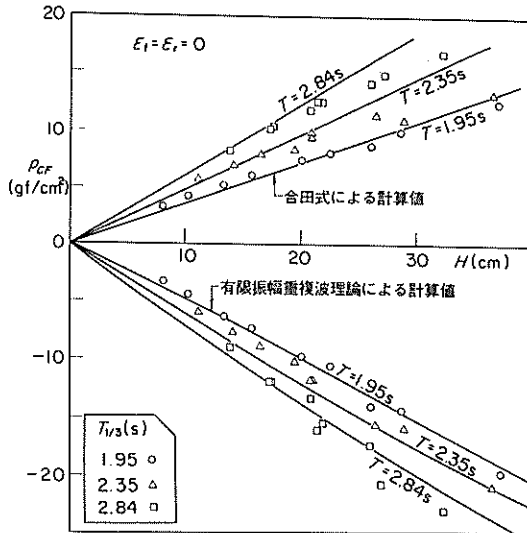


図-15 基部ケーソンに働く波圧（不透過型）

#### 4.3 二重円筒ケーソン全体に働く波力

一般に壁体には水平波力と鉛直波力が働き、安定性はその合成波力で評価される。特に、鉛直波力が底面に働く揚圧力のみならず、構造内部で鉛直波力成分が生じるような構造形式では、この合成波力の評価が重要である。当該構造の場合、滑動安定性が重要であるので、以下滑動安定性に対する合成波力について示す。滑動合成波力強度  $f_s$  は次式で定義される。

$$f_s = (F_H \pm \mu F_V) / (h + h_c) \quad (4)$$

ここに、 $F_H$  は延長方向単位長さあたりの水平波力（押す方向を正）、 $F_V$  は同鉛直波力（上向きを正）、 $\mu$  は摩擦係数（=0.6）であり、 $\pm$  は  $F_H$  の正負に対応する。今回の実験結果に対し、 $T_{1/3} = 2.35$  s の条件でのこの滑動合成波力強度を波高に対しプロットしたのが図-16である。図中、実線は同じ高さと同幅の直立壁体に対する計算値で、正の波力は合田式、負の波力は有限振幅重複波理論によるものである。これらの計算値は  $\epsilon_f = \epsilon_r = 0$  の不透過型の実験値に正の値の波高の大きい条件を除いてよく合っている。透過型や消波型の滑動合成波力強度は不透過型より小さい。後述の設計波力の算定法による計算値も破線で示してあるが、正の滑動合成波力強度は波高の実験値が大きい条件で消波型の場合やや大きく、透過型（計算値は  $\epsilon \neq 0$  と表示）の場合小さい傾向にある。

正負の滑動合成波力強度を比べると、消波型や透過型では負の値が絶対値が大きく、滑動安定性が負の波力で決まることがわかる。これが大水深重複波条件での二重

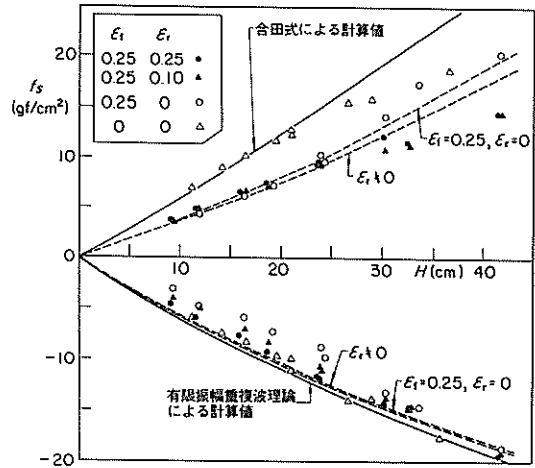


図-16 滑動合成波力

円筒ケーソンに働く波力の大きな特徴である。

#### 5. 設計波力の算定法

以上のような波力特性および前回の規則波実験による波圧の分布特性を考慮して、設計波力の算定法を提案した。二重円筒ケーソンに働く波の峰のときの波圧および波力強度は図-17に示しているような分布とし、通常の直立壁体に働く合田式<sup>6)</sup>による波圧分布を適当に補正する。図の左側にその合田式による波圧分布を示している。波圧強度等に  $G$  を下付けして表記しており、 $\eta_c^*$  は静水面上波圧が0となる高さ、 $p_{C1}$ 、 $p_{C2}$  は静水面およびケーソン上端での波圧強度、 $p_{Cw}$  は底面前端での揚圧力強度である。これらの値は、水平床の上にケーソンを直接設置する形式で、かつ延長方向に波が直角に入射する条件では、簡単に次のように表される。

$$\eta_c^* = 1.5 H \quad (5)$$

$$p_{C1} = [0.6 + 0.5 \{ (4\pi h/L) / \sinh(4\pi h/L) \}^2] \omega_0 H \quad (6)$$

$$p_{C2} = p_{Cw} = p_{C1} / \cosh(2\pi h/L) \quad (7)$$

二重円筒ケーソンに働く波圧等はこれに適切な低減係数を乗じることによって与える。図の中央はその垂直断面での分布、右側は透過円筒部および不透過円筒部の水平断面での分布を示している。円筒部に働く波圧分布は、このように、下段の不透過部では前半分に一樣分布、上段の透過部では外側と内側円筒のそれぞれ前半分および後半分に違った強度の波圧が一樣に作用するものとする。これらの波圧強度は同じ高さでの合田式による波圧強度

