

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL. 28      NO. 2      JUNE 1989

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第28巻 第2号 (Vol. 28, No. 2), 1989年6月 (June 1989)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 半円形ケーソン堤の水理特性に関する実験的研究  
..... 谷本勝利・滑川伸孝・石丸敬純・関本恒浩..... 3  
(A Hydraulic Experimental Study of Semi-circular Caisson Breakwaters  
.....Katsutoshi TANIMOTO, Nobutaka NAMERIKAWA,  
Yoshizumi ISHIMARU and Tsunehiro SEKIMOTO)
2. 正規圧密粘土地盤上の補強盛土の挙動.....寺師昌明・北誥昌樹.....33  
(Fabric-Reinforced Embankment on Soft Clay Ground  
.....Masaaki TERASHI and Masaki KITAZUME)
3. 沈下したプレストレストコンクリート舗装版のリフトアップ工法の開発  
..... 佐藤勝久・八谷好高・上中正志・犬飼晴雄・川本幸広・塚田 悟.....49  
(Development of Lift-up Method for Rehabilitation of Settled Prestressed  
Concrete Pavements  
.....Katsuhisa SATO, Yoshitaka HACHIYA, Masashi KAMINAKA,  
Haruo INUKAI, Yukihiro KAWAMOTO and Satoru TSUKADA)

# 1. 半円形ケーソン堤の水理特性に関する実験的研究

谷本 勝利\*・滑川 伸孝\*\*・石丸 敬純\*\*\*・関本 恒浩\*\*\*

## 要 旨

水深が比較的浅い海域での新しい波浪制御構造物として有望と考えられる半円形ケーソンを取り上げ、これの実用化に関する調査研究を、(財)沿岸開発技術研究センターおよび参画企業と共同で、昭和60~62年の3か年にわたり実施した。本報告はその成果の一部をまとめたもので、水路実験結果に基づき半円形ケーソン堤の反射・伝達波および波力特性を示すとともに、設計波力の算定法を提案している。

半円形ケーソンは基部底版の上を半円形断面としたもので、半円部の前半分に孔がないものを基本型、前半分に孔があって内部に遊水室を有するものを消波型、さらに後半分にも孔があって通水性を有するものを透過型と呼ぶ。半円形ケーソンは外周面に働く波力が鉛直下向きの成分を有し、波の力で耐える構造としての特徴を持つほか、円周に働く波力が円の中心を通るので、地盤反力が略等分布になるという特徴がある。また、水面上が曲面でソフトな感じを与え、景観的にもすっきりとした特徴ある構造といえる。

基本型は特に耐波安定性がよく、直立のケーソンに比べて波力が著しく低減するものの伝達率は大きいという短所がある。しかし、内部を遊水室とし、後半分に孔を開けた背面消波型とすることによって伝達率はやや低減し、さらに底版に開口率10%程度の孔を開けることによって揚圧力を無視できる。また、前面のマウンド被覆ブロックを厚くしても通常の矩形ケーソン堤にみられる強大な衝撃碎波力の発生のおそれがないので、波浪条件が厳しく、水深のやや大きい所での離岸堤に向いている。反射率は前面被覆ブロックを厚くすることによってある程度低減できる。

消波型や透過型ではエネルギー逸散率が高く、反射率は著しく小さくなるが、ケーソン内部に弱い衝撃圧が発生する特徴がある。そのため、基本型に比べて波力は同程度かやや大きくなるものの、適切な諸元であれば矩形ケーソンに働く滑動波力よりは小さい。低反射性や通水性を必要とする離岸堤や軟弱地盤上での防波堤として適している。

提案した波力算定法による試設計例では、水深8.5m、高潮位0.5m、有義波周期14.2s、最高波高7.46m、入射角0°の条件に対し、背面および底版に孔を開けた基本型では、幅14m、高さ1.5mの直立底版の上に半径7mの半円形壁(天端高+3.0m)を設けた構造(底版下面から2.3mまでを捨てコンクリートで中詰め)で成り立つ。また、同条件に対する透過型では、半径9.5mの完全半円形(天端高+3.0m)で、底版下面から3.7mまでを捨てコンクリート中詰めする構造で成り立つ。端趾圧はそれぞれ8.0tf/m<sup>2</sup>、8.6tf/m<sup>2</sup>と非常に小さい。

キーワード：防波堤、半円形ケーソン、反射波、伝達波、波圧、波力、離岸堤

\* 水工部長

\*\* 前(財)沿岸開発技術研究センター主任研究員

\*\*\* 半円形防波堤共同研究グループメンバー

# 1. A Hydraulic Experimental Study on Semi-circular Caisson Breakwaters

Katsutoshi TANIMOTO\*

Nobutaka NAMERIKAWA\*\*

Yoshizumi ISHIMARU\*\*\*

Tsunehiro SEKIMOTO\*\*\*

## Synopsis

A new type of caisson which is suitable for application to relatively shallow water breakwaters has been developed and is called as a semi-circular caisson. The caisson consists of a base slab with short vertical walls and a semi-circular wall in the cross section. There are several variations in the semi-circular caisson structures: solid type having no perforation in the semi-circular wall, wave dissipating type having perforations in the front half of the semi-circular wall, and permeable type having perforations in the rear half of the semi-circular wall as well as the front half.

Hydraulic model experiments in a flume have been carried out on wave reflection and transmission due to random waves and wave forces due to regular and random waves. The formulae to calculate design wave forces are proposed in the present paper.

In particular, the solid type is excellent in the stability against waves, since the wave force on it is greatly decreased in comparison with wave force on an ordinary rectangular caisson. On the other hand, it has a disadvantage in the wave transmission, since high waves can overflow easily on the top. Consequently, the solid type is particularly suitable to offshore breakwaters for shore protection in marine recreation zone where some wave transmission may be allowed at the occasion of storms. Wave transmission can be decreased somewhat by making perforations in the rear half of the semi-circular wall and a wave chamber inside the wall.

In the wave dissipating type and the permeable type, a great part of the incident wave energy is dissipated to decrease wave reflection. However, relatively weak impulsive pressure is caused inside the wave chamber to increase slightly the resultant wave force comparing with that on the solid type. Therefore, these types are suitable for offshore breakwaters in the moderate wave condition and/or on the soft soil foundation.

**Key Words :** Breakwater, Semi-circular caisson, Wave reflection, Wave transmission, Wave force, Offshore breakwater

---

\* Director, Hydraulic Engineering Division

\*\* Former Senior Researcher of Coastal Development Institute of Technology

\*\*\* Members of Joint Study Group on Semi-circular Caisson Breakwaters

## 目 次

要 旨	3
1. ま え が き	7
2. 半円形ケーソンの構造的特徴	7
2.1 防波壁の基本形状と半円形断面構造	7
2.2 半円形ケーソンの構造	8
3. 実 験 の 概 要	9
3.1 実験水路および堤体模型	9
3.2 実験の種類および方法	10
3.3 不規則実験波の特性	11
4. 反 射 ・ 伝 達 波 特 性	12
4.1 基本型の反射・伝達波特性	12
4.2 消波型の反射・伝達波特性	13
4.3 透過型の反射・伝達波特性	14
5. 波 力 特 性	16
5.1 基本型の波力特性	16
5.2 消波型・透過型の波力特性	19
5.3 上部工がある場合の波力特性	21
6. 設 計 波 力 の 算 定 法	22
6.1 設計で考慮すべき波力の位相	22
6.2 ケーソン外周面に作用する波圧	22
6.3 ケーソン内部に作用する波圧	24
6.4 全波力	24
6.5 滑動実験による検討	27
6.6 部材検討に用いる波力	27
7. 試 設 計 例	29
7.1 設計の手順	29
7.2 試設計	29
7.3 施工法	30
8. む す び	30
参 考 文 献	31
主要記号一覧	31

## 1. まえがき

波の進行を阻止して静穏な海域を造成する防波堤は大波浪、軟弱地盤など苛酷な自然条件下での建設が宿命といえる。これに加えて、近年では低反射性、通水性などの性能のほか、景観などのソフト面を考慮した構造等、多様な要請に応えることも一層重要となってきた。特に、市民生活の場に近い水深の浅い所での構造物においては、そうしたソフト面での配慮が今後ますます重要化すると考えられる。

こうした背景のもとに、大波浪、軟弱地盤などのハードな面で有利な特長を持ち、かつソフト面での対応の可能性も秘めている半円形断面構造を沿岸構造物の一つの基本形としてとりあげ、これの実用化の検討を当所と、側沿岸開発技術研究センターおよび参画企業（五洋建設、大都工業、東亜建設工業、東洋建設、ピー・エス・コンクリート、若築建設の各株式会社）より成る半円形防波堤共同研究グループとの共同研究として実施してきた<sup>1)</sup>。共同研究は3か年計画であり、初年度の昭和60年度には海底に直接設置した半円形構造の基本的な水利特性を明らかにするための実験を行い、昭和61年度にはその結果を分析して設計波力の算定法を検討<sup>2)</sup>するとともに、試設計などによって実用化の可能性、問題点等を整理した。さらに、昭和62年度には、より現実的な構造を対象とした水利実験を行って、マウンドを有する場合の設計波力の算定法を検討<sup>3)</sup>するとともに、半円形防波堤の設計法と施工法に関するとりまとめを行った。本報告は、これらのうち半円形防波堤の水利特性と設計波力の算定法に関する実験的研究結果をまとめたものである。

## 2. 半円形ケーソンの構造的特徴

### 2.1 防波壁の基本形状と半円形断面構造

防波堤の第一義的機能は波の侵入を阻止することであり、その最も単純な方法は海水を遮断することである。この遮断面を防波壁と呼ぶ。防波壁の形状は断面的に見ただけでも限りなくあるが、筆者の一人は図-1に示した4種の基本形状をとりあげ、その特性や防波構造への応用を考察している<sup>4),5)</sup>。このうちa)の直立壁は直立堤や混成堤の直立部などの形で通常の防波堤として応用されている。この直立壁は海水を遮断するのに壁面長が最も短くて済むが、上から下まではほぼ同位相で水平波圧が働くので、その合力である水平波力が大きいという特徴がある。これに対し、b)~d)の斜面壁、凹曲面壁、凸曲面壁は壁面長は長くなるものの、波の峰のときいづれ

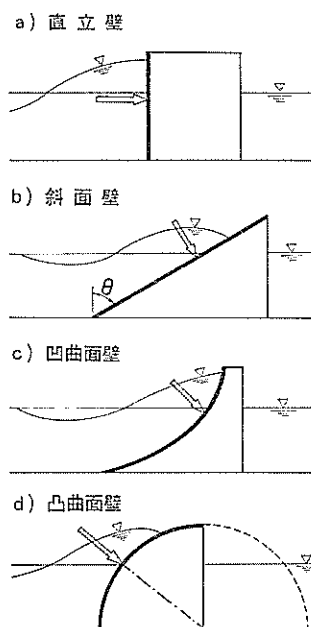


図-1 防波壁の基本形状

も鉛直下向きの波力成分が生じ、それが滑動に対する抵抗力を生むという特徴を有している。その意味で、これらの防波壁を取り入れた構造を、「波の力で耐える防波堤」と呼ぶことができ、斜面壁を取り入れた上部斜面ケーソン<sup>6)</sup>や凹曲面壁を取り入れたマルチセルラーケーソン<sup>7)</sup>などが既に研究開発されている。一方、凸曲面壁を取り入れたものとしては曲面スリットケーソン<sup>8)</sup>が実用化されている。これは通常の直立ケーソンの前に1/4円形の曲面スリット壁を取り付けたものである。

凸曲面壁の特長は半円形断面としたときに顕著に現われる。すなわち、半円形の防波壁体には、底面に働く揚圧力を除いて壁面に働く波圧はすべて円の中心に向かうから、合力も円の中心を通る。したがって、これによる底版面での回転モーメントは発生せず、わずかに揚圧力のみによるモーメントが生じるにすぎない。その結果、外力の偏心が小さく、地盤反力は等分布に近いものとなる。また、鉛直波力成分は前述のように壁体の安定性向上に寄与し、滑動波力が小さくなることから、全体の軽量化が図れる。こうした略等地盤反力型の構造は軟弱地盤上での防波堤としての活用の可能性があり、また高い耐波安定性を活かして、砕波帯の中の離岸堤としても向いている。特に、まえがきで述べたように、市民生活の場に近い水深の浅い所での構造物としては、今後景観などのソフト面での配慮がますます重要となると考え

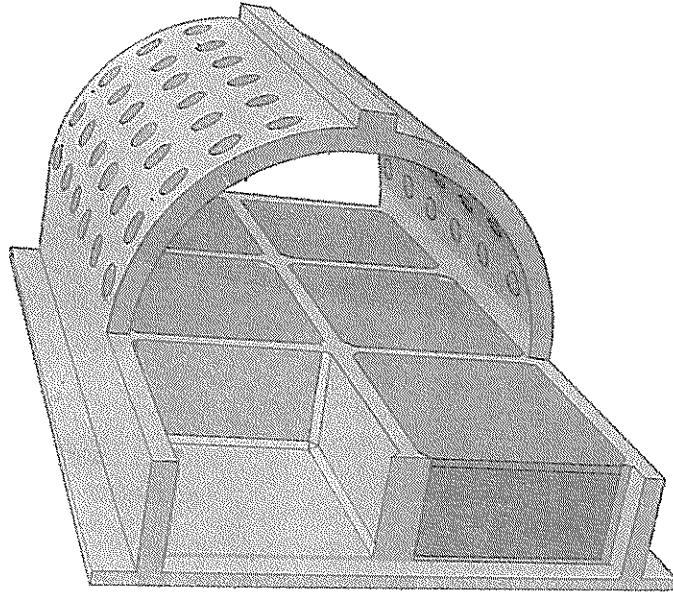


図-2 半円形ケーソン一般図

られる。そうした点からみれば、半円形断面構造は頂部が滑らかな曲面で圧迫感を与えず、沿岸構造物の一つの基本形ともなる。本研究はこうした半円形断面を取り入れた防波堤構造の水理特性を実験的に明らかにし、その開発に資するものである。

## 2.2 半円形ケーソンの構造

略半円形の防波壁を取り入れた壁体を総称して半円形ケーソンと呼ぶ。図-2は半円形ケーソンの一般図を示したものである。半円形ケーソンは一般には下部の直立壁部、上部の半円部、頂部の上部工から構成される。このうち、基本的なのは半円部であり、直立壁部や上部工は条件により付加されるものである。つまり、直立壁部は半円部の底版部とも見なすことができる。重量確保のための中詰めは直立壁部や必要によって半円部の下方にスペースを確保して行う。上部工は天端高確保や通路等のため必要によって設けるものであるが、これが大きいと後述するように波力特性が変化するので注意を要する。

半円形ケーソンは図-3～5に示しているように、曲面壁の孔の有無によって基本型、消波型、透過型に大別される。基本型（図-3）は曲面壁に孔のない構造で、壁体は不透過である。ただし、越波伝達波の軽減や揚圧力の軽減のため、曲面壁の後ろ半分や底版に孔を開けるといったバリエーションがある。これをそれぞれ背面消波型、揚圧力低減型と呼ぶ。

消波型（図-4）は曲面壁の前半分のみ孔があって、

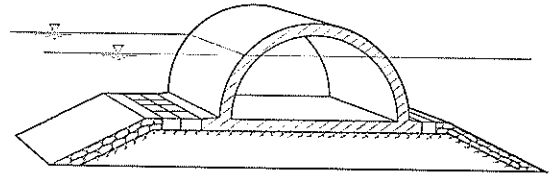


図-3 半円形ケーソン（基本型）

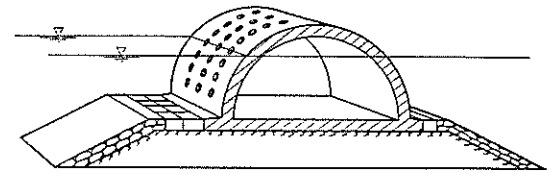


図-4 半円形ケーソン（消波型）

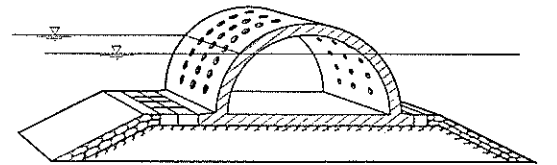


図-5 半円形ケーソン（透過型）

半円形ケーソン堤の水利特性に関する実験的研究

半円部内部の全部あるいは上方一部がいわゆる遊水室としての機能を発揮する構造であり、反射波や越波伝達波が軽減される。透過型(図-5)はさらに曲面壁の後ろ半分にも孔があつて、全体として通水性を有する構造である。図ではこれら3形式について半円部のみから成る場合を示しているが、直立壁部のある場合には複合型、上部工がある場合には上部工付きなどと呼ぶ。