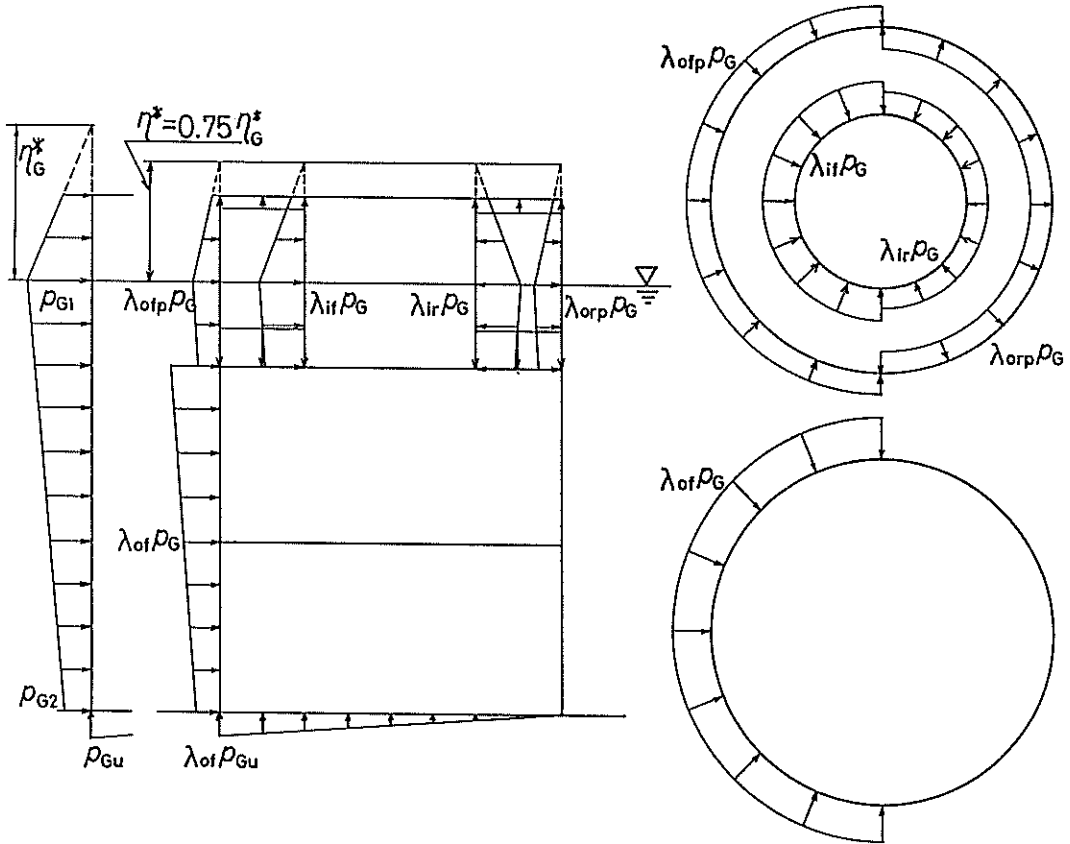


図-17 波の峰のときの設計波圧分布の一般図

$\rho_o$  に低減係数  $\lambda$  を乗じた値であり、各面に垂直に作用させる。低減係数にサフィックスを付けているが、 $o$  は外側、 $i$  は内側、 $f$  は前半分、 $r$  は後半分、 $p$  は上部の透過円筒部であることを表す。ただし、透過壁に働く強度は部材の前後の波圧の差、すなわち波力強度で、実質部分にのみ働くものである。基部ケーソンには前面壁に  $\lambda_{of}\rho_G$  の波圧が、底面に前端での強度が  $\lambda_{of}\rho_{Gu}$  の三角形分布の揚圧力が働くと考えられるが、そのほか、上面の前半分の露出面にもその高さでの波圧強度  $\lambda_{of}\rho_G$  が一様に下向きに作用するものとする。

波の峰のときで設計に考慮する波力の位相は、前半分の外側に働く波圧が卓越するタイミング（押し波時 I）と、遊水室内部が水で満たされ透過部の後半分にも強い波圧が働くタイミング（押し波時 II）の 2 つとし、後者については透過型と消波型の違いを考慮する。表-1 はこれらの位相での低減係数をまとめて示したものである。

さらに、波の谷のときの波圧を与えることが重要であるが、これについては直立壁体に働く有限振幅重複波理論による波圧が外側面に水平断面的には一様分布で作用

表-1 波の峰のときの波圧の低減係数

波 圧 低 減 係 数	押し波時 I	押し波時 II	
		透過型	消波型
$\lambda_{of}$	0.90	0.80	0.80
$\lambda_{ofp}$	0.65	0.35	0.30
$\lambda_{orp}$	0	0.45	0.80
$\lambda_{if}$	0.15	0.60	0.75
$\lambda_{ir}$	0	0.60	0.75

するものとする。この計算法については文献 4) を参照されたい。ただし、負の波力が最大時の遊水室内の水位は実験結果に基づき次式のように与え、これによる静水圧の変化を理論によるものとは別に考慮する必要がある。

消波型 ( $\epsilon_f = 0.25, \epsilon_r = 0$ ):

$$4\eta^- = -0.30H \quad (8)$$

透過型 ( $\epsilon_r = 0.25, \epsilon_r = 0.10$ ):

$$\Delta \eta^- = -0.25 H \quad (9)$$

ここに、 $\Delta \eta^-$  は静水面からの水位の偏差で上向きを正と定義している。

これらの算定法による計算値と実験値の比較は前章において既に随時みたっておりである。ここではケーソン全体に働く水平波力についてのみ計算値と実験値の相関を示しておく。図-18, 19 がその結果で、ケーソン全体に働く水平波力の平均強度の計算値  $f_{HC}$  と実験値  $f_{HE}$  の相関図である。 $\epsilon_r = 0.25$  で、 $\epsilon_r = 0.25, 0.10$  の透過型、

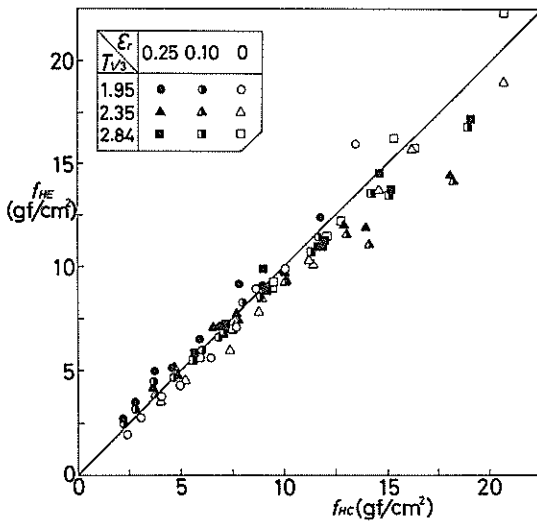


図-18 水平波力(正)に対する計算値と実験値の相関

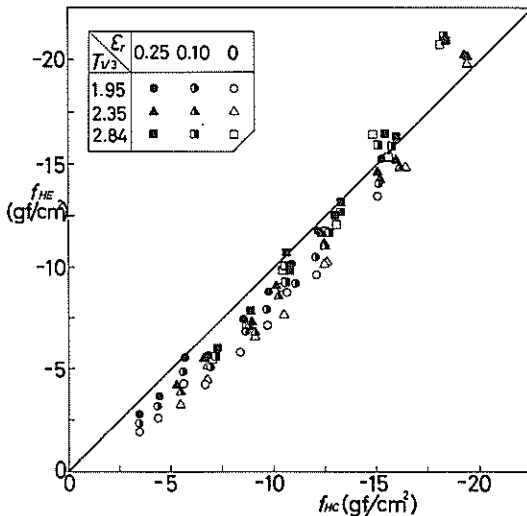


図-19 水平波力(負)に対する計算値と実験値の相関

および  $\epsilon_r = 0$  の消波型に対する全データをプロットしている。結果はばらついているけれども、提案した算定法はほぼ妥当であることがわかる。

## 6. 試設計

### 6.1 試設計の条件

二重円筒ケーソン透過型を現地に適用した場合、どの程度の規模になるかを知り、施工法などにおける問題点を洗い出すために概略の試設計を行った。設定した試設計の条件は次のとおりである。ただし、地震時については今回は検討しない。

#### a) 自然条件

- |      |                 |         |
|------|-----------------|---------|
| ① 水深 |                 | -50 m   |
| ② 潮位 | H. W. L         | + 1.5 m |
|      | L. W. L         | ± 0.0 m |
| ③ 波浪 | 最高波高 $H_{max}$  | 16.2 m  |
|      | 有義波高 $H_{1/2}$  | 9.0 m   |
|      | 有義波周期 $T_{1/2}$ | 14.0 s  |
|      | 入射波向き           | 0°      |