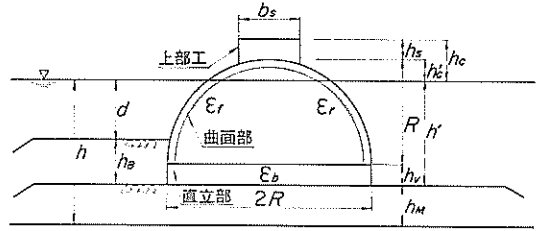


図-8 半円形ケーソン堤模型の一般図

3. 実験の概要

3.1 実験水路および堤体模型

(1) 実験水路

実験は昭和60年度と昭和62年度の2期にわたって行っており、それぞれ第I期実験、第II期実験と呼ぶ。実験に用いた水路はいずれも全長163m、幅1m、深さ1.5mの不規則波長水路である。ただし、第I期、第II期では水底床および堤体模型の設置位置等が異なっている。すなわち、第I期では、図-6に示しているように、水路延長の中央付近に木製の仮設床を設けて、堤体模型の設置位置を造波板から95.5m地点としたもので、仮設床面の嵩上げは固定の水平床から60cmである。また、堤体前方の水底勾配は1/100である。

これに対し、第II期の実験は図-7に示しているように、水路の端部に設けてある砂詰め表面モルタル塗りの仮設床を用いたもので、堤体設置位置は造波板から143.8m地点、そこでの床面の嵩上げは65cmである。また、

この場合の前方水底勾配は1/50である。

(2) 堤体模型

図-8に堤体模型の一般図を示す。ここに、 $h$ は堤体の設置水深、 $h_M$ はマウンドの厚さ、 $h_B$ は沖側におけるマウンド被覆材の厚さ、 $d$ はマウンド被覆材天端上の水深、 $h'$ は半円形ケーソンの基面(底面)水深、 $h_v$ は直立部の高さ、 $R$ は半円部の外寸半径、 $h_c'$ は半円部頂点の静水面上高さ、 $h_s$ は半円部頂点からの上部工の厚さ、 $h_c$ は静水面上の上部工を含めたケーソン天端高、 $b_s$ は上部工の天端幅である。また、半円部の前側半分と後ろ側半分の開口率および底版の開口率を $\epsilon_f$ 、 $\epsilon_r$ 、 $\epsilon_b$ と表記し、それぞれ前面開口率、背面開口率、底版開口率と呼ぶ。開口率はそれぞれの対象域の外周展開面積に対する開口部の面積の比で定義している。ケーソンの底面積は全ケースについて半径の2倍、すなわち $2R$ としてい

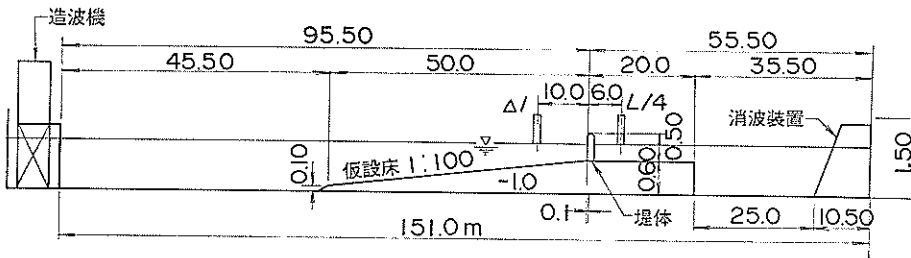


図-6 実験水路(第I期)

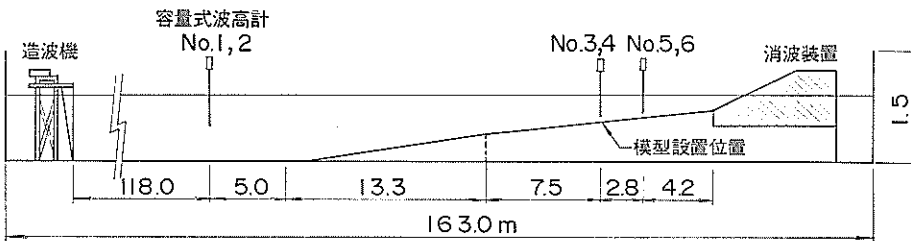


図-7 実験水路(第II期)



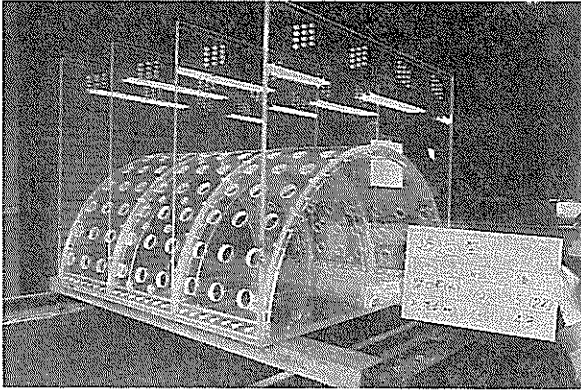


写真-1 半円形ケーソン模型（第Ⅰ期実験，透過型）

表-1 構造条件（第Ⅱ期実験）

	$h_u$	$h_s$	$\varepsilon_f$	$\varepsilon_r$	$\varepsilon_b$	
I	5	0	0	0	0	基本型①
II	5	0	0	0.25	0	基本型②
III	5	0	0	0.25	0.05	基本型③
IV	5	0	0	0.25	0.10	基本型④
V	5	0	0	0.25	0.20	基本型⑤
VI	10	0	0	0.25	0.20	基本型⑥
VII	5	5	0	0.25	0.20	基本型⑦
VIII	5	0	0.25	0	0	消波型①
IX	5	5	0.25	0	0	消波型②
X	5	0	0.25	0.05	0	透過型①
XI	5	0	0.25	0.05	0.20	透過型②
XII	5	5	0.25	0.05	0.20	透過型③

る。

第Ⅰ期の実験は直立部や上部工のない完全な半円形ケーソンを水底に直接設置する形式を対象としたもので、半径  $R$  は 50cm の 1 種、前面開口率  $\varepsilon_f$  は 0~0.3、背面開口率  $\varepsilon_r$  は 0~0.15 の範囲で適当に組み合わせている。写真-1 はその透過型の模型を例示したものであるが、ケーソンはすべてアクリル合成樹脂板で製作している。なお、写真にみられる波の進行方向に平行な 4 枚の鉛直板は模型を全波力計に固定するためのものである。

第Ⅱ期の実験はマウンドの上に設置する混成堤形式を対象としたもので、半円形ケーソンも直立部を有した複合型である。半径  $R$  は 25cm の 1 種であるが、鉛直部の高さ、開口率等を種々に組み合わせている。表-1 はその組み合わせ条件の一覧である。この第Ⅱ期の実験で

は、後述するように滑動実験を行うため、底版（直立壁部）のみモルタル（滑動面）および鉄板で製作し、その上にアクリル合成樹脂板製の半円部模型を取り付けるようにしてある。このほか、構造条件としてはマウンドの厚さ  $h_M$  および前肩幅  $B_M$  はそれぞれ 10cm、32cm で一定とし、前面のマウンド被覆材（空隙率 50% の消波ブロック模型）の厚さ  $h_B$  を 10.7cm を標準として、ケーソンの構造条件を限って 0、6.7cm に変化させている。

### 3.2 実験の種類および方法

#### (1) 第Ⅰ期実験

前述したように実験は第Ⅰ期と第Ⅱ期に分けられ、第Ⅰ期は完全な半円形ケーソンを海底に直接設置する形式を対象としたものである。実施した実験の種類は次の 2 種である。

- ① 反射・伝達波実験
- ② 波力実験

このうち、①は不規則波に対する反射率・伝達率を測定したもので、水深  $h$  は 30、33、36cm の 3 種類である。不規則波の目標スペクトルは Bretschneider・光易型で、1 波群の有効波数は 200 波程度とし、有義波周期  $T_{1/3}$  は 0.85~4.53 s の範囲で 6 種、波高レベルはそれぞれの周期条件で 3 種に変化させた。

反射率  $K_R$  は堤体前方 10m 地点での 2 台の容量式波高計による水位記録から入射波の分離計算を行うことにより算出している。また、伝達率は堤体背後約 6 m 地点で 2 台の容量式波高計で測定し、伝達率  $K_T$  は予め検定で求めた入射有義波高に対する伝達波の有義波高（2 測点での平均値）の比で定義している。

②の波力実験は 4 個の二分力検出器を用いた全波力測定装置および超小型波圧計（12~30 個）を使用して、ケーソンに働く全波力（水平および鉛直分力）と局所的に働く波圧を同時に測定したものである。実験波は周期  $T=1.13\sim 3.69$  s の 4 種の規則波で、波高  $H$  をそれぞれ 4 種に変化させている。水深  $h$  は 33cm の 1 種である。

#### (2) 第Ⅱ期実験

第Ⅱ期の実験は混成堤複合型を対象としたもので、実験の種類は次のとおりである。

- ① 反射・伝達波実験
- ② 波圧実験
- ③ 滑動実験

①の反射・伝達波実験は第Ⅰ期の実験と同様な手法で行ったもので、水深  $h$  は 30、35、40cm の 3 種に変化させている。実験波は 1 波群約 250 波の不規則波で、有義

表-2 実験条件 (第II期実験)

$h$	30			35			40			
	$h_B$	0	6.7	10.7	0	6.7	10.7	0	6.7	10.7
I			○			○				
II			●			○				
III						○				
IV						○				
V	○	○	○	○		○				○
VI						○				○
VII			○	○	○	○				○
VIII			○		○	○				
IX			○		○	○				○
X			○		○	○				
XI			○		○	○				
XII					○	○				○

○反射・伝達波実験 22×(周期5×波高3)  
 ◎波圧実験 16×(周期5×波群3)  
 ●滑動実験 5×(波高5×波群3×重量3)

波周期は1.0~3.2 sの範囲で5種、波高レベルはそれぞれ3種である。また、入射波分離計算用の波高測定を中心位置は堤体前方25.8m地点、伝達波測定を中心位置は堤体後方2.8m地点である。

②の波圧実験は超小型波圧計15個によってケーソン各部の波圧を測定したものである。水深 $h$ は30cmを中心に一部35cmとしている。実験波は不規則波で、有義波周期 $T_{1/3}$ が1.4, 2.0, 2.6sの3種、それぞれ波列の異なる3波群を用い、波高レベルは砕波を含む1種に限っている。これは不規則波実験では一つの波群によって様々な波高の波が含まれることによる。

③の滑動実験は条件を絞って、不規則波の作用によるケーソンの滑動量を測定したものである。実験波の有義波周期は2.6sの1種(波列の異なる3波群)であるが、波高レベルは5種程度に変化させている。また、ケーソンの重量も3種に変化させている。

第II期のケーソンの構造条件(前出の表-1)ごとの実験条件の一覧は表-2のとおりである。

3.3 不規則実験波の特性

今回の実験に用いた不規則波の特性を第II期の滑動実験に用いた波群を例に述べる。

堤体模型を設置しない状態で前出の図-7に示しているように沖側(Nos. 1, 2)、模型設置予定位置(Nos. 3, 4)およびその背後(Nos. 5, 6)で通過波高を測定した。図-9は沖側における有義波高 $H_{1/3}$ \*と模型設置予定

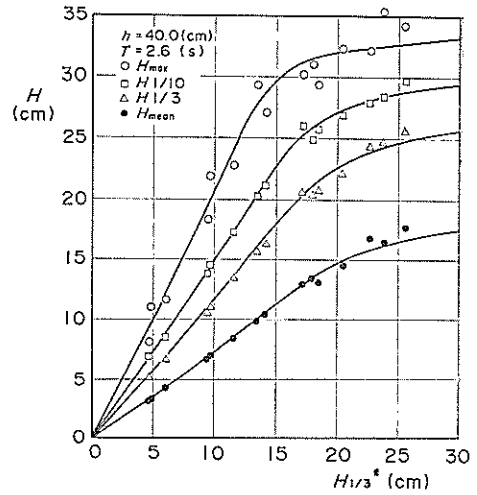


図-9 沖側測点と堤体位置測点での波高の関係 ( $T_{1/3}=2.6$ s)

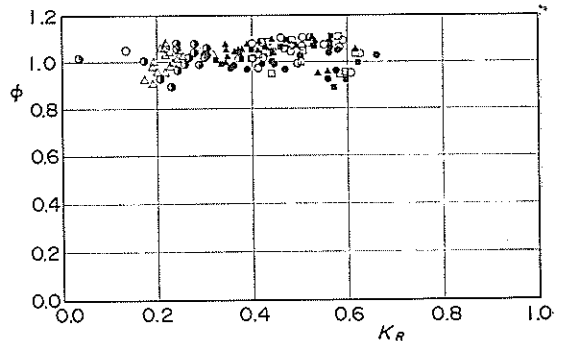


図-10 反射率と波高増大率

位置における代表波高( $H_{max}$ ,  $H_{1/10}$ ,  $H_{1/3}$ ,  $H_{mean}$ )の関係を例示したものである。堤体位置での水深は40cm、沖側位置での水深は105cmである。図中の曲線は合田の砕波変形モデル<sup>9)</sup>による計算結果である。最高波高 $H_{max}$ については本来の統計的変動性のためばらついてはいるものの、全体に実験値と計算値はよくあっており、沖側波高と堤体位置での入射波高の関係、および堤体位置での入射波の代表波高間の関係は、合田の砕波変形モデルで推定できる。

一般に、水路における不規則波実験では、造波板による再反射波の影響による波高増大が問題となる<sup>10)</sup>。図-10は沖側測点における波高増大率 $\phi$ を、堤体の反射率 $K_R$ に対しプロットしたものである。ここに、波高増大率 $\phi$ は次式で定義している。

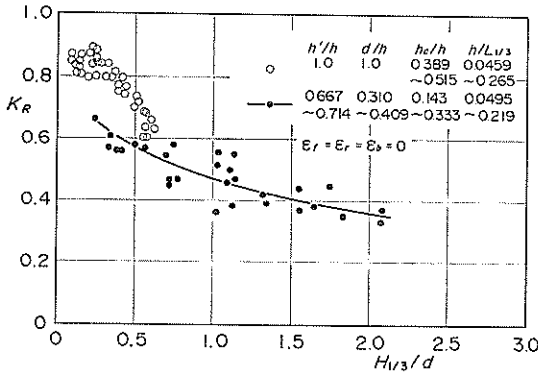


図-11 基本型の反射率

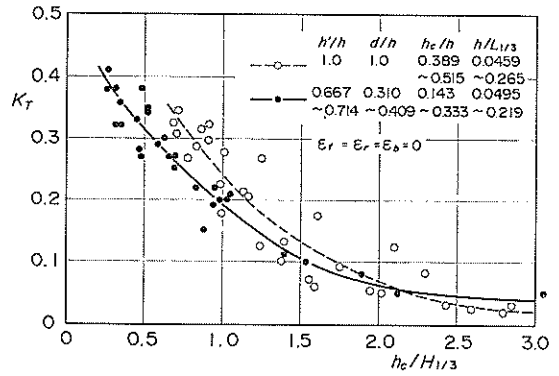


図-12 基本型の伝達率 ( $\epsilon_r=0$ )

$$\phi = \frac{H_{1/3}(\text{堤体設置後の分離入射有義波高})}{H_{1/3}(\text{堤体設置以前の通過有義波高})}$$

これによると、 $\phi$ は反射率にあまり関係なく0.9から1.1程度の範囲に分布している。これは、本実験が比較的粗度の大きい長水路で行われており、波高の減衰の大きいことが主因と考えられる。このように、造波板による再反射波の影響は10%以内と推測されるので、今回の実験ではこれを無視し、結果の表示では堤体設置以前の波の諸元をそのまま用いることにした。