④ 海底勾配 1:100

⑤ 地盤 良好な砂地盤

#### b) 材料の単位体積重量

- |                 |                        |
|-----------------|------------------------|
| ① プレストレストコンクリート | 2.50 tf/m <sup>3</sup> |
| ② 鉄筋コンクリート      | 2.45 tf/m <sup>3</sup> |
| ③ 海水            | 1.03 tf/m <sup>3</sup> |
| ④ 中詰め砂 湿潤飽和状態   | 2.00 tf/m <sup>3</sup> |
| 水中有効重量          | 1.00 tf/m <sup>3</sup> |

#### c) 安全率等

- |         |                         |
|---------|-------------------------|
| ① 堤体の滑動 | 1.2 以上                  |
| ② 堤体の転倒 | 1.2 以上                  |
| ③ 端し圧   | 70 tf/m <sup>2</sup> 以下 |

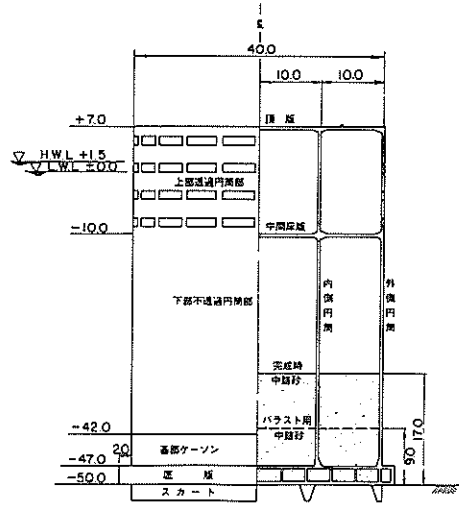
これらの条件のうち端し圧は地盤支持力の検討の代りにかりに設けたものであって、実際には詳細な地盤の検討が必要である。また、滑動安定性の検討に用いる摩擦係数もかりに 0.6 とする。

### 6.2 基本断面および計算結果

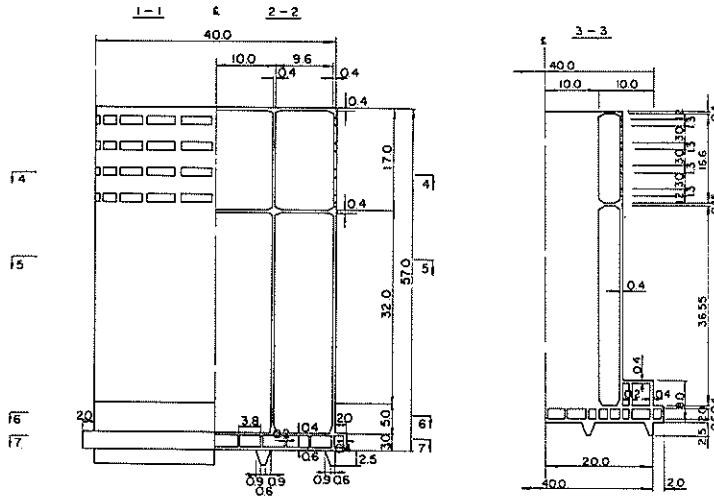
#### (1) 基本断面の設定

二重円筒ケーソンはプレストレストコンクリートを用いて製作する場合と鉄筋コンクリートのみによって製作する場合の2種を検討の対象とした。以下、これをそれぞれ PC タイプ、RC タイプと呼ぶ。

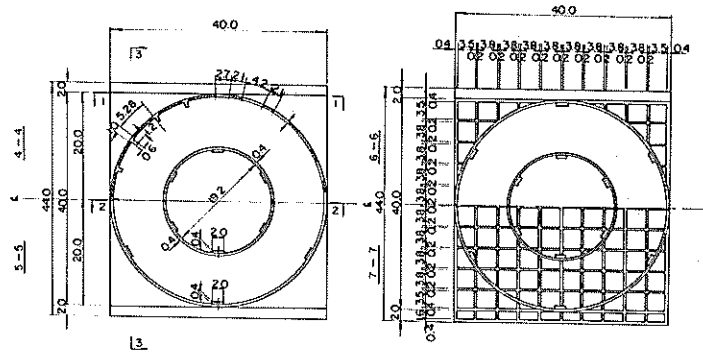
図-20, 21 は設定した PC および RC タイプの基本断面である。両タイプとも、頂版、上部外側透過円筒、下部外側円筒、内側円筒、中間床版、基部ケーソン、底版、フーチングおよびスカートから構成される。これら