#### 4. 反射・伝達波特性

##### 4.1 基本型の反射・伝達波特性

反射・伝達波の特性については、第I期および第II期実験の結果を併せて示す。

図-11は基本型 ( $\epsilon_r = \epsilon_r = \epsilon_b = 0$ ) の反射率  $K_R$  を示したものである。横軸には、砕波の程度を表すパラメータとしてマウンド被覆工天端上の水深に対する入射有義波高の比  $H_{1/3}/d$  をとっている。図中の○印は第I期実験つまりマウンドのないもの、●印は第II期実験つまりマウンドのあるものを表す。全体的な傾向としては、 $H_{1/3}/d$  が大きくなるにつれて、つまり砕波の影響が顕著になるにつれて、エネルギーが消費されるため、反射率が小さくなっている。また、マウンドがある場合は、ない場合に比べて反射率が小さい。これはマウンドによって砕波が助長されるほか、マウンドによるエネルギーの消費およびマウンド透過波があることによる。マウンド有りの場合の反射率は  $H_{1/3}/d$  が1.5程度では0.4程度であり、通常の直立ケーソン式混成堤に比べて小さい。

図-12は伝達率  $K_T$  を示したもので、相対天端高  $h_c/H_{1/3}$  を横軸にとってプロットしてある。これより  $K_T = 0.2$  となる相対天端高は、マウンドがない場合で1.2、あ

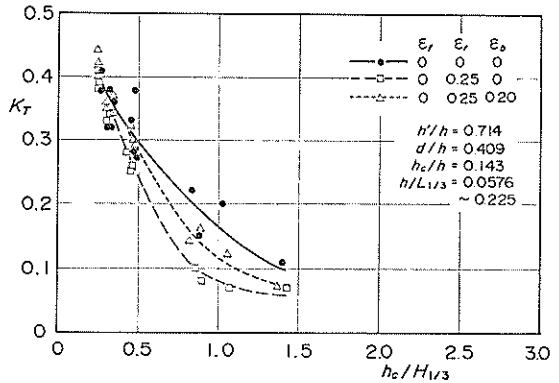


図-13 背面消波による伝達率の低減 (第II期実験)

る場合で1.0程度である。これに対する通常の混成堤の相対天端高が0.6程度であるので、ほぼ同じ伝達率とするためには天端高を高くしなければならない。

そこで、比較的低下端であっても伝達率を抑えられないかということが課題となる。これに関しては運輸省第一港湾建設局が上部斜面ケーソンに対し、背後に透過壁と遊水室による消波機構を設けることを検討したことがある。つまり、背後の消波機構によって越波伝達波を小さくしようという考え方であって、これを当該構造物に適用すると、背面に孔を開けて越波の勢力を減じることができるのではないかというアイデアが浮かぶ。これを背面消波型と呼ぶ。

図-13は後半分に孔を開けた場合 ( $\epsilon_r = 0.25$ ) の伝達率を孔を開けない場合と併せて示したものである。他の条件はまったく同じである。これによると、背面消波することによって伝達率は小さくなり、底版に孔のない場合 ( $\epsilon_b = 0$ ) には  $h_c/H_{1/3} = 0.8$  程度のとき、背面消波でないものに比べ、50%程度に小さくなっている。底版

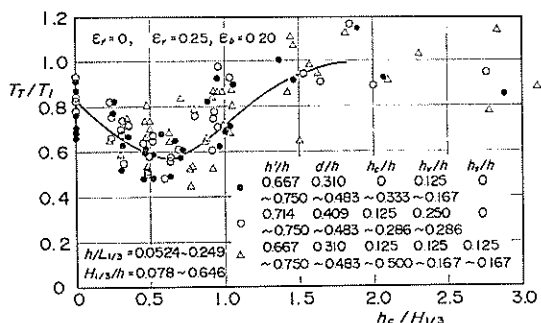


図-14 伝達波の有義波周期 (第II期実験, 基本型)

に孔を開けた場合 ( $\epsilon_b=0.2$ ), そこからの透過波のため伝達率は大きくなるが,  $h_c/H_{1/3}$ が0.5以上では逆効果になることはない。基本型の場合, 後述するように耐波安定性がよく, 半円形内部全体を中詰めする必要のないことが多いことから, 一般に背面消波の形式とするのがよいといえる。なお, ここでは示していないが, 反射率や伝達率への直立部の高さや上部工の影響は顕著でない。

伝達波は波高ばかりでなく, その周期も変化する。図-14は第II期のマウンドがある場合の実験結果 ( $\epsilon_r=0.25, \epsilon_b=0.20$ ) による入射波と伝達波の有義波周期の比を示したものである。伝達波は越波によるものとマウンドを透過するものの合成であり, 周期比はその両者の兼合いによって極小値を持つような変化となっている。すなわち, 相対天端高が小さい領域では越波が主体である。相対天端高が0から大きくなるにつれて, 間欠的な越波による打ち込みが強くなるため, 波が割れて伝達波の周期は短くなる。本構造の場合データは非常にばらついているが,  $h_c/H_{1/3}=0.7$ 程度で周期比は最小の0.6程

度となっている。これより高くなると増大し, 1.0に漸近している。相対天端高が0.7程度で極小となる傾向は通常の混成堤<sup>5)</sup>でも同様である。

#### 4.2 消波型の反射・伝達波特性

消波型の反射・伝達特性は基本型の場合の主因子である  $H_{1/3}/d$  や  $h_c/H_{1/3}$  のほか, 前面開口率や遊水室幅などによって変化する。図-15は横軸に相対遊水室幅  $b_0/L_{1/3}$  をとって反射率  $K_R$  を示したものである。ここに,  $b_0$  は静水面におけるケーソンの外縁幅,  $L_{1/3}$  は有義波の波長である。□, ○, △印は第I期実験, すなわちマウンドのない状態での  $\epsilon_f$  が0.30, 0.20, 0.10の結果を示しているが,  $\epsilon_f=0.20$  で  $b_0/L_{1/3}=0.10$  のとき, 最小反射率0.3程度となっている。+印はマウンドを設けた第II期の実験結果を示している。反射率は全体に小さく0.4程度以下である。これは低天端で越波が多いことにもよるが,  $d/h$  が0.310~0.409と小さく, マウンドによる消波効果が大きいものと推測される。

一方, 図-16は伝達率を示したものである。第I期の実験では, 伝達率は  $\epsilon_f$  が大きいほど小さくなる傾向にある。第II期の結果はばらつきが大きいけれども, やや小さい。  $K_T=0.2$  となる相対天端高は, マウンドがない場合で  $\epsilon_f=0.1$  のとき0.9程度,  $\epsilon_f=0.2\sim0.3$  のとき0.8程度である。マウンドがある場合には  $\epsilon_f=0.25$  で0.6程度となっており, 通常の混成堤とはほぼ同じである。

図-17は  $b_0/L_{1/3}$  を横軸にとって, エネルギー消費率  $K_L^2$  をプロットしたものである。ここに, エネルギー消費率は次式で定義している。

$$K_L^2 = 1 - K_R^2 - K_T^2 \quad \dots\dots(1)$$

エネルギー消費率は全般に高く0.5以上であり, 特に第II期のマウンド有りでは0.8以上である。

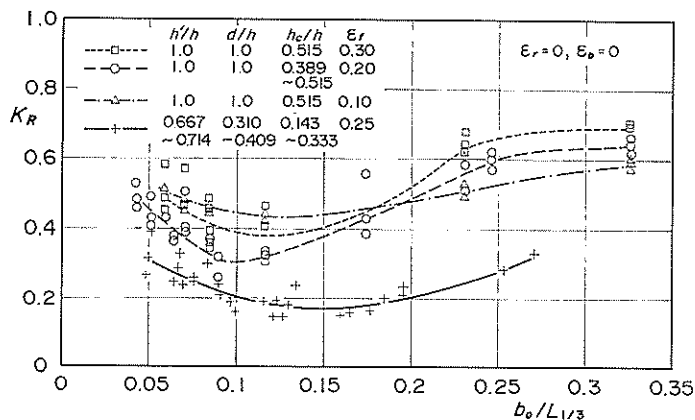


図-15 消波型の反射率

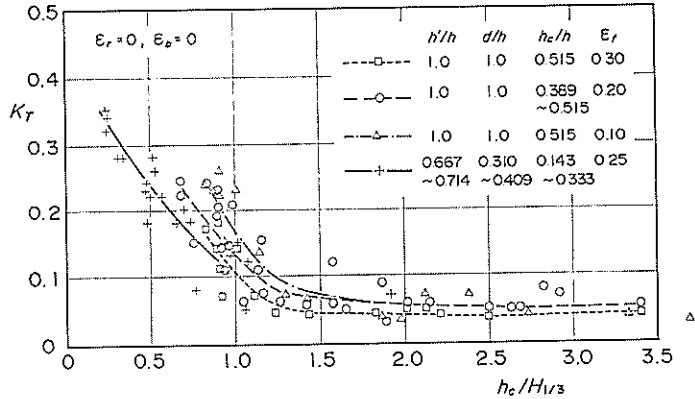


図-16 消波型の伝達率

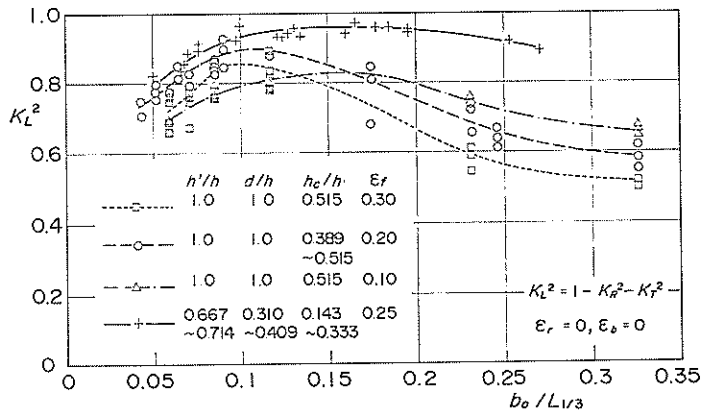


図-17 消波型のエネルギー消費率

伝達波の周期の変化は基本型の場合とほぼ同じ傾向であるが、極小値は0.5程度とやや小さい。また、直立壁部の高さや上部工の影響についても基本型と同様顕著でない。

#### 4.3 透過型の反射・伝達波特性

透過型の反射・伝達波は前後の開口率の組み合わせによって一層複雑になる。図-18, 19は一例として第I期実験の  $\epsilon_f=0.20$  の場合の反射率と伝達率を示したものである。 $\epsilon_r$ を0~0.15の範囲で変化させているが、反射率は  $\epsilon_r$ が大きいほど、伝達率は  $\epsilon_r$ が小さいほど、小さくなる傾向にある。図-20はこうした結果から  $h_c/H_{1/3}=1.0$  の条件に限って前後の開口率の種々の組み合わせによるエネルギー消費率  $K_L^2$  (ばらつきの平均値) と伝達率  $K_T$  を背面開口率  $\epsilon_r$  に対しプロットしたものである。エネルギー消費率は  $\epsilon_r$ の増大とともに極大値を持つ変化を示すが、 $\epsilon_r \leq 0.05$  であれば  $K_L^2$  は0.7以上と

高い。一方、伝達率  $K_T$  は  $\epsilon_r$ の増大とともに大きくなる。エネルギー消費率が最大となるのは  $\epsilon_f=0.20$ ,  $\epsilon_r=0.025$ の組み合わせで、このとき  $K_L^2=0.8$ ,  $K_T=0.2$ である。

図-21, 22は第II期実験によるマウンドがある場合のエネルギー消費率、および反射・伝達率を示したものである。 $\epsilon_f=0.25$ ,  $\epsilon_r=0.05$ の条件で、上部工有り、無し両方の結果を併せてプロットしてあるけれども、エネルギー消費率や反射率に対する上部工の有無による変化は小さい。エネルギー消費率は  $b_0/L_{1/3}$  とともにやや増大傾向にあり、 $b_0/L_{1/3}$  が0.1以上では0.8以上である。反射率は0.1~0.4と非常に小さい。伝達率は構造条件によってやや異なっており、実験の範囲では0.2~0.5である。さらに、図-23は周期比を示したものであるが、相対天端高  $h_c/H_{1/3}$  が1.5程度以上では、透過波が完全に卓越するため、1以上となっている。

半円形ケーソン堤の水理特性に関する実験的研究

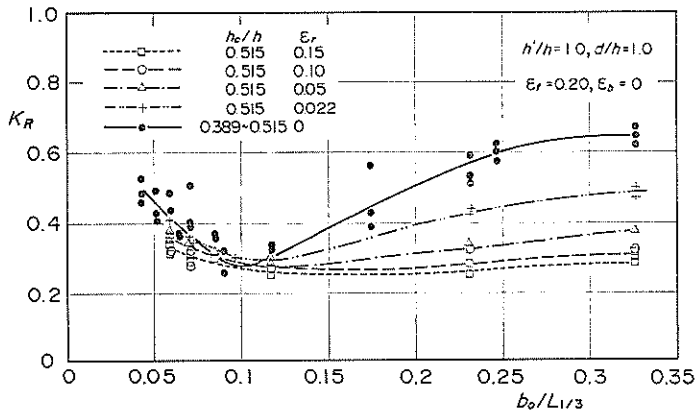


図-18 透過型の反射率 (第I期実験)

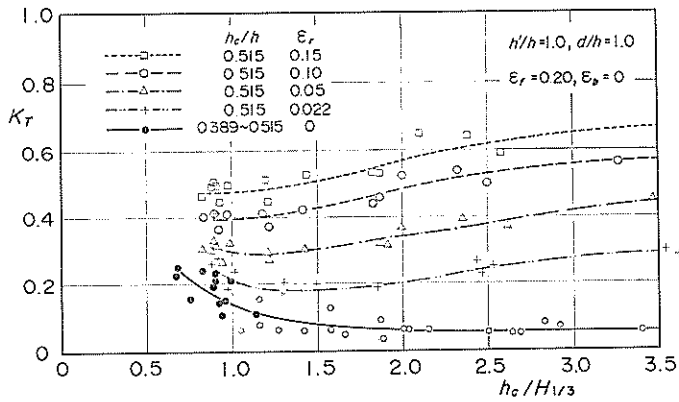


図-19 透過型の伝達率 (第I期実験)

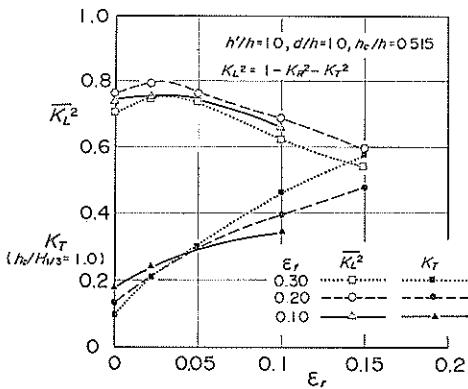


図-20 背面開口率によるエネルギー消費率と伝達率の変化 (第I期実験)

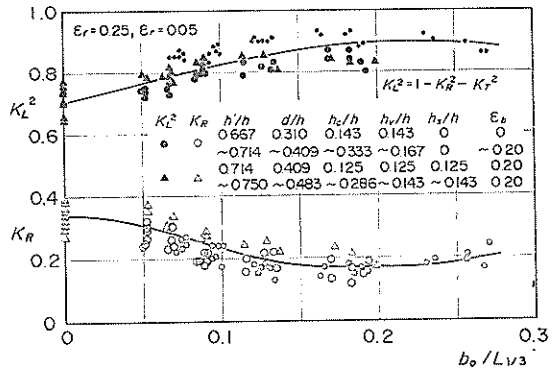


図-21 透過型のエネルギー消費率と反射率 (第II期実験)