(a) 標準断面図

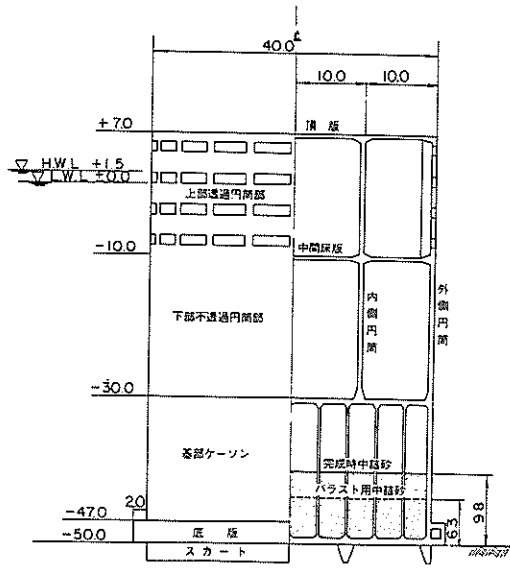


(b) 側面図

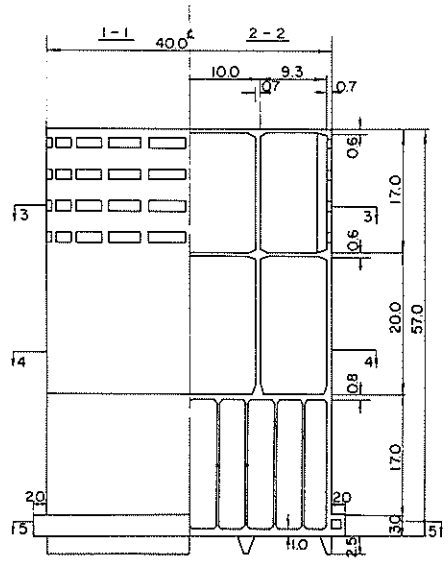


(c) 断面図

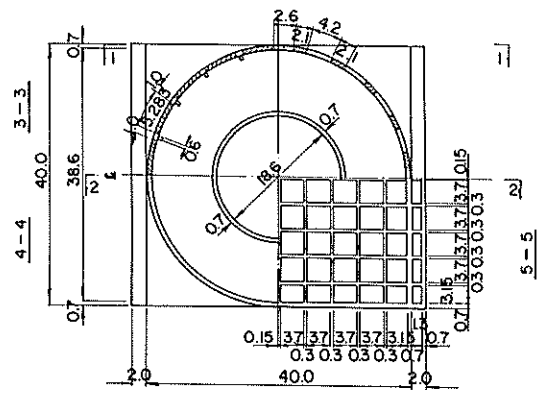
図-20 PCタイプの基本断面



(a) 標準断面図



(b) 側面図



(c) 断面図

図-21 RCタイプの基本断面

の諸元は以下の考え方より設定したものである。

- ① 二重円筒ケーソンの天端高は H. W. L 上有義波高の 0.6 倍程度をとり、D. L + 7.0m とする。
- ② 透過円筒部の下端の水深は静水面下有義波高程度をとって、D. L - 10.0m とする。また、外側円筒透過部の開口率は港外側を 0.25、港内側を 0.10 とする。
- ③ 外側円筒、内側円筒の直径は先の実験条件 (縮尺 1/40) に合わせて、それぞれ 40m、20m とする。ただし、端し圧を抑えるため前後に必要なフーチングを設ける (この場合、2m)。
- ④ 基部ケーソンは材料の節約の面および円筒部製作にスライディングフォームを用いることの有利さを考慮して、底版としての強度確保ができる範囲でできるだけ低くするのを基本とする。
- ⑤ 底版には海底面の不陸への対応、洗掘対策として

適当なスカートを設置する。

- ⑥ 外側上部透過壁は横スリット型とし、波力による曲げモーメントに抗するため、必要によって縦にリブを設けて強化する。
- ⑦ PCタイプについては、外および内側円筒壁の円周方向PC鋼材の定着のためのピラスターを適当に設ける（この場合、60°おきに6箇所）。

以上の条件のうち、特に④、⑤が問題である。④については若干の部材力の検討に基づき、PCタイプについては格子状に隔壁を設けた高さ3.0mのく形底版（上床版あり）上に円筒部を直接打上げる構造とした。ただし、底版の張り出し部（底版において円筒部との接合部の外側の部分）については、ケーソン重量や波力により生じる地盤反力に耐えるように、さらに高さ5mの補強基部ケーソンを設けた。一方、RCタイプについては、部材の耐力がPC部材に比べて小さいので、円筒部の高さは37mにおさえ、高さ20mの基部ケーソンを設けることとした。円筒部を底版まで延ばすと、RC部材の厚さは1m以上となり、また底版張り出し部の部材厚も非常に大きくなってしまふ。⑤のスカートについては十分検討したものではないが、一応高さ2.5mのRC桁を縦横に格子状に配置した。

(2) 浮遊時の安定性

ケーソン（長さ40m）の重量はPCタイプが24,100tf、RCタイプが39,900tfとなり、後述する施工法としては、これを浮遊曳航して設置することを想定している。

一般に、ケーソンが浮遊時に安定するためには、次の条件を満たす必要がある。

$$\frac{I}{V} - \overline{CG} = \overline{GM} > 0 \quad (10)$$

ここに、

- V：排水容積
- I：吃水面の断面2次モーメント
- C：浮心
- G：重心
- M：傾心

設計では、安全のため  $\overline{GM}$  を吃水の5%以上とするのが通常である。そのため、浮遊時安定を確保するには表-2に示しているように、PCタイプの場合22,200tf、RCタイプの場合13,800tfの潤滑重量のバラスト用中詰め砂が必要となる。

(3) 完成時波力に対する安定性

波力は5.で提案した方法によって計算する。図-22は波の峰のときの計算波圧分布（押し波時I、II）と波の谷のときの波圧分布（引き波時）である。また、これらの3位相での水平波力、鉛直波力（1箇40mあたりの値）、滑動および転倒安全率、端し圧等を表-3にまとめて示している。

PC、RCタイプとも、基部ケーソンの天端水深が異なる点を除いては同じ形状であることから、波力は基部

表-2 浮遊時の安定計算結果

項目	PCタイプ	RCタイプ
ケーソン重量	24100 tf	39900 tf
バラスト用中詰砂重量	22200 tf	13800 tf
吃水	32m	35m
メタセンター長	4.9m	1.9m
吃水の5%	1.6m	1.8m

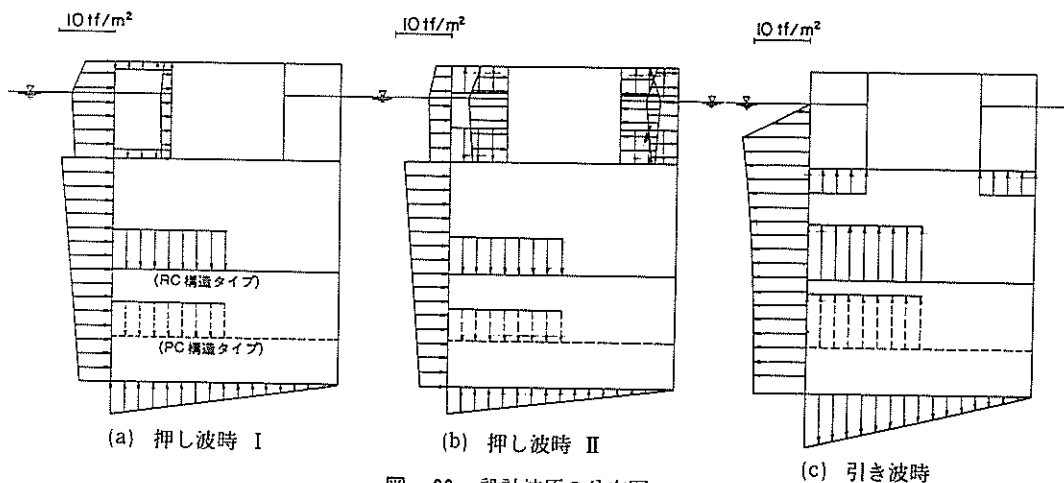


図-22 設計波圧の分布図

表-3 波力作用時の安定計算結果

名称		P C タイプ			R C タイプ		
ケーソン重量		24100 tf			39900 tf		
中詰砂重量		41200 tf			22300 tf		
浮力		-29500 tf			-26400 tf		
総重量		35800 tf			35800 tf		
荷重ケース		押し波時Ⅰ	押し波時Ⅱ	引き波時	押し波時Ⅰ	押し波時Ⅱ	引き波時
水平波力		15700tf	15100tf	- 18900tf	15700tf	15100tf	- 18900tf
鉛直波力		3200tf	1700tf	- 2100tf	3000tf	1600tf	- 2100tf
安全率	滑動	1.24	1.35	1.20	1.25	1.36	1.20
	転倒	1.58	1.63	1.77	1.59	1.65	1.78
端趾圧		69 tf/m <sup>2</sup>	68 tf/m <sup>2</sup>	68 tf/m <sup>2</sup>	68 tf/m <sup>2</sup>	68 tf/m <sup>2</sup>	68 tf/m <sup>2</sup>