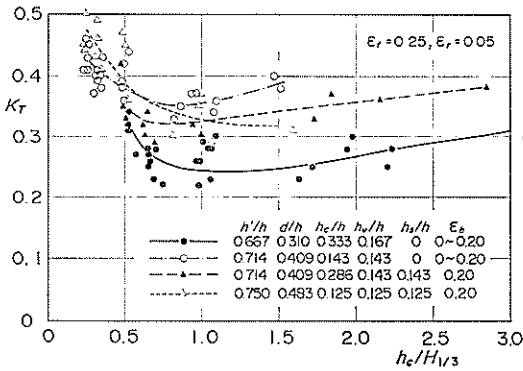


図-22 透過型の伝達率 (第II期実験)

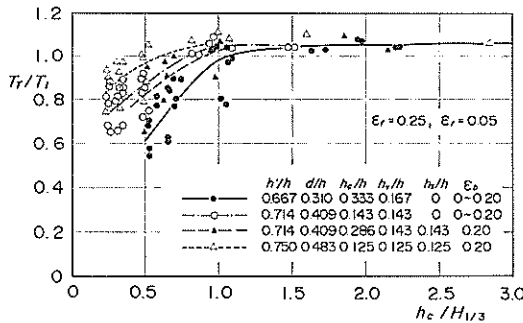


図-23 伝達波の有義波周期 (第II期実験, 透過型)

## 5. 波力特性

### 5.1 基本型の波力特性

#### (1) 波圧の記録例と特徴

図-24 は第I期実験 (完全半円形断面, 無マウンド) における  $T=2.83\text{ s}$ ,  $H=24.5\text{ cm}$  の入射波が基本型に作用したときの波圧や全波力の測定記録の例である。左側の記録は曲面前壁各測点での波圧で、位置によって大きさのみならず、ピークの起時に違いがあることがわかる。一方、右側の上から2番目の  $f_H$  は全水平波力を受圧投影面積  $Rl$  ( $l$ : ケーソンの延長方向の長さ) で割った水平平均波力強度 (背後に押す方向を正とする)、3番目の  $f_V$  は全鉛直波力を受圧投影面積 ( $2Rl$ ) で割った鉛直平均波力強度 (上向きを正とする) である。4番目と5番目の  $f_U$  と  $f_{CV}$  はそれぞれ底面に働く揚圧力と曲面壁に働く波力の鉛直成分の同様な平均強度であり、次の関係にある。

$$f_Y = f_U + f_{CV} \quad \dots\dots(2)$$

一番上の  $f_S$  は次式で表される滑動合成波力強度である (完全半円形の場合)。

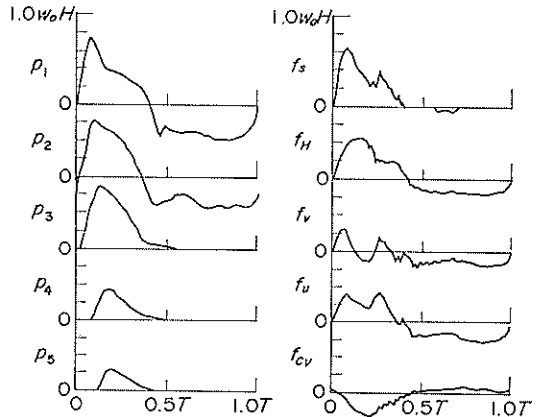
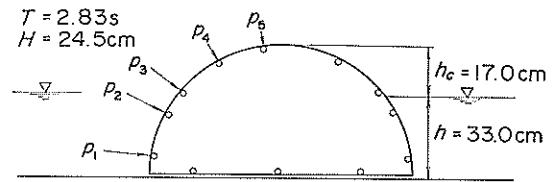


図-24 波圧および全波力の時間変化の例 (第I期実験, 基本型)

$$f_S = f_H \pm 2\mu f_V \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 $\mu$  は摩擦係数で、計算では 0.6 を用いている。この滑動合成波力はケーソンの抵抗力がこれより小さいと滑動が生じることを表す。つまり、 $f_S$  が最大のときが滑動に対し最も危険なときで、この例の場合底面に働く揚圧力が最大のときに一致している。このとき、水平波力は最大のやや前であるけれども、なだらかなピークが継続しており最大値と大差ない。鉛直波力は曲面壁に働く下向きの波力成分と底面に働く揚圧力が相殺して、水平波力最大時にほぼ 0 であることが特徴的である。

図-25 (a), (b) は第II期実験 (有マウンド) の不規則波による水位・波圧記録を例示したものである。上部工なしで、半円形の下直立部の高さ  $h_V$  は 5.0 cm であり、底版の開口率  $\epsilon_b$  は 0 であるが、曲面部後半分には  $\epsilon_r = 0.25$  の孔が開けてある。マウンドの被覆厚さ  $h_B$  は 10.3 cm,  $d/h$  は 0.40 となる。波浪条件は、 $T_{1/3} = 2.6\text{ s}$ ,  $H_{1/3} = 20\text{ cm}$  で、5 波程度間の記録例であり、相対天端高  $h_c/H_{1/3}$  は 0.25 である。波圧の測点位置は図の (b) に示してあり、図の (a) はケーソンの外周辺、(b) はケーソン内部での記録である。いずれも、最上段にはケーソン直前 (波の入射側) での水位記録を示してある。半円部外周面に作用する波圧には、図-24 の例と同様にピークに位相差が認められ、背面にも越波による波圧が作用

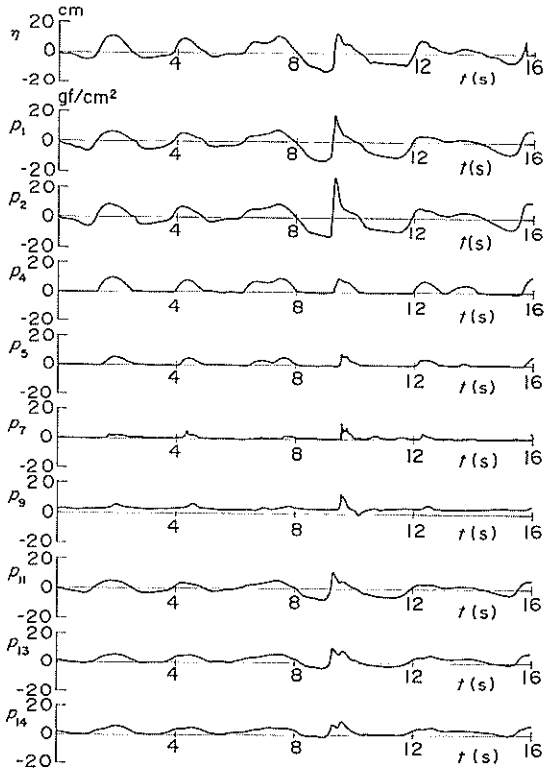


図-25(a) 不規則波圧の記録例 (第Ⅱ期実験, 基本型)

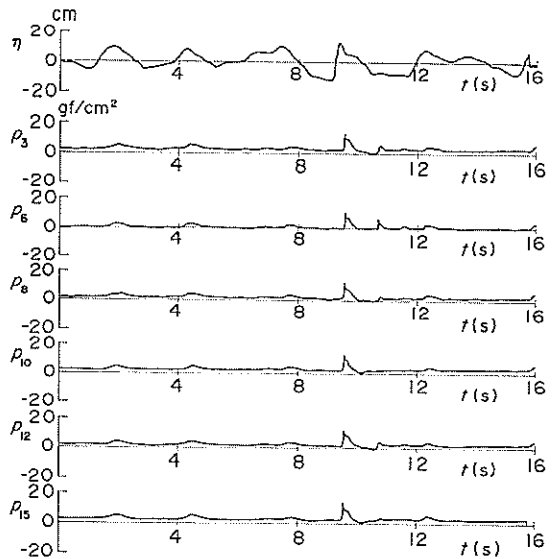


図-25(b) 不規則波圧の記録例 (Ⅱ前期実験, 基本型)

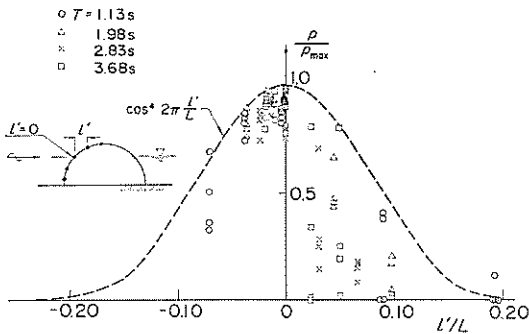
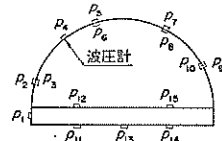


図-26 水平波力最大時における曲面壁前半分の波圧分布 (第Ⅰ期実験, 基本型)

している。さらに、背面孔を通して内面にも波圧が作用しているが、これは部材力としては外側の波圧と相殺する傾向にある。底版下面に働く揚圧力は、波高が大きいとき、越波による背後からの圧力伝播のためか、二山形の時間変化を示しているのが認められる。

(2) 水平波力最大時の波圧分布

図-26 は第Ⅰ期実験の結果から、水平波力が最大とな

るとき、曲面壁前半分の波圧分布を示したものである。ここに、横軸は静水面と曲面壁の交点からの各測点位置までの水平距離  $l'$  (岸向きへ正) と入射波の波長  $L$  との比、縦軸は、各測点での波圧  $p$  と分布における最大波圧  $p_{max}$  との比で、それぞれ無次元化してある。最大波圧は静水面付近で発生し、特に静水面上で急激に小さくなる変化を示している。図中の破線は式(4)の関係を示したものであるが、データの包絡線に相当している。

$$p/p_{max} = \cos^4(2\pi l'/L) \quad \dots(4)$$

(3) 揚圧力の低減

半円形ケーソンに働く揚圧力強度は前面が直立壁でないため減少するけれども、底版が広いために全揚圧力としては決して小さくない。これらの低減工法を検討するため、第Ⅱ期実験において底版(直立部)の開口率  $\epsilon_0$  を 0, 0.05, 0.1, 0.2 に変化させて波圧を測定した。孔は底版の前半部および後半部に一様にスリット状に開けたもので、半円部の内部に連通している。さらに、背面曲面壁にも孔 ( $\epsilon_r=0.25$ ) が開いているので、底版の下の水は半円内部(遊水室)およびケーソン背後へ流れることができる。これによって、底版に働く揚圧力を減じる



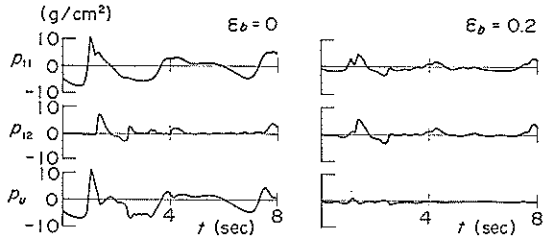


図-27 底版に働く波圧の時間変化の例(第二期実験, 基本型)

ことができないかと考えたものである。

図-27は底版前半分中央での波圧波形を  $\epsilon_b = 0$  と  $0.2$  の条件に対し例示したものである。それぞれ上から底版(直立部)の下面, 上面での波圧, およびその差圧(上向きを正)の時間変化である。 $\epsilon_b = 0$  であっても, 越波打ち込みによって曲面壁背面の孔からの擾乱があるので, 上面の圧力が変動しているが, その程度は下面に働く波圧に比べて小さい。これに対し,  $\epsilon_b = 0.2$  の条件では, 下面に働く波圧が著しく減少し, 差圧はほとんど0に近くなる。これは前述したように底版の下の水は遊水室, さらにケーソン背後へと連通しており, 波の作用によってその系統での全体としては弱い流れが発生し, 底版にはそうした弱い流れの場での圧力しか作用しないことによると考えられる。

図-28(a), (b)は半円形ケーソンに働く水平波力が正(岸方向)のピークとなるときの底版下面および上面での波圧の代表値(最大値, 1/10最大平均値, 1/3最大平均値)をそれぞれ対応する入射波の代表波高(最高波高, 1/10最大平均波高, 有義波高)に対しプロットしたものである。下面では  $\epsilon_b$  が大きくなるにつれて小さく, 上面ではやや大きくなる傾向がみられる。ここには示していないけれども,  $\epsilon_b$  が0.1以上では差圧はほとんど0と考えてよいようである。

(4) マウンド被覆厚さの影響

通常の混成堤では, 高マウンド化するにつれて, 異常に大きい衝撃碎波力が作用するようになる。そのため, 水深の比較的浅い碎波帯でかつ波を直角に受けるような場合には通常の混成堤は成り立たない。しかし, 半円形ケーソンは波力を直立面で受ける構造ではないので, 強力な衝撃碎波力を避け得るものと期待される。これを検証するため, 第二期実験において基本型 ( $\epsilon_f = 0$ ,  $\epsilon_r = 0.25$ ,  $\epsilon_b = 0.2$ ,  $h_0 = 5\text{cm}$ ,  $h_s = 0\text{cm}$ ) を対象として, マウンド被覆材の厚さを変え,  $d/h$  で  $0.31 \sim 0.67$  の範囲で波圧を測定した。

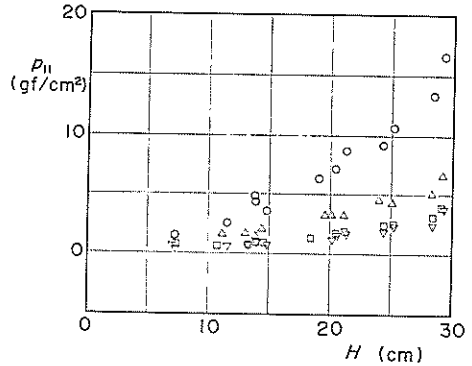


図-28(a) 底版下面に働く波圧(記号は図-28(b)に同じ)

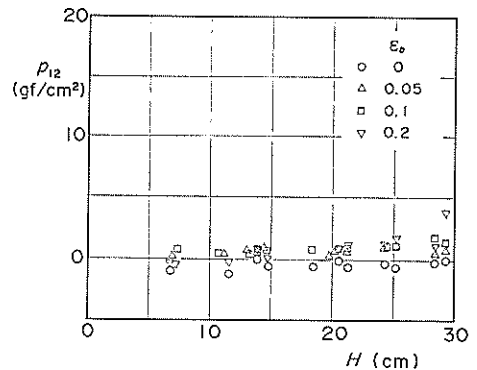


図-28(b) 底版上面に働く波圧

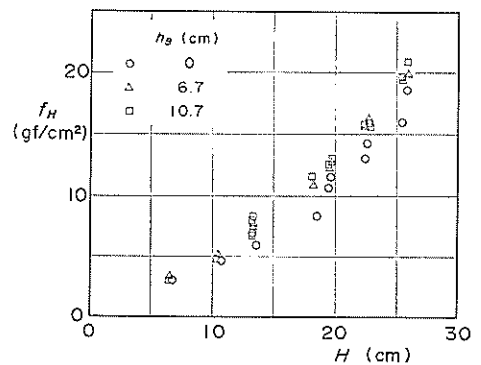


図-29 波高と水平平均波力強度の関係(第二期実験, 基本型)

図-29はその結果による代表波高と水平波力の代表値の関係をプロットしたものである。ただし, 水平波力はケーソンの全高で割った平均波力強度  $f_H$  の形にしてある。これによると, 波力は  $d/h$  の違い(図中の被覆厚さ

$h_B$ の違い)にかかわらずほぼ同程度で、通常のケーソンの場合のように異常な増大は認められない。ちなみに、 $h_B=0$ の状態を標準として、合田式で計算される  $p_1$  (静水面での波圧強度) の値どうしを比較してみると、 $h_B=6.7\text{cm}$  のとき約1.4倍、 $h_B=10.7\text{cm}$  のとき約1.7倍にもなる。すなわち、波圧係数  $\alpha_2$  の影響が顕著なわけであるが、半円形ケーソンの場合にはそれを考慮する必要がないといえる。

5.2 消波型・透過型の波力特性

(1) 波圧の記録例と特徴

消波型の場合には前面に孔があるため、ケーソン内部にも大きな波圧が作用する。図-30は前出の図-24と同条件で消波型 ( $\varepsilon_f=0.2$ ) に作用する波圧および波力強度 ( $f_H$ のみ) の記録例である。外側に働く波圧には添字  $o$ 、内側の波圧には添字  $i$  を付けて区別してある。この場合の著しい特徴は、記録に10数ヘルツの振動が発生することである。これは実験における観察によって、外側波面が開口部を覆った瞬間に、内部上部に波面が当たっていても発生することが確かめられていることから、内部に閉じ込められた空気の圧縮を介した衝撃圧力であると考えられる。こうした空気圧縮による衝撃圧は大きさは減じるけれども背面側の孔を静水面以下にのみ開けた透過型にも現れる。

一方、図-31(a), (b)は前出図-25と同条件での第II期実験の記録例である ( $\varepsilon_f=0.25$ ,  $\varepsilon_r=\varepsilon_b=0$ )。図の(a)に示したケーソン外側に働く波圧は基本型とほぼ同じであるけれども、(b)の内部に作用する波圧は当然のことながら基本型に比べて大きくなっている。しかし、第I期実験に認められたような顕著な振動は発生していない。こ

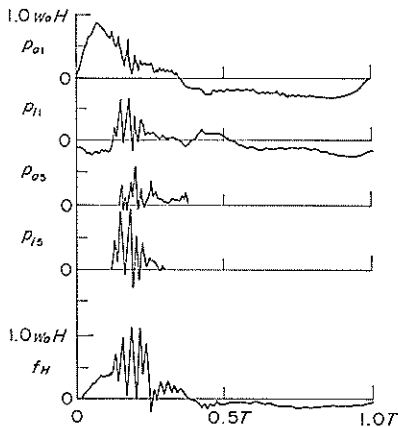


図-30 波圧および全波力の時間変化の例 (第I期実験, 消波型)

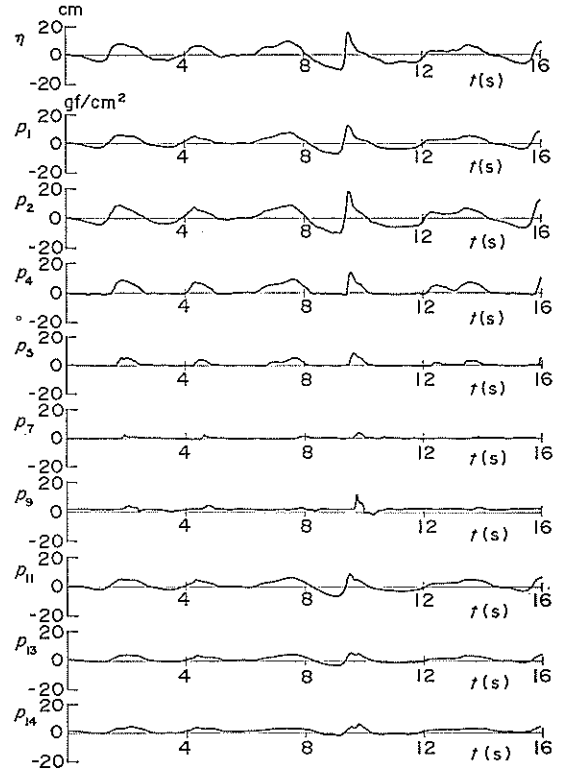


図-31(a) 不規則波圧の記録例 (第II期実験, 消波型)

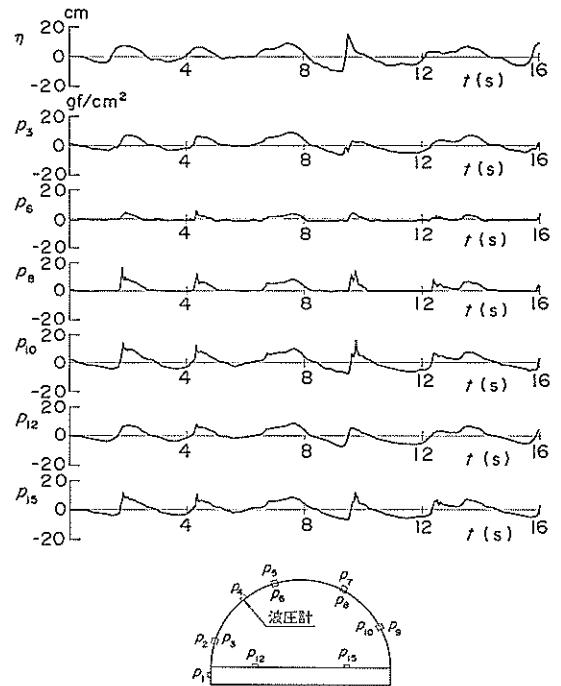


図-31(b) 不規則波圧の記録例 (第II期実験, 消波型)

これは第Ⅱ期実験では孔を半円部の頂点にも開けており、空気が閉じ込められにくいことによると推測される。

(2) 第Ⅰ期実験による空気圧縮力に関する検討

特に、第Ⅰ期実験の消波型や透過型では空気圧縮による衝撃圧の発生が認められたので、第Ⅰ期実験結果に基づきこれを検討してみる。

ケーソン内部に発生する空気圧縮衝撃圧発生時の圧力分布はほぼ図-32のように設定することができる。これは基本的には強度  $p_a$  の圧力が一様に分布するものであるが、曲面壁の前半分は頂点での  $p_a$  から  $\lambda_a p_a$  まで直線的に減少するとしたものである。実験結果の分布から  $\lambda_a$  の値は 0.5 とおける。空気圧縮衝撃圧  $p_a$  については、半円形ケーソンを上床版を有する直立消波ケーソンに置き換えて、高橋ほか<sup>13)</sup>の方法によって算定する。ここでは、その置き換えの考え方を述べる。

図-33 はその置き換えを説明したものである。図中、S. W. L は静水面を表し、 $s_0$  は前面開口部上端の静水面からの高さ、 $\theta_0$  はその仰角を表す。すなわち、外側水位が高さ  $s_0$  に達した瞬間に内部に空気が閉じ込められる。そのときの内部水面幅を  $B_0$  と表記し、半円形ケーソンを遊水室幅が  $B_0$ 、上床版の静水面上の高さが  $s$  (半円形ケーソン内側頂点の静水面上高さ)、前面壁の不透過部の下端の静水面上の高さが  $s_0$ 、その下の透過部の高さが  $R\theta_0$  ( $\theta_0$  はラジアン) の直立消波ケーソンに置き換える。この透過部の高さは半円形ケーソンの透過部の円周面に沿う長さに等しくとったものである。ただし、遊水室の幅  $B_0$  は内水位の上昇とともに半円形ケーソンの内部水面幅の変化に応じて変わる変数とする。また、前面透過部の開口率は消波型に対しては  $\epsilon_f$  をそのまま用いるが、透過型に対しては  $(\epsilon_f - \epsilon_r)$  に等しい仮想の開口率とする。これは前面開口率を小さくすることによって、背後への水の流出効果などを簡単な形で考慮したものである。

空気圧縮衝撃圧の計算は前面外側での水位変動に対し流入方式による逐次計算によって、空気が閉じ込められる瞬間の内部水位と水面の上昇速度を求め、それを初期条件として Bagnold 型空気圧縮衝撃圧を求めるものである。その際、透過壁からの空気漏れの効果を考慮する。前面水位は静水面から入射波高  $H_I$  の 1/4 だけ水位が低下しているとき内部水位と等しい状態にあって、これを初期状態とし、半振幅が  $1.25 H_I$  の正弦変化で与える。したがって、 $H_I$  が  $s_0$  より大きいとき、空気圧縮衝撃圧が発生することになる。これらは第Ⅰ期実験の半円形ケーソンに対して、実験結果などからほぼ妥当なモデルとして採用したものである。なお、空気漏れの効果

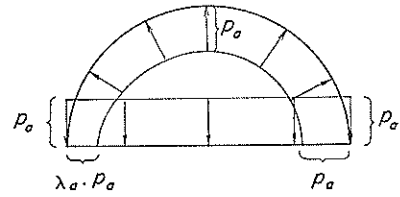


図-32 空気圧縮衝撃圧の分布

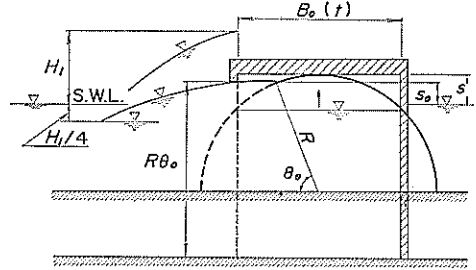


図-33 半円形ケーソンの直立消波ケーソンへの置換

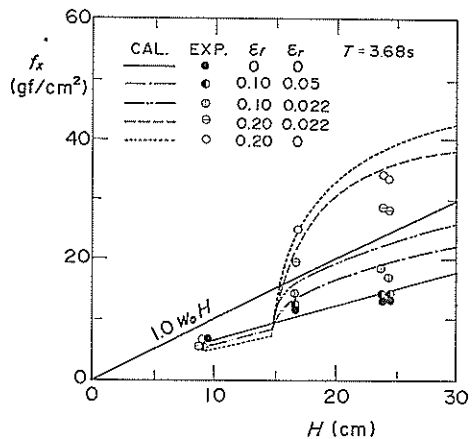


図-34 波高による水平波力の変化 (第Ⅰ期実験)

については直立消波ケーソンに対する結果をそのまま用いる。

図-34 は、前後の開口率の組み合わせの異なる種類の完全半円形ケーソンに働く水平波力最大時の水平平均波力強度  $f_H$  を、横軸に入射波高  $H$  をとって示したもので、周期が 3.68 s の例である。図中、後述する外側の波力分布の計算法とほぼ同じ方法による計算波力と上述の空気圧縮衝撃圧の計算方法による計算波力のベクトル和 (文献 2) 参照) による計算波力強度も併せて示してある。基本型 ( $\epsilon_f = \epsilon_r = 0$ ) の場合には内部に波圧が働

かないので、波力は波高にほぼ比例して増大しており、計算値は実験値によくあっている。消波型、透過型では波高がある値（この場合約 15cm）を超すと内部に空気圧縮衝撃圧が発生するようになり、波力の変化に変曲点が生じる。消波型の計算値は実験値とほぼ合っているが、透過型については傾向は合っているものの、衝撃圧が発生する場合には、計算値が明らかに大きい結果を与える。これは圧縮時の背面孔からの水の流出や空気漏れの効果などの評価が計算においてやや低めであることが主因と考えられる。なお、空気圧縮衝撃圧力は  $w_0 H$  ( $w_0$  は水の単位体積重量) で割って無次元化して表示したとき、現地スケールでは実験値の 1/2~1/3 に減じ、計算による空気圧縮衝撃圧は実験値で顕著なほどには大きくない。これは直立消波ケーソンの現地観測結果でも例証されている<sup>11)</sup>。

### 5.3 上部工がある場合の波力特性

これまであまり触れていないけれども、半円部の下に若干の直立部があっても、波力特性はそれほど変化しない。しかし、半円部の上に直立の上部工があると、波力

特性は著しく異なる。ここでは、第Ⅱ期の実験結果から直立の上部工がある場合の波力特性について述べる。

図-35 は基本型に上部工がある場合の波圧の記録を例示したものである（前出の 図-25 と同条件）。曲面壁前半分外側に作用する波圧はピークの発生にやや位相差が認められるが、強度そのものは上部工なしの場合に比べて大きく、直立壁に働く合田式による波圧より若干小さい程度である。

一方、上部工の前面には衝撃的な波圧が作用する。図-36 (a), (b), (c) は、それぞれ基本型、消波型、透過型について、計算および実験による上部工に作用する波圧強度を比較したものである。ここに、計算による波圧強度  $p_G$  は合田式 ( $\alpha_2=0$ ) によって計算した上部工前面壁での平均波圧強度である。周期等の条件によってばらつきがあるものの、基本型の上部工に働く波圧が最も大きく、次いで消波型、透過型の順となっている。図中の直線は基本型に対して  $p_E=2.0 p_G$ 、消波型に対して  $p_E=1.5 p_G$ 、透過型に対して  $p_E=1.25 p_G$  の関係を示している。特に、消波型や透過型の最大波力に相当する条件で

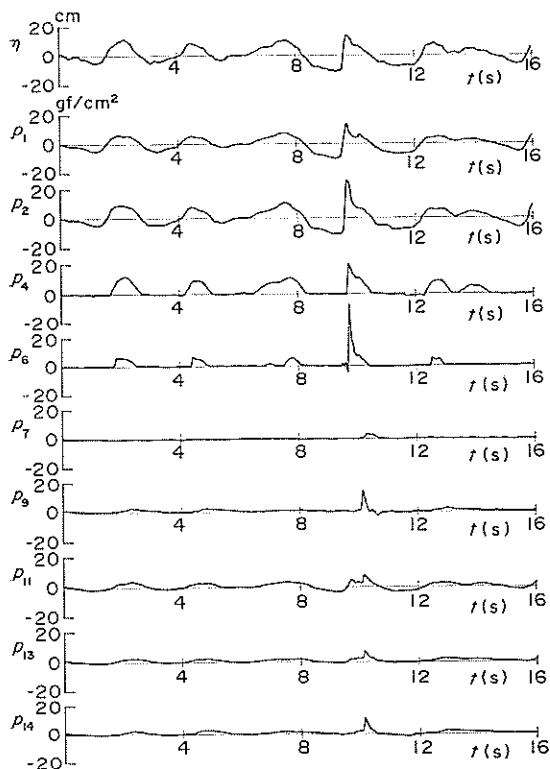


図-35(a) 上部工がある場合の波圧記録例（第Ⅱ期実験，基本型）

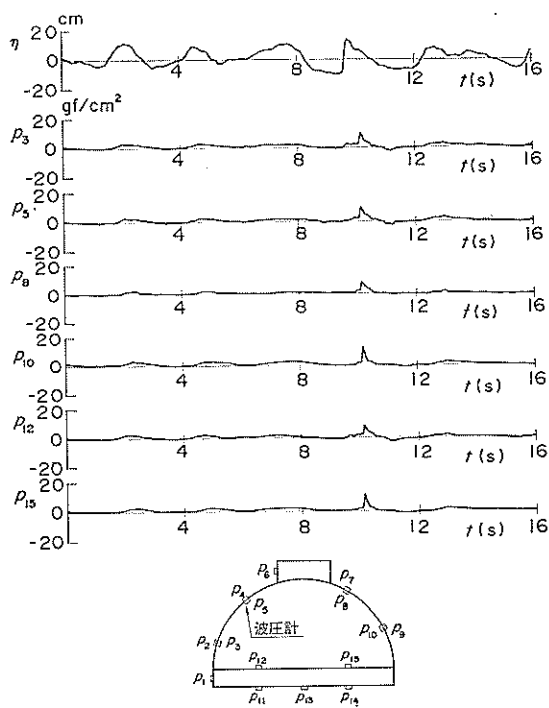


図-35(b) 上部工がある場合の波圧記録例（第Ⅱ期実験，基本型）

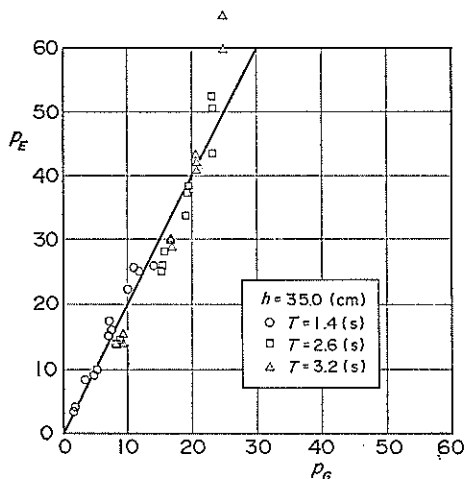


図-36(a) 上部工に作用する波圧（基本型）

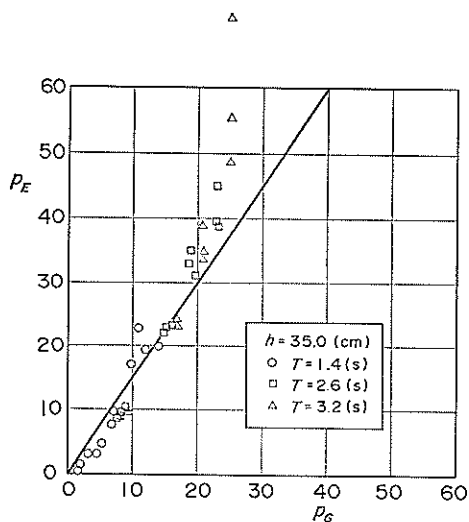


図-36(b) 上部工に作用する波圧（消波型）

はやや過小な場合もあるけれども、全体的にはほぼ平均的関係を表している。

以上例示したように、直立面を持った上部工があると作用波圧が増大するので、実際応用においては、上部工を必要とする場合には前面は斜面とするなどの対策を講ずるのがよいといえる。以下、上部工のある場合というのは直立面を持ったものを意味する。