ケーソン上面に作用する鉛直波圧が異なるだけである。水平波力は透過型の場合押し波時Ⅰと押し波時Ⅱで大きく、この結果によればⅠがⅡより約4%大きいにすぎない。これに対し、鉛直波力（上向きを正）はPCタイプがRCタイプよりわずかに大きく、Ⅰ、ⅡではⅠが約85%大きい。これはタイプ別では基部ケーソン上面に働く波圧の違いの影響であり、Ⅰ、Ⅱの別では遊水室内部での波圧と底面に働く揚圧力の相殺効果の違いの影響である。これらの結果、押し波時ではⅠの位相が安定性の上で厳しい。

一方、引き波時はPC、RCタイプで水平波力が同じであるのは当然であるが、この場合基部ケーソン天端での波圧強度がほとんど同じであるので、鉛直波力も同じ値となっている。押し波時Ⅰの波力と比べると、水平波力は絶対値で約20%大きく引き波時の波力が卓越することが確認できる。また、この引き波時に対して滑動安全率がちょうど1.2となるように中詰め砂の量を決定しているけれども、滑動安定性の面からは引き波時が厳しいことがわかる。ただし、転倒に対する安全率は押し波時が厳しく、端趾圧はいずれの位相でもほぼ同じである。これは底版は海側、陸側ともにほぼ同じ強度を有すべきことを表している。

なお、引き波時の波力の算定については、前面の水位が静水面から半波高分だけ下がった状態での静水圧の変化を考慮する簡便法もあるが、今回の条件に対しこれを適用すると水平波力は-15,800tfとなり、表の有限振幅重複波理論による計算値の84%と小さい値を与える。

大水深の重複波条件では簡便法は危険側の値を与えることになるので注意が必要である。

以上の結果では、滑動安定性の面からはPCタイプの場合遊水室を除く全容積の35%、RCタイプの場合18%だけを中詰めをすればよいことになる。これは水張り部が大きいことを意味しており、地盤反力を小さくするための軽量化の面ではよいものの、安定重量確保の容器の面からは余裕の大きい構造といえる。構造面でさらに改良の余地が残されている。

### 6.3 施工法の検討

#### (1) 概要

今回試設計を行った二重円筒ケーソンは水深50mの海底に直接着底させる形式であることから、全高57m、重量はPCタイプで約24,000tf、RCタイプで約40,000tfにもおよぶ超大型構造物になる。こうした大型コンクリート構造物は、特に欧米における海底石油掘削のための構造物としては珍しくない。しかし、わが国においては、港湾の沖合展開に伴い港湾構造物の大水深化が進んでいるものの、既往の最大のケーソンは、青方港の係船ドルフィン用ケーソンの全高32m、重量11,340tfであるにすぎない。一般の大型ケーソンは、全高で18m程度以下、重量で5,000tf程度以下であるから、今回のケーソンがいかに巨大なものであるかがわかる。したがって、その設計法とともに、ケーソンの製作、曳航、据付といった施工法の検討が非常に重要である。

大型ケーソンの施工法としては、

#### ① 大型FDを用いる方法



- ② ケーソン製作ヤード・ドックを用いる方法
- ③ 海上打継ぎによる方法
- ④ 分割製作して洋上で接合する工法

などが考えられる。

①の方法は、かなり汎用性があり、また、従来の施工技術の延長で実施が可能であると考えられる。しかし、国内に現存するFDでは揚荷能力が10,000 tf以上のものは2隻しかなく、進水可能なケーソン吃水高が20m程度、きょ内幅は最大でも40m程度、クレーンによるケーソン製作最大高さは50m程度である。このため、二重円筒ケーソンの施工にあたっては、新しい超大型のFDを建造する必要があるとともに、ケーソンをFDから進水させるためには、ケーソンの吃水30数mにFDの作業甲板深さを加えたよりも深い水域で進水作業を行う必要があるなどの問題点がある。ただし、後述する③の方法と組み合わせれば、ある程度揚荷能力の小さいFDでも施工することが可能である。

②の方法についても、ケーソン吃水30mの深さをもつヤードを建設するのは困難であるため、③の海上打継ぎと組み合わせる必要がある。ヤードやドックには、既存の施設を使用する場合と、埋立、掘込、仮締切などにより仮設のヤードを築造する場合がある。

仮設のヤードを用いる例としては、海外で建造されているコンクリート製プラットフォームなどの製作においてよく用いられているように、仮設工で締め切ったドライヤードで構造物の一部を製作したのちに進水させ、これを引き出して海上で打ち継ぐ工法があげられる。また、オランダのオスタースケルデ・ストームサーズバリアーのピアケーソンも、水面下15mまで掘り下げたドライドックで製作し、専用のリフティングバージによって曳航、据付が行われている。わが国においても、砂浜上でケーソンを製作したあとから、徐々に前面を浚渫してケーソンを浸水させた福井港の例や、沈埋トンネルの製作などの例がある。

③の工法は、既存の施設を活用して大型ケーソンを製作する工法であり、条件が整った場合には有利な工法である。打継ぎヤードとしては、あらかじめ築造したマウンドの上にケーソンを仮置きする場合と、静穏な水域にケーソンを係留する場合がある。前述の青方港のケーソンの製作においては、前者の方法が用いられており、この場合にはマウンドを階段状に作り、ケーソンを順次移設しながら所要の高さまで打ち足す工法が採用されている。海外で製作されているコンクリート製プラットフォームなどでは後者の方法がよく用いられている。

二重円筒ケーソンを海上打継ぎで製作する場合には、

基部ケーソンをFD上やドック内などでドライワークで製作し、これを進水させて水深15mから20mの静穏な水域で係留し、下部円筒部を打ち継ぐ。次に、水深40m程度の海域に移設し、バラスト用中詰め砂を投入した後、上部まで打ち継ぎ、ケーソンを完成させることが可能である(図-23参照)。

この場合の最大の問題点は、打継ぎヤードとして使用する静穏な水域が確保しうるかどうかという点である。静穏度の確保のためには、浮防波堤を仮設したり、一部完成したケーソンの背後の水域を利用するといった方法も考えられる。また、打継ぎヤードの水深が浅い場合には、FD上でケーソンの海上打継ぎを行うことにより、FDの浮力を利用して吃水を抑えることができる。

④については、大型海洋構造物を建設していくうえで重要な施工技術であるが、このような大規模構造物の接合部の設計法、施工法には未解明な点も多く残されており、今後の技術開発に負うところが大きい。

このように、各工法ともさまざまな問題点を持っているが、施工実績が豊富で、汎用性があり、かつ、従来技術の延長線上であると考えられる①のFDによる工法について、以下検討を進める。この工法に基づいて想定される施工手順を、図-24に示す。

## (2) ケーソンの製作

ケーソンの製作はすべてFD上で行う。

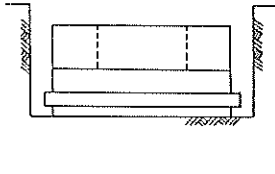
製作の順序としては、まずスカート、底板、基部ケーソンの順で、通常の型枠を用いて立ちあげる。次に、円筒部については、スライディングフォーム工法を適用するものとし、その装置の組立、コンクリート打設、装置の解体を行う。