## 6. 設計波力の算定法

### 6.1 設計で考慮すべき波力の位相

波の作用を一面で同位相で受ける構造物でない場合、

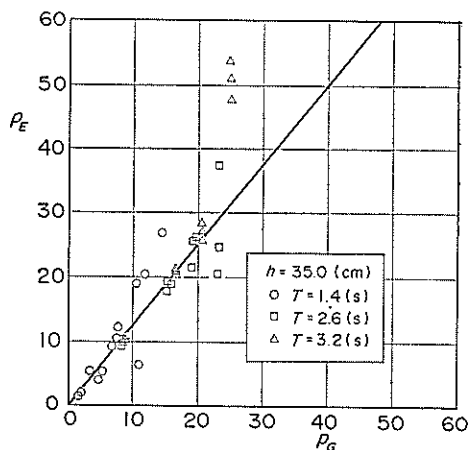


図-36(c) 上部工に作用する波圧（透過型）

ケーソンの安定性についても一般に複数の位相を検討しなければならない。たとえば、二重円筒ケーソンでは波の降付近で外側での波圧が主体となる位相と遊水室内部での波圧が主体となる位相の2位相と、さらに波の谷の位相を併せて、全部で3位相を考慮している<sup>13)</sup>。半円形ケーソンの場合は比較的水深が浅い海域で用いられるので、ケーソン全体の安定性の面からは波の谷の波力は大きな問題とならず、通常の直立ケーソンの場合と同様に考えておけばよい。波の降付近での波力に対しては、基本型では底版に働く揚圧力が最大となるタイミング、すなわち鉛直波力が上向きに最大となるタイミングと、水平波力が最大となるタイミングのどちらかが最も危険となる。また、消波型や透過型では、波の降付近でケーソンの外側での波圧が主体となるタイミングと遊水室内部での波圧が主体となるタイミングがある。しかし、それらの位相差はわずかであり、結果に及ぼす違いもわずかであるので、波の降付近に対しては一つの波圧分布を考えることにする。

### 6.2 ケーソン外周面に作用する波圧

#### (1) 波圧分布

図-37は高さ $h_V$ の直立底版の上に完全な半円形がある場合のケーソンに働く外周面での設計波圧の分布を説明したものである。このとき、図の(Ⅲ)に示しているように、円周面では前半分に波圧 $p(\theta)$ が曲率の中心に向かって働き、底版には前端で $p_u$ 、後端で0の三角形分布の揚圧力が働くものとする。ここに、 $\theta$ は曲率の中心から見た円周面上での波圧作用点の仰角であり、 $p_1$ は静水面、 $p_0$ は鉛直壁の上端（半円部の下端）、 $p_3$ は下端での波圧強度である。

これらの波圧分布を求めると、直立壁体に働く合田

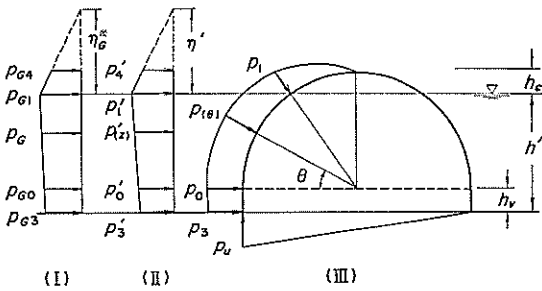


図-37 ケーソン外周面に働く設計波圧分布

式<sup>10)</sup>による波圧分布を適宜修正する方法を考え、設計波力の算定法を提案する。図-37の(I)はそのベースとなる合田式による波圧分布を示したもので、代表波圧強度等には添字Gを下付けして表しており、次のように与えられる。

$$\eta_{G0}^* = 0.75(1 + \cos \beta)HD \quad \dots\dots(5)$$

$$p_{G01} = 0.5(1 + \cos \beta)\alpha_1 w_0 HD \quad \dots\dots(6)$$

$$p_{G03} = \alpha_3 p_{G0} \quad \dots\dots(7)$$

$$p_{Gu} = \alpha_3 p_{G0} \quad \dots\dots(8)$$

ここは、

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[ \frac{4\pi h/LD}{\sinh(4\pi h/LD)} \right]^2 \quad \dots\dots(9)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left[ 1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/LD)} \right] \quad \dots\dots(10)$$

$\beta$  : 壁体法線の垂直方向と波の主方向から $\pm 15^\circ$ の範囲で最も危険な方向とのなす角度

$HD$  : 設計計算に用いる波高=最高波高

$LD$  : 設計計算に用いる波長=水深 $h$ における有義波波長

ただし、マウンド等の影響を表す波圧係数 $\alpha_2$ は0とする。これから、以下のように二段階の補正を行って、半円形ケーソンの外周面に働く設計波圧を求める。

(2) 位相補正

まず、半円形構造による波圧の位相差、さらに形式の違いによる修正係数 $\lambda_p$ 、 $\lambda_1$ を導入して、(II)および(III)の波圧を次のように与える。

$$p'_1 = \lambda_1 p_{G1} \quad \dots\dots(11)$$

$$p'_0 = p_0 = \lambda_1 \lambda_p p_{G0} \quad \dots\dots(12)$$

$$p'_3 = p_3 = \lambda_1 \lambda_p p_{G3} \quad \dots\dots(13)$$

ここに、

$\lambda_1$  : ケーソン形式による低減係数  
 上部工がない消波型・透過型 ; 0.8  
 上記以外 ; 1.0

$\lambda_p$  : 位相差による波圧低減係数

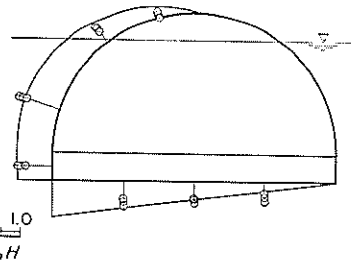


図-38 基本型に働く波圧分布 (構造条件II)

$$\lambda_p = \cos^4(2\pi \Delta l/L) \quad \dots\dots(14)$$

$\Delta l$  : 曲面下端と曲面と静水面との交点の間の水平距離。ただし、上部工がある場合は曲面下端と上部工前面の間の水平距離

$L$  : 設計波の波長

底版前端での揚圧力強度は次式で与える。

$$p_u = \lambda_1 \lambda_p p_{Gu} \quad \dots\dots(15)$$

ただし、基本型で底版の開口率が0.1以上で、かつ遊水室が背後あるいは側方に密閉されていない場合には、揚圧力は無視できる。

以上は、半円部の下の直立部前面の波圧および揚圧力を、5.1で述べた位相の相違を考慮して合田式を補正した波圧で与えるようにしたものである。また、消波型や透過型に対して $\lambda_1 = 0.8$ を用いるのは、反射率の低減や孔の存在によって波圧が減じることを反映している。

(3) 角度補正

円周面に作用する波圧は(II)の波圧 $p'(z)$ にさらに角度による補正を行って、次式で与える。

$$p(\theta) = p'(z) \cos^n \theta \quad \dots\dots(16)$$

ここに、

上部工がない場合 ;  $n = 1$

上部工がある場合 ;  $n = 0$

ただし、 $p'(z)$ の波圧の作用高さ $\eta'$ は合田式と同じ高さ $\eta_{G0}^*$ とする。上部工がない場合には、この高さか $\theta = 90^\circ$ すなわち頂点で波圧は0となる。

(4) 上部工に作用する波圧

上部工がある場合の上部工前面壁に作用する波圧は(I)の波圧に次の割増し係数 $r_s$ を乗じて与える。

$$r_s = \begin{cases} 2.0 & \text{(基本型)} \\ 1.5 & \text{(消波型)} \\ 1.25 & \text{(透過型)} \end{cases}$$

これは、5.3で述べた検討結果に基づき設定したものである。

(5) 実験結果との比較

図-38は背面や底版に孔のない基本型に対する実験と

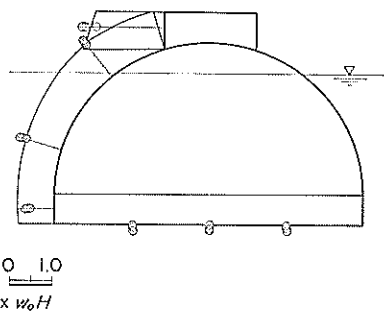


図-39 基本型に働く波圧分布 (構造条件Ⅶ)

計算による波圧分布を比較したものである。実験は不規則波により行っているため、各波群の水平波力最大時の波圧がプロットしてある。計算波圧は実験波の最高波高の平均値に対するものである。これから、提案した波圧分布はほぼ妥当であることが知られる。

また、図-39は背面や底版に孔を開けた上部工付き基本型に対する同様な比較である。このように、頂部に直立の上部工がある場合には大きな波圧が作用することになるので、止む得ない場合以外は上部工を設けないほうがよい。

### 6.3 ケーソン内部に作用する波圧

#### (1) 波圧分布

消波型や透過型においては、遊水室内部に働く波圧を考慮する必要がある。この波圧は条件によって、空気圧縮による衝撃圧であることもあるが、頂点付近に孔が開いている場合や遊水室に側壁がない場合には、一般に空気圧縮よりも大きい波圧を考える必要がある。図-40は実験結果を考慮して設定した設計に用いる内部波圧分布を示したものである。半円形壁前半分で強度  $p_{if}$ 、後半分で強度  $p_{ir}$  の一様分布とし、底面 (底版上面) に働く波圧は前端で  $p_{if}$ 、後端で  $p_{ir}$  の直線分布とする。曲面壁に働く波圧は現象的には頂点で不連続であるわけではないけれども、一般に後ろ側で大きく、前側でやや小さい傾向にあり、簡単なため頂点を境に一様分布としている。

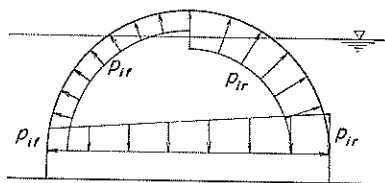


図-40 内部波圧分布

なお構造的に内部に空気層を閉じ込めることが明らかでない場合には、5.2で述べた空気圧縮による衝撃圧を用いよう。

#### (2) 波圧強度

波圧強度  $p_{if}$ 、 $p_{ir}$  はそれぞれ次式で表す。

$$p_{if} = \gamma_f \lambda_1 p_{G1} \quad \dots\dots(17)$$

$$p_{ir} = \gamma_r \lambda_1 p_{G1} \quad \dots\dots(18)$$

ここに、

$$\gamma_f = \begin{cases} 0.6 \cos \theta_1 & (\text{上部工がないとき}) \\ 0.6 & (\text{上部工があるとき}) \end{cases} \quad \dots\dots(19)$$

$$\gamma_r = \begin{cases} 1.4 \cos \theta_1 & (\text{消波型}) \\ 1.0 \cos \theta_1 & (\text{透過型}) \end{cases} \quad \dots\dots(20)$$

$$\theta_1 = \sin^{-1} \{ (h' - h_v) / R \} \quad \dots\dots(21)$$

$p_{G1}$ : 合田式 ( $\alpha_2 = 0$ ) で与えられる静水面での波圧強度

#### (3) 実験結果との比較

式(19)、(20)の  $\gamma_f$ 、 $\gamma_r$  は実験結果に基づき与えたものである。図-41~44は上部工なしの消波型や透過型に対する結果であるが、図中の直線は式(17)や(18)の関係を表しており、勾配が  $\gamma_f \lambda_1$  や  $\gamma_r \lambda_1$  に相当する。 $\lambda_1$ 、 $\theta_1$ はこの場合それぞれ0.8および36.9°であるので、たとえば図-41、42の消波型の例でいえば、 $\gamma_f$ 、 $\gamma_r$ はそれぞれ0.48および1.12となる。

一方、図-45、46は上部工付きの消波型に対する同様な結果を例示したものである。この場合の  $\gamma_f$ 、 $\gamma_r$ はそれぞれ0.6および0.80である。

### 6.4 全波力

消波型や透過型の全体に作用する波力は外周面に作用する波圧と遊水室内部に作用する波圧のベクトル和で算定できる。図-47は上部工なしの場合の全体の波圧分布を示したものである。外周面半円部に働く波力の水平成分を  $P_{Hc}$ 、鉛直成分を  $P_{Vc}$ 、基部鉛直部に働く水平波力を  $P_{Hv}$ 、底版底面に働く揚圧力を  $P_{Vu}$  と表記する。さらに、ケーソン内部に働く波力については、半円部前半分に働く波力の水平成分を  $P_{Hf}$ 、鉛直成分を  $P_{Vf}$ 、後半分に働く波力の水平成分を  $P_{Hr}$ 、鉛直成分を  $P_{Vr}$ 、底版上面に働く鉛直波力を  $P_{Vb}$  と表記する。このとき、全体に働く波力の水平成分  $F_H$ 、鉛直成分  $F_V$  は次のようになる。ただし、中詰めは高さ  $h_v$  の底版の部分のみとし、その上に半径  $R$  の半円形壁 (厚さは無視する) がある状態とする。

$$F_H = (1 - \epsilon_f) P_{Hc} + P_{Hv} - (1 - \epsilon_f) P_{Hf} + (1 - \epsilon_r) P_{Hr} \quad \dots\dots(22)$$

$$F_V = -(1 - \epsilon_f) P_{Vc} + (1 - \epsilon_f) P_{Vf}$$

半円形ケーソン堤の水理特性に関する実験的研究

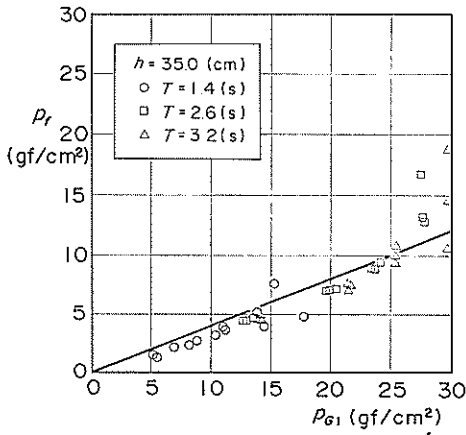


図-41 内部前半分に働く波圧（消波型，上部工なし）

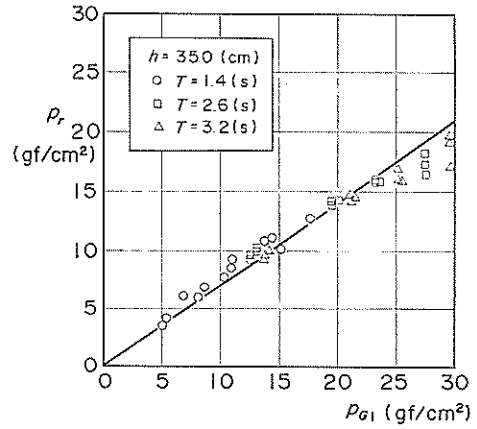


図-44 内部後半分に働く波圧（透過型，上部工なし）

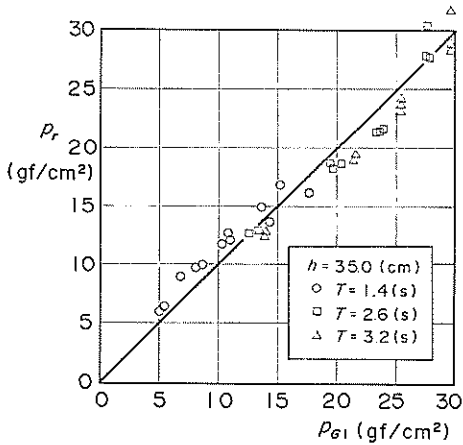


図-42 内部後半分に働く波圧（消波型，上部工なし）

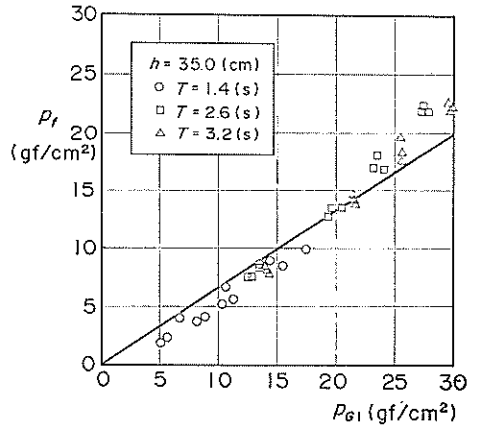


図-45 内部前半分に働く波圧（消波型，上部工あり）

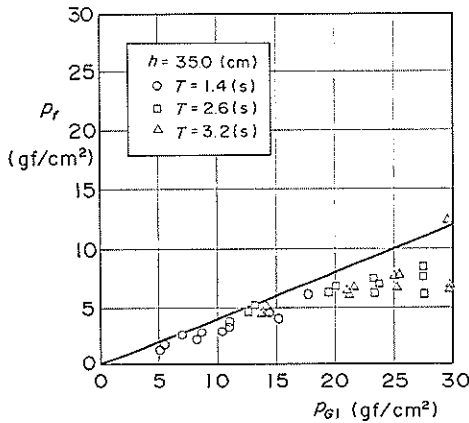


図-43 内部前半分に働く波圧（透過型，上部工なし）

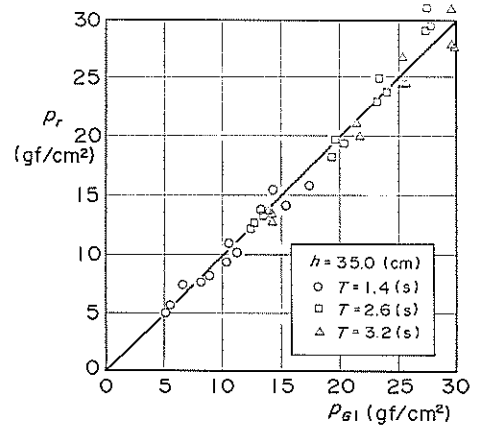


図-46 内部後半分に働く波圧（消波型，上部工あり）



$$+(1-\varepsilon_r)P_{Vr}-P_{Vb}+P_{Vu} \quad \dots\dots(23)$$

ここに,

$$P_{Hc} = \left\{ \frac{\gamma_1}{3}(1-\cos^3 \theta_1) + \frac{\gamma_2}{4}(\sin 2\theta_1 + 2\theta_1) + \frac{\eta_G + h' - h_v}{4\eta_G}(\pi - \sin 2\theta_1 - 2\theta_1) - \frac{R}{3\eta_G} \cos^3 \theta_1 \right\} R \lambda_1 p_{G1} \quad \dots\dots(24)$$

$$P_{Vc} = \left\{ \frac{\gamma_1}{3}(1-\cos^3 \theta_1) + \gamma_2 \sin \theta_1 + \frac{\eta_G + h' - h_v}{\eta_G}(1 - \sin \theta_1) - \frac{R}{2\eta_G} \cos^2 \theta_1 \right\} R p_{G1} \quad \dots\dots(25)$$

$$P_{Hv} = 0.5 h_v (\gamma_2 + \lambda \alpha_3) \lambda_1 p_{G1} \quad \dots\dots(26)$$

$$P_{Vu} = R \lambda_u \lambda_1 \alpha_3 p_{G1} \quad \dots\dots(27)$$

$$P_{Hf} = R \gamma_f \lambda_1 p_{G1} \quad \dots\dots(28)$$

$$P_{Vf} = R \gamma_f \lambda_1 p_{G1} \quad \dots\dots(29)$$

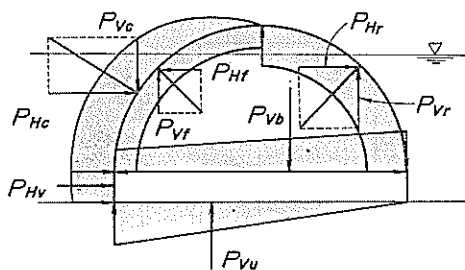


図-47 消波型・透過型に働く波圧分布

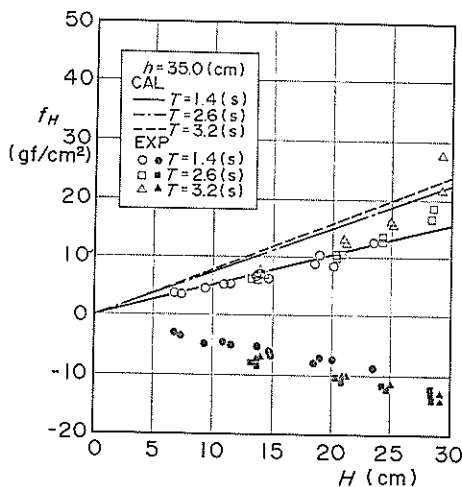


図-48 基本型に働く水平波力平均強度(構造条件Ⅱ)

$$P_{Hr} = R \gamma_r \lambda_1 p_{G1} \quad \dots\dots(30)$$

$$P_{Vr} = R \gamma_r \lambda_1 p_{G1} \quad \dots\dots(31)$$

$$P_{Vb} = R(\gamma_f + \gamma_r) \lambda_1 p_{G1} \quad \dots\dots(32)$$

$$\gamma_1 = \frac{R}{h'}(1 - \lambda_p \alpha_3) \quad \dots\dots(33)$$

$$\gamma_2 = \frac{h_v}{h'}(1 - \lambda_p \alpha_3) \quad \dots\dots(34)$$

$$\lambda_u = \begin{cases} 1 : \varepsilon_b = 0 \\ 0 : \varepsilon_b \geq 0.1 \end{cases} \quad \dots\dots(35)$$

図-48~51 は無孔底版の基本型に対する波力の実験値と計算値を示したものである。図-48の  $f_H$  は  $F_H$  を  $(R+h_v)$  で割った水平波力平均強度, 図-49の  $p_u$  は  $P_{Vu}$  を  $R$  で割った底面前端での揚圧力強度, 図-50の

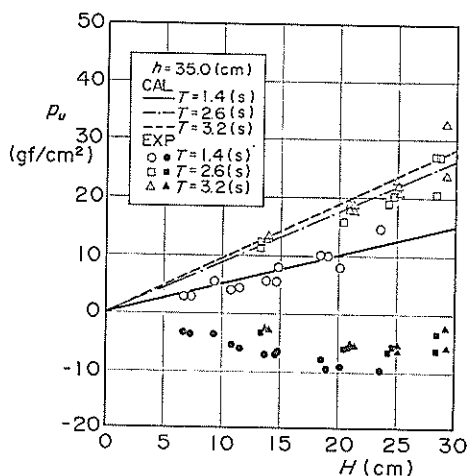


図-49 基本型に働く前端揚圧力強度(構造条件Ⅱ)

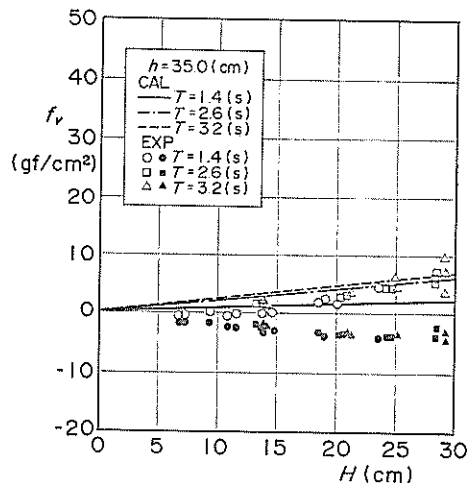


図-50 基本型に働く鉛直波力平均強度(構造条件Ⅱ)

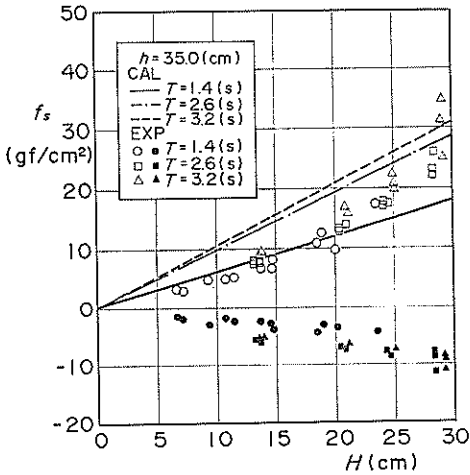


図-51 基本型に働く滑動合成波力強度(構造条件II)

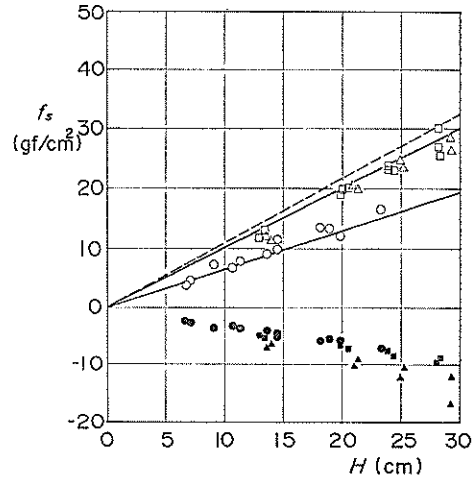


図-53 透過型に働く滑動合成波力強度(構造条件X)

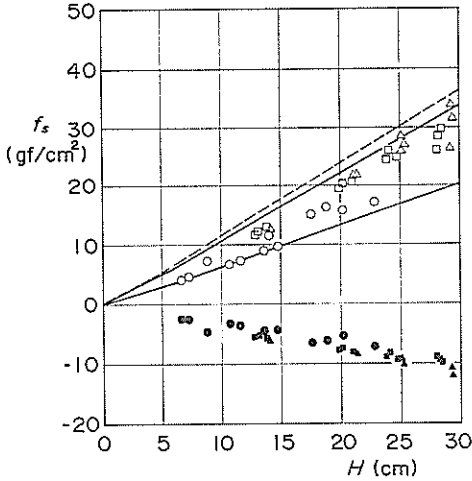


図-52 消波型に働く滑動合成波力強度(構造条件IX)

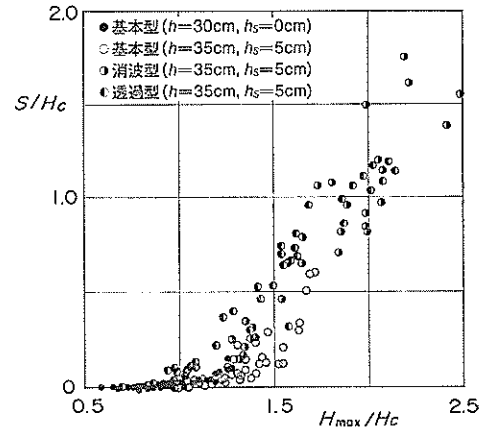


図-54 滑動実験結果

$f_V$  は  $F_V$  を  $2R$  で割った鉛直波力平均強度、図-51 の  $f_S$  は滑動合成波力強度(摩擦係数は 0.6 としている)である。 $f_H$  は岸側方向を正、 $f_V$  は上向きを正と定義しており、計算値は正に対するもののみである。また、図-52, 53 は消波型および透過型について滑動合成波力強度のみを同様に示したものであるが、提案した設計波力の算定法は実験値のほぼ平均かやや安全側の値を与えている。

### 6.5 滑動実験による検討

図-54 は滑動実験結果を示したものである。横軸は実験波の最高波高、縦軸は約 250 波の不規則波の作用による滑動量  $S$  をそれぞれ提案した波力算定法による滑動限

界波高  $H_c$  で割って無次元化してある。図中、黒丸が上部工なしの基本型(構造条件V)、白丸が上部工有りの基本型(構造条件VII)であるが、限界波高を超える波が作用しても滑動量は小さく、提案した波力算定法で滑動に対して十分安全であるといえる。

一方、消波型、透過型はいずれも上部工ありの条件でしか滑動実験を行っていない。この場合、横軸が 1.0 付近でも若干滑動を生じている例があり、提案法の安全度は基本型に比べてやや低い。今後、上部工なしの消波型や透過型に対する滑動安定性の検討が必要である。

### 6.6 部材検討に用いる波力

部材強度の検討に対しては、前述の波の峰のときの波

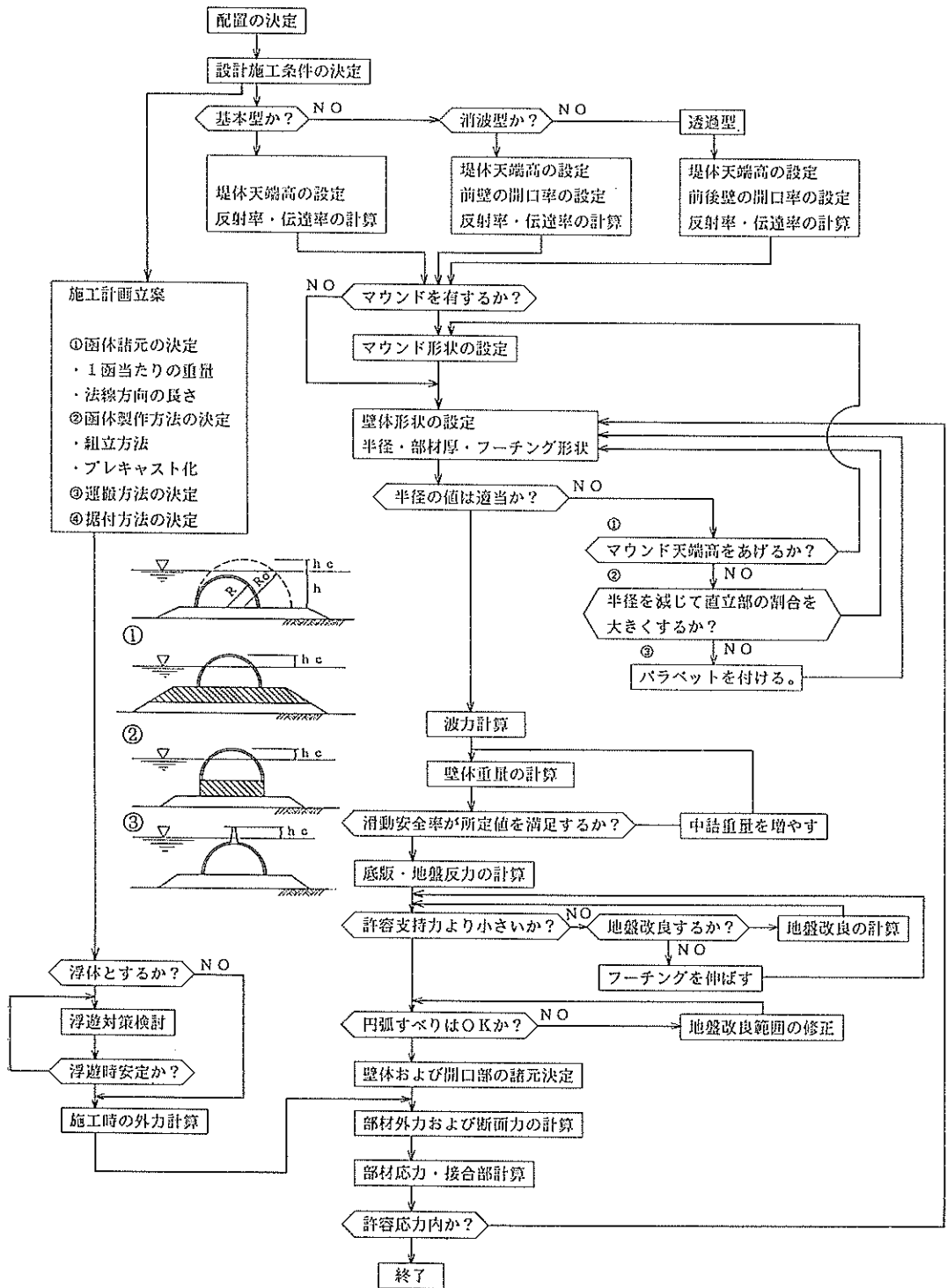


図-55 半円形ケーソン堤の設計手順

力のほか、波の谷のときの波力も考慮しなければならない。基本型で端部からの内部への波の侵入が無視できる場合には、前面水位が波高の1/2だけ低下したときの静水圧変化を考慮すればよい。消波型や透過型では、そのほか特に斜め入射波の場合の内外での様々な位相差を考慮することが必要となろう。しかし、斜め入射波に対する実験的検討はまだ行っていない。そのため、暫定的に背面が静水位のまま、前面および遊水室内水位が遊水室底面まで下がった状態、および外周面には波の峰のときの波圧が働き、遊水室内部は全部排水された状態を考慮することにしている。