スライディングフォーム工法とは、まだ固まらないコンクリートを型枠の中に打ち込み、ジャッキを用いて型枠を上へ連続的にスライドさせて、打ち上げていく工法である。型枠の移動速度は、コンクリート自身が自重を支え、形を保つのに十分なだけの強度が出たのちに、型枠がコンクリートを通すように調整する。コンクリートの打設は、通常は連続的に行うため、施工速度が極めて早く、また、密実なコンクリートを打ち継ぎ目なしに形成しうるといった特徴を持っている。ただし、型枠装置の設置および解体にかなりの時間を要するため、同一断面がある程度長くないと、そのメリットが生かされない。二重円筒ケーソンの場合には、円筒部の打ち上げにこの工法が適している。

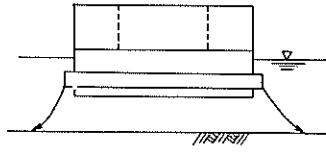
## (3) バラストニングと進水

FD上でケーソンが完成した後、ケーソンが浮遊時に安定を保つために必要なバラスト用中詰め砂を投入する。

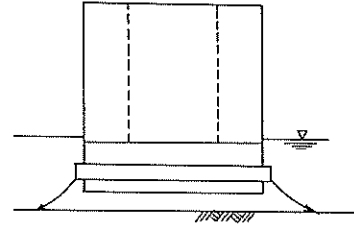
(1) 基部ケーソン部と円筒部  
の一部製作 (ドックなど)



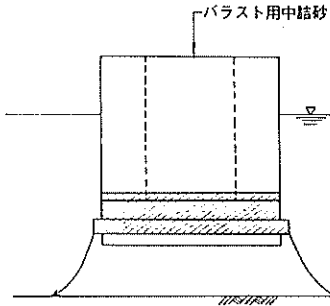
(2) ケーソン進水と係留



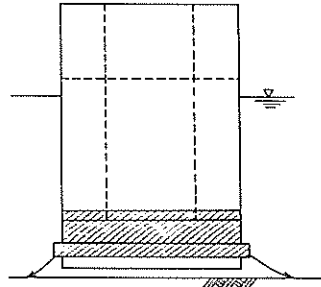
(3) 下部円筒部の打継ぎ



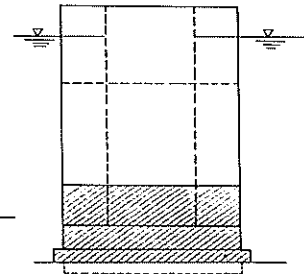
(4) バラスト用中結砂の投入



(5) 上部円筒部の打継ぎ

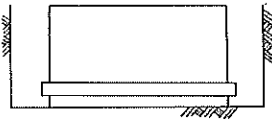


(6) 曳航・沈設、中結砂投入、  
グラウト注入



(a) P Cタイプ

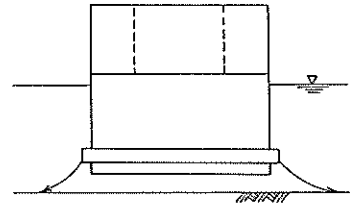
(1) 基部ケーソン部製作 (ドックなど)



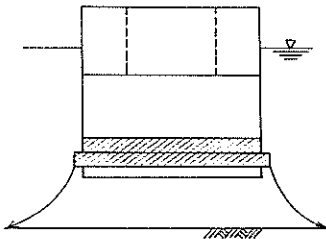
(2) ケーソンの進水と係留



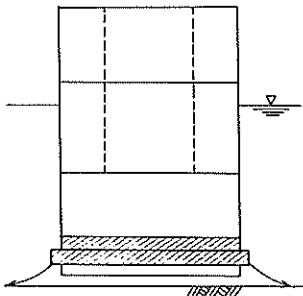
(3) 下部円筒部の打継ぎ



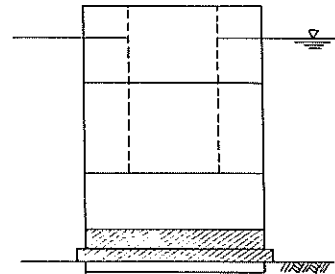
(4) バラスト用中結砂の投入



(5) 下部・上部円筒部の打継ぎ



(6) 曳航・沈設、中結砂投入、  
グラウト注入



(b) R Cタイプ

図-23 海上打ち継ぎ工法の施工手順

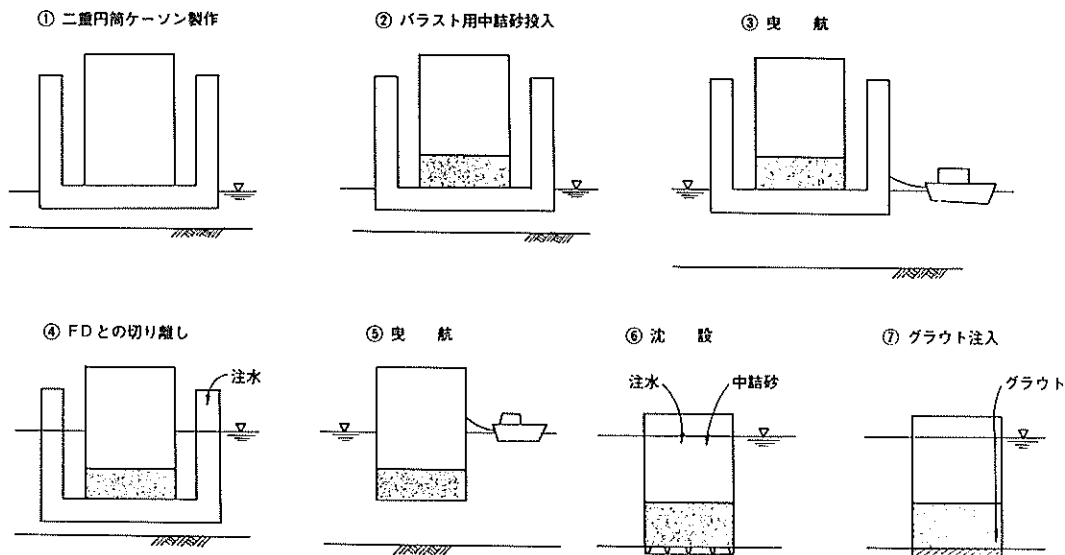


図-24 FDを使用した工法の施工手順

このとき、FDの揚荷能力がケーソン重量ぎりぎり余力がないとすると、約20,000 tfのバラスト用中詰め砂を投入することによって、ケーソン下面は海面下に沈むが、この状態でも浮遊の安定性が確保しうらば、吃水以外は特に問題とはならない。したがって、FDの揚荷能力は、ケーソン重量と中詰め砂重量の合計重量まで必要ではなく、ケーソン重量以上であれば十分である。FDの揚荷能力がケーソン重量以下であっても、FD上での海上打継ぎを行い、FDとケーソンを徐々に沈めながらケーソンを製作する方法も考えられ、この場合にはさらに必要とする揚荷能力は小さくなる。ただし、この場合にはケーソン製作が海上作業になるため、作業効率がドライワークに比べて低下する。したがって、FD能力は、工期や経済性などを考慮して、適切に選定する必要がある。