## 7. 試設計例

### 7.1 設計の手順

半円形ケーソンには各種のバリエーションがあり、条件に適した構造を選択できるが、それだけ決定すべき因子が多く、設計の手順は複雑となる。図-55はその一般的なフローを示したものである。半円形ケーソン堤の場合、ケーソン部の安定性については滑動が対象となり、転倒に対する検討は一般に省略できる。

### 7.2 試設計

#### (1) 設計条件

海底勾配が1/100の単調な海岸における離岸堤を対象として、基本型と透過型の試設計例(基本設計)を示す。設計条件は以下のとおりである。

#### a. 水深および潮位

水深	-8.5m
H. W. L	+0.5m
L. W. L	±0.0m
海底勾配	1/100

#### b. 設計波浪

有義波周期	$T_{1/3}=14.2$ s
有義波高	$H_{1/3}=5.70$ m

最高波高  $H_{max}=7.46n$

入射角  $\beta=0^\circ$

#### c. 地盤

N値10程度の砂質土

#### (2) 基本型

図-56は基本型の断面諸元を示したものである。底版はアスファルトマット付きで高さ $h_b$ は1.5m、幅14.0mで、半円形壁の半径 $R$ は7.0mである。底版下面から2.3m(上面から1.6m)には捨てコンクリートで中詰めする。底版の開口率 $\epsilon_b$ は0.10、背面の開口率 $\epsilon_r$ は0.25の背面消波、揚圧力低減型である。天端高は+3.0mで、H. W. Lで設計波が作用したとき $h_c/H_{1/3}=0.44$ であるので、伝達率は前出の図-13から0.30~0.35と推定される。離岸堤としては十分であろう。また、そのときの反射率は $d/H_{1/3}=0.70$ であるので、図-11から0.5程度と推定される。

水平波力 $F_H$ は50.7tf/mとなり、平均強度 $f_H$ にして6.0tf/m<sup>2</sup>、 $0.8w_0H_{max}$ に相当する。鉛直波力 $F_V$ は-24.6tf/mで、この場合下向きに作用する。H. W. L時の壁体静水中重量は62.9tf/mであるので、滑動安全率は摩擦係数 $\mu$ を0.7として1.21となる。端趾圧は8.0tf/m<sup>2</sup>と非常に小さい。そのため、基礎地盤の支持力も十分である。

#### (3) 透過型

図-57に透過型の場合の断面諸元を示す。半径 $R$ が9.5mの完全半円型で底版下面から3.7mまで捨てコンクリートで中詰めしている。H. W. Lを対象として $h_c/h=0.28$ 、設計波に対し $h_c/H_{1/3}=0.44$ であるので、伝達率は図-22から0.4程度と推定される。また、 $b_0/L_{1/3}=0.10$ であり、反射率は図-21から0.24程度と推定される。

水平波力 $F_H$ は51.5tf/m、平均強度 $f_H$ にして5.4tf/m<sup>2</sup>、 $0.73w_0H_{max}$ に相当する。鉛直波力 $F_V$ は25.9

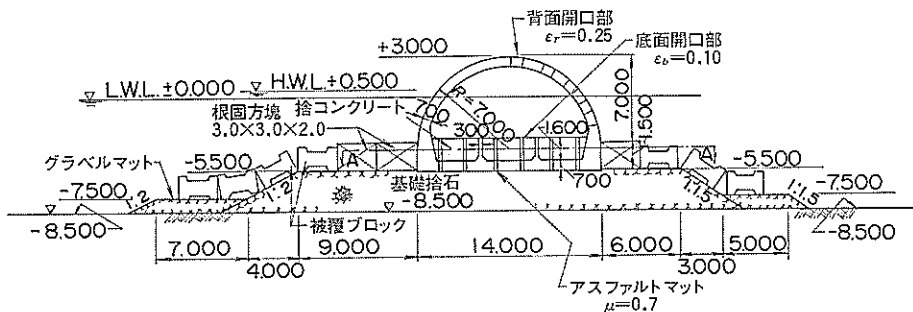


図-56 基本型の試設計断面

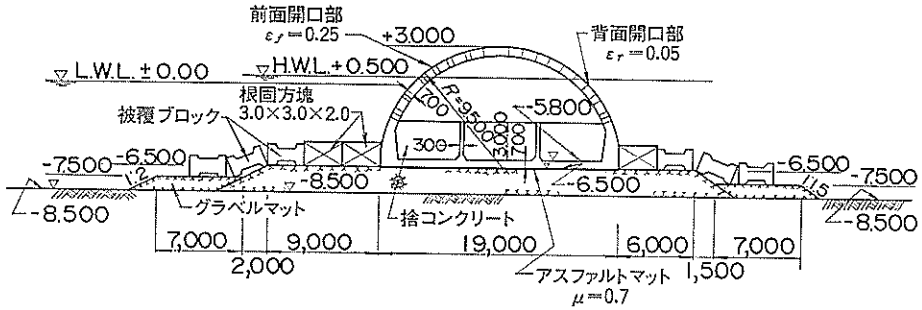


図-57 透過型の試設計断面

tf/m<sup>2</sup>で、この場合上向きである。H. W. L 時の壁体静水中重量は 116 tf/m<sup>2</sup> であるので、滑動安全率 ( $\mu=0.7$ ) は 1.23 となる。端趾圧は 8.6 tf/m<sup>2</sup> で小さい。

### 7.3 施工法

半円形ケーソン堤が従来のケーソン堤と異なる点は、上部が半円の曲面であり、底版部と一体で製作されていること、端部に側壁がない状態の施工時には半円形ケーソン内部に波が進入することなどである。施工に際してはこれらの点を留意して適切な工法を選定する必要がある。

工事の施工手順は、従来のケーソン堤と同様である。ただし、個々の工程において特有の施工法が必要となる。以下、ケーソンの製作法について簡単に述べる。

半円形ケーソンの製作法としては、①通常のケーソン製作と同様に、一体鉄筋コンクリート構造物として打ち上げる一体方式、②延長方向にいくつかのユニットに分割して製作したものを、P. C 鋼材で連結するプレハブ方式、③底版および直立壁部を鉄筋コンクリート構造物として製作し、半円形曲面部をプレキャスト部材として接合する半プレハブ方式、などが考えられる。図-58 は前

出の図-56 の試設計ケーソンで考えた半プレハブ方式による接合詳細図である。

### 8. むすび

以上、半円形ケーソン堤の水理特性をまとめるとともに、設計波力の算定法を示した。半円形ケーソン堤はその特徴から水深の比較的浅いところでの波浪制御構造物に適している。特に、たとえば基本型の場合、背面に孔を開けることによって伝達率を低減できるとともに、さらに底版に孔を開けることによって揚圧力を低減できる。また、通常の矩形ケーソン式混成堤の場合、強大な衝撃砕波力が発生する条件であっても、半円形ケーソン堤ではそのおそれがない。そのため、前面マウンドの被覆ブロックを厚くすることが可能で、これによって反射波を小さくすることもできる。これらのことから、波浪条件の厳しい海域でのやや沖合いでの離岸堤に非常に適している。また、波浪条件がそれほど厳しくない海域では、消波型や透過型を用いた低地盤反力型防波堤としても適用性がある。写真-2 は半円形ケーソン堤（透過型）のアーチストイメージを示したものであるが、ソフトな感じを与えており、海洋性レクリエーション地区などの海

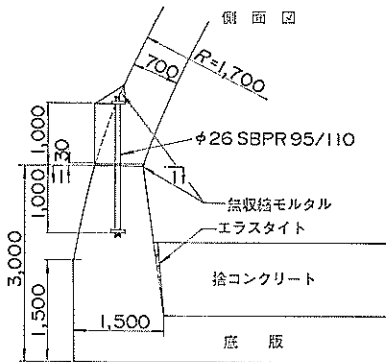


図-58 半プレハブ方式における接合部の例

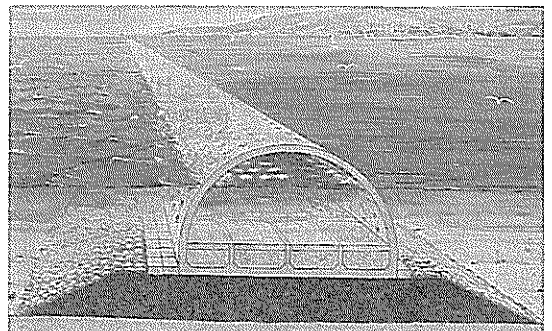


写真-2 半円形ケーソン堤のアーチストイメージ

域制御構造物として活用が期待される。

本報告はまえがきでも述べたように、昭和60～62年度の3か年にわたる共同研究の一部をまとめたものである。共同研究を推進するにあたっては、各年度ごとに10回程度のワーキンググループの会議が開催された。ワーキンググループのメンバーであった側沿岸開発技術研究センター常務理事奥村樹郎、同調査研究部主任研究員田川昌宏（昭和60年度）、五洋建設株式会社 誠、赤間正幸（昭和62年度）、大都工業株式会社 橋詰文伯、東亜建設工業株式会社 和彦、小堀共生（昭和62年度）、東洋建設株式会社 村俊昭、ピー・エス・コンクリート株式会社 崎賀尚宏、若築建設株式会社 田邦雄の諸氏、および元港湾技術研究所水工部防波堤研究室吉本靖俊研究官（昭和60年度）には本報告の著者にも匹敵する多大なご協力を得た。また、第I期実験では、大都工業株式会社 清、若築建設株式会社 侯陽一の両氏の協力を得た。これらの関係各位に対し心からお礼を申し上げる次第である。

(1989年3月31日受付)

参 考 文 献

- 1) 谷本勝利・奥村樹郎・滑川伸孝・橋詰文伯・石丸敬純：半円形防波堤の開発について、海洋開発論文集, Vol. 3, 1987, pp. 7~17.
- 2) 谷本勝利・吉本靖俊・滑川伸孝・石丸敬純：半円形ケーソン堤の水理特性と設計波力, 第34回海岸工学講演会論文集, 1987, pp. 551~555.
- 3) 谷本勝利・滑川伸孝・関本恒浩：半円形ケーソン堤の水理特性と設計波力(その2), 第35回海岸工学講演会論文集, 1988, pp. 662~666.
- 4) 谷本勝利：防波堤の新しい構造を求めて, プレストレストコンクリート, Vol. 27, No. 4, 1985, pp. 13~18.
- 5) Tanimoto, K., Takahashi, S., and Kimura, K.: Structures and hydraulic characteristics of breakwaters—The state of the art of breakwater design in Japan—, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol. 26, No. 5, 1987, pp. 11~55.
- 6) 森平倫生・国田 治：斜面壁堤の水理特性に関する模型実験, 第26回海岸工学講演会論文集, 1979, pp. 259~298.
- 7) 谷本勝利・原中祐人・富田英治・村永 努・鈴木 諭：マルチセルラーケーソンの水理特性に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第20巻第2号, 1981, pp. 41~74.
- 8) 谷本勝利・原中祐人・富田英治・和泉田芳和・鈴木 諭：曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第19巻第4号, 1980, pp. 3~53.
- 9) 合田良実：浅海における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻第3号, 1975, pp. 59~106.
- 10) 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.

- 11) 高橋重雄・谷本勝利：直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力(第2報)—現地波圧データの解析—, 港湾技術研究所報告, 第23巻第2号, 1984, pp. 3~25.
- 12) 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：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—, 港湾技研資料, No. 600, 1987, pp. 1~21.
- 13) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 改訂版(上巻), 日本港湾協会, 1989, pp. 119~121.

主要記号一覧

$b_0$	: 静水面での遊水室外寸幅
$b_s$	: 上部工の天端幅
$d$	: マウンド被覆材天端上の水深
$F_H$	: ケーソンに働く全水平波力
$F_V$	: ケーソンに働く全鉛直波力
$f_H$	: 水平波力平均強度
$f_S$	: 滑動合成波力強度
$f_V$	: 鉛直波力平均強度
$H$	: 波高
$H_{max}$	: 最高波高
$H_{1/3}$	: 有義波高
$h$	: 堤体の設置水深
$h'$	: ケーソンの基面水深
$h_B$	: マウンド被覆ブロックの厚さ
$h_c$	: 静水面上ケーソン(上部工を含む)の天端高
$h_v$	: 基部直立部の高さ
$K_L^2$	: エネルギー消費率
$K_R$	: 反射率
$K_T$	: 伝達率
$L$	: 波長
$L_{1/3}$	: 有義波波長
$l'$	: 静水面と曲面壁の交点からの波圧測点までの水平距離
$P_{Hc}$	: 曲面部外部に働く波圧合力の水平成分
$P_{Hf}$	: 曲面部内部前半分に働く波圧合力の水平成分
$P_{Hr}$	: 曲面部内部後半分に働く波圧合力の水平成分
$P_{Hv}$	: 底版直立部に働く波圧合力
$P_{Vb}$	: 遊水室底面に働く波圧合力
$P_{Vc}$	: 曲面部外部に働く波圧合力の鉛直成分
$P_{Vf}$	: 曲面部内部前半分に働く波圧合力の鉛直成分
$P_{Vr}$	: 曲面部内部後半分に働く波圧合力の鉛直成分
$P_{Vu}$	: 底版下面に働く全揚圧力
$p$	: 波圧強度

$p_a$	: 空気圧縮衝撃圧強度	$w_0$	: 水の単位体積重量
$p_{ib}$	: 遊水室底面における波圧強度	$\alpha_2$	: 合田式におけるマウンド等の効果を表す波圧係数
$p_E$	: 実験による波圧強度	$\gamma_f$	: 半円部内部前半分の波圧に対する係数
$p_G$	: 合田式による波圧強度	$\gamma_r$	: 半円部内部後半分の波圧に対する係数
$p_{G1}$	: 合田式による静水面での波圧強度	$\gamma_s$	: 上部工による波圧の割増し係数
$p_{Gu}$	: 合田式による前端揚圧力強度	$\Delta l$	: 曲面下端と曲面と静水面との交点の間の水平距離, ただし, 上部工がある場合には曲面下端と上部工前面の間の水平距離
$p_{if}$	: 半円部内部前半分における波圧強度	$\epsilon_b$	: 底版の開口率
$p_{ir}$	: 半円部内部後半分における波圧強度	$\epsilon_f$	: 半円形部前半の開口率
$p_{max}$	: 波圧分布における最大値, あるいは不規則波圧の最大値	$\epsilon_r$	: 半円形部後半分の開口率
$p_u$	: 底版前端における揚圧力強度	$\theta_1$	: 静水面と半円部の交点に対する曲率中心からの仰角
$p_0$	: 半円部の下端での波圧強度	$\lambda_p$	: 位相差による波圧低減係数
$p_1$	: 静水面での波圧強度	$\lambda_u$	: 揚圧力低減係数
$p_s$	: 底版下端での波圧強度	$\lambda_1$	: ケーソン形状による低減係数
$R$	: 半円形部の半径	$\mu$	: 摩擦係数
$S$	: 滑動量		
$T$	: 波の周期		
$T_{1/3}$	: 有義波周期		
$t$	: 時間		