FD上でバラストリングを終えると、ケーソンをFDから進水させるため、より深い水域に曳航する。そしてFDに注水してFDを沈め、ケーソンを進水させる。

#### (4) 曳航、据付

進水したケーソンは、設置地点まで曳航する。この場合、曳船の総馬力数は10,000馬力程度必要になる。

設置地点まで曳航したケーソンに注水および中詰め砂の投入を行って沈設する。コンクリート製プラットフォームなどの例では、沈設時のケーソンの鉛直度の修正は、水バラストにより偏荷重をかけることで対処されている。しかし、二重円筒ケーソンにはバラスト区画がなく、偏荷重をかけることができないため、姿勢制御に別の工法

を開発する必要がある。例えば、バキュームポンプを用いて、スカート内に正圧あるいは負圧を加えることにより、姿勢を制御する方法などが考えられる。

ケーソンが着底したあと、スカート内の空隙をグラウト材の注入により充てんし、荷重の分散を図る。

#### 6.4 今後の課題

##### a) 外力の算定

##### ① 斜め入射波による波力

波が斜めに入射する場合には、円筒型にあたる波の位相差の影響が生じ、一様分布でなくなることも予想され、さらに平面実験により検討する必要がある。

##### ② 地震時に円筒部に作用する動水圧

地震時の動水圧については、直立壁、傾斜壁などに対する算定法は定式化されているが、開口部を有する円筒構造が受ける動水圧については十分に解明されておらず、振動実験などにより検討する必要がある。

##### b) 基礎地盤の設計

##### ① 基礎地盤の動的荷重に対する支持力

基礎地盤は、地震や波力などによる動的な繰返し荷重を受け、これに対する地盤の支持力の安定が重要な問題である。

##### ② 揺り込み沈下量の算定

①の課題とからみ、直接基礎地盤に着底したケーソンが、繰返し荷重により揺すられながら地盤に沈下していくことが想定され、その沈下量を

推定し、対策を講じる必要がある。

③ 洗掘の推定とその対策

基礎地盤が波や流れによって洗掘を受け、ついには全体の破壊につながる恐れもあり、スカートなどによる洗掘対策は不可欠である。したがって、洗掘量の推定とその対策法の研究が重要である。

c) 構造設計

① 3次元構造解析（有限要素法による解析など）

円筒部材に対する設計法としては、「水道用プレストレストコンクリートタンク標準仕様書」<sup>7)</sup>などがあるが、これらは等分布荷重が作用する時の解を与えるもので、本ケーソンのように、複雑な外力を受ける部材の設計には、より厳密な構造解析が必要である。

② 純引張りを受けるRC部材の耐力・変形性状

円筒部の円周方向には、フープテンションによる純引張り力が働くが、この場合のRC部材の耐力、変形性状は未解明の点が多く、実験等による検討が必要である。

③ 接合部の設計

プレハブ工法でいくつかの部材を接合する場合には、その接合部にかなり大きな繰返し荷重が加わり、条件によっては疲労破壊が問題になることも予想され、その設計法の検討が必要である。

④ 新構造部材（SRC、ハイブリッド、太径鉄筋など）を用いた部材の設計

今回の試設計では、PCとRC構造の設計を行ったが、二重円筒ケーソンのような大型構造物においては、SRC（鉄骨鉄筋コンクリート）、ハイブリッド（鋼板とコンクリートなど）、太径鉄筋を用いたRC部材などの新しい構造部材のメリットが生かせる可能性が高く、これらの部材を用いた検討が必要である。

⑤ 限界状態設計法による部材設計法

部材設計に限界状態設計法を適用する場合、荷重の設定法、荷重係数の数値などについて、さらに検討を行う必要がある。

d) 施工

① 作業船の検討

ケーソン重量、吃水、ヤード水深などを総合的に勘案して、最も経済的にケーソンの製作、曳航、設置が可能となる作業船の規模、性能などを検討する必要がある。

② 沈設時の姿勢制御技術

通常のコングリート製プラットフォームはバラ

スト用の隔壁を有するため、水バラストによる姿勢制御が可能であるが、二重円筒ケーソンには隔壁がないため、姿勢の制御法について検討しておく必要がある。

③ 中詰め砂の投入法

基部ケーソンや底版は軽量化のためボックス構造としているため形状が複雑で、これらへの中詰め砂の充てん方法を検討する必要がある。

④ ケーソンの係留法

海上での打継ぎ工法を採用する場合には、かなり水深の深い海域にケーソンを係留し、コンクリートを打設する必要がある。ケーソンの動揺を抑える係留方法、あるいは、静穏度の向上方法などについて検討する必要がある。

⑤ プレストレスの導入技術と定着部の処理

PC構造とする場合、PCを海上作業で効率よく、しかも、耐久性上問題のないように打ち継ぐ施工法について検討する必要がある。

⑥ プレハブ化施工法

プレハブ化工法を用いる場合には、海上でいくつかの部材を接合する必要があり、その接合法について検討する必要がある。

e) その他

① 構造形式の改善

二重円筒ケーソンの形状を、条件に応じてさらに検討し、より合理的で経済的な構造形式としていく必要がある。例えば、基部ケーソンを台形にすることにより、水平力の一部を鉛直力として利

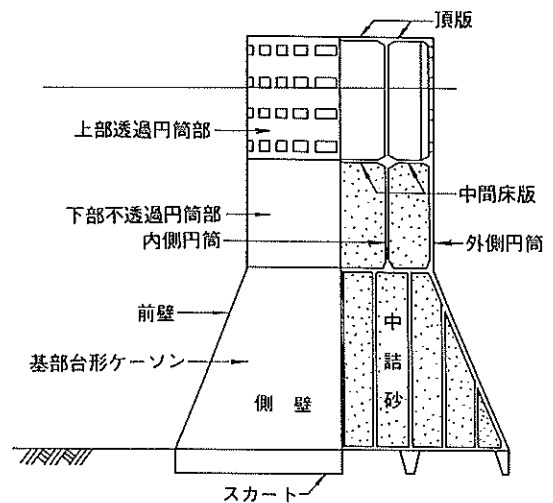


図-25 基部台形ケーソン型の概略図

用し、安定性を向上させるとともに、水張り部を低減し、ケーソン容積に対する中詰め砂の容積の比率を高くすることが可能である(図-25参照)。

## 7. むすび

本研究の主要な結論をまとめると以下のとおりである。

- ① 外側円筒の前後の開口率( $\epsilon_f$ ,  $\epsilon_r$ )を適切に選定することによって、反射率、伝達率を適当に制御できる。全高の1/3を透過部とした場合、エネルギー消費率は透過型では $\epsilon_f = 0.25$ ,  $\epsilon_r = 0.10$ としたとき60~70%、消波型( $\epsilon_r = 0$ )では $\epsilon_f = 0.25$ としたとき65~75%と高く、この程度の開口率を選ぶのがよい。ただし、この開口率は透過部のみの展開面積に対する開口総面積の割合で定義したものである。
- ② 二重円筒ケーソンに働く波力は不透過壁体に働く波力よりも小さい。特に、透過型では波の峰のときの水平波力が不透過型(比較のために $\epsilon_f = \epsilon_r = 0$ としたもの)の約75%に減じ、かつ円筒部に鉛直下向きの波力成分が生じる。消波型での水平波力はやや大きくなるが、通常の不透過な直立壁体に対する計算値の90%程度以下にはなり、鉛直下向きの成分が生じるのは透過型と同じである。
- ③ 大水深の重複波が作用する構造物においては、波の峰のときの正の波力ばかりでなく、波の谷のときの負の波力が非常に重要である。特に透過型や消波型では部材強度の面のみならず滑動安定性も波の谷によって決まるという特徴がある。
- ④ 二重円筒ケーソンの設計波力の算定法を提案した。波の峰のときの波圧は通常の直立壁体に対する合田式による波圧を修正分布させるもので、外側壁面での波圧が卓越する位相および遊水室内部での波圧が卓越する位相に対し、各構造要素ごとの修正係数を与えた。波の谷のときの負の波力については、有限振幅重複波第4次近似理論によって精度よく求めることができる。ただし、遊水室内の残留水位は理論とは別に与える必要がある。
- ⑤ 提案した設計波力の算定法に基づき、水深50mの海域を対象として透過型の試設計を行った。外側円筒の直径を40mとしたとき、設計有義波高9m(最高波高16.2m)の波に対し、PC構造の場合遊水室を除いた全容積の35%を中詰めするだけで滑動に対し安定である。ただし、ケーソン重量は1函あたり24,100tfにもなり、製作・施工面での技術開発が期待される。本資料ではそうした設計・製作・施工上の今後の課題をまとめた。

以上、二重円筒ケーソンを海底に直接設置する形式についての検討結果を述べた。当該ケーソンの実用性を高めるためには、捨石マウンドを設けることが当然考えられるので、今後これを中心として研究を進めていく予定である。

なお、本研究のうち水理特性に関しては、科学技術庁科学技術振興調整費による「海洋構造物による海洋空間等の有効利用に関する研究」の一部として実施したものである。本研究を進めるにあたって、当所の合田良実所長、土田肇次長、浅田忠則水工部長、井上豪彦設計基準部長、神田勝己設計基準研究室長、善功企動土質研究室長、清宮理沈埋構造研究室長には数多くのご教示を得た。ここに記して、感謝の意を表する次第である。

(昭和62年6月30日受付)

## 参考文献

- 1) 谷本勝利・吉本靖俊・高橋重雄：大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その1)——透過性構造(海底設置型)の反射および伝達波特性に関する不規則波実験——、港湾技研資料, No.516, 1985, 39p.
- 2) 谷本勝利・吉本靖俊・岡幸夫：大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その3)——波力特性に関する実験——、港湾技研資料, No.543, 1985, 61p.
- 3) 谷本勝利・吉本靖俊・岡幸夫：大水深波浪制御構造物の水理特性と試設計, 第32回海岸工学講演会論文集, 1985, pp.515~519.
- 4) 谷本勝利・富田英治・村永努：水路における不規則波の再反射波の影響について、港湾技研資料, No.467, 1983, 23p.
- 5) 合田良実・柿崎秀作：有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第5巻第10号, 1966, 57p.
- 6) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 1979, pp.2-106~2-108.
- 7) 日本水道協会編：水道用プレストレストコンクリートタンク標準仕様書, 1980.

## 記号一覧

$B$	: 堤体幅	$V$	: 排水容積
$C$	: 浮心	$W_0$	: 水の単位体積重量
$d'$	: 透過円筒部下端高さ	$\epsilon_f$	: 透過円筒部前半分の開口率
$F_H$	: 延長方向単位長さあたりの水平波力	$\epsilon_r$	: 透過円筒部後半分の開口率
$F_V$	: 延長方向単位長さあたりの鉛直波力	$\eta^*$	: 静水面上波圧が0となる高さ
$f_{HC}$	: ケーソン全体に働く平均水平波力強度の計算値	$\eta^{*c}$	: 合田式による静水面上波圧が0となる高さ
$f_{HE}$	: ケーソン全体に働く平均水平波力強度の実験値	$\Delta\eta^-$	: 波の谷のときの遊水室内水位の静水面からの偏差
$f_s$	: 滑動合成波力強度	$\lambda_{if}$	: 内側円筒部前半分の波圧低減係数
$f'_H$	: 円筒部に働く平均水平波力強度	$\lambda_{ir}$	: 内側円筒部後半分の波圧低減係数
$f'_{H1/3}$	: 円筒部に働く平均水平波力強度の1/3最大値	$\lambda_{of}$	: 不透過円筒部前半分の波圧低減係数
$f'_{H1/10}$	: 円筒部に働く平均水平波力強度の1/10最大値	$\lambda_{ofp}$	: 透過円筒部前半分の波圧低減係数
$f'_{Hmax}$	: 円筒部に働く平均水平波力強度の最大値	$\lambda_{orp}$	: 透過円筒部後半分の波圧低減係数
$f'_V$	: 円筒部（基部ケーソン上面を含む）に働く平均鉛直波力強度	$\mu$	: 摩擦係数
$G$	: 重心	$\phi$	: 波高増幅率
$H_{1/3}$	: 有義波高		
$H_{l1/3}$	: 通過有義波高		
$H'_{l1/3}$	: 分離入射有義波高		
$h$	: 水深		
$h_c$	: 静水面上天端高さ		
$h'$	: 円筒部下端高さ		
$I$	: 吃水面の断面2次モーメント		
$K_{Loss}$	: エネルギー消費率		
$K_R$	: 反射率		
$K_T$	: 伝達率		
$K'_T(f)$	: 成分波の伝達率		
$L_{1/3}$	: 有義波波長		
$L'$	: 成分波波長		
$l$	: 造波板から堤体までの距離		
$M$	: 傾心		
$N_0$	: 波のデータ数		
$\hat{p}$	: 確率密度		
$\hat{p}_{CF}$	: 基部ケーソン前面中央での波圧		
$\hat{p}_{C1}$	: 合田式による静水面での波圧強度		
$\hat{p}_{C2}$	: 合田式によるケーソン下端での波圧強度		
$\hat{p}_{Gu}$	: 合田式によるケーソン底面前端での揚圧力強度		
$S_i(f)$	: 入射波のスペクトル密度		
$S_T(f)$	: 伝達波のスペクトル密度		
$T_{1/3}$	: 有義波周期		
$T_{T1/3}$	: 伝達波の有義波周期		

港湾技研資料 No.600

1987・9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 つばさ印刷技研

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.