

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

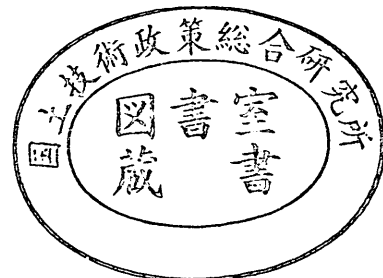
---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL. 30 NO. 4 DEC. 1991

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (Report of P. H. R. I.)

第30巻 第4号 (Vol.30, No.4) 1991年12月 (Dec.1991)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 直立消波ケーソンの部材波力特性と耐波設計法  
.....高橋重雄・下迫健一郎・佐々木均.....3~34  
(Experimental Study on Wave Forces Acting on Perforated Wall Caisson Breakwaters  
..... Shigeo TAKAHASHI, Ken-ichirou SHIMOSAKO and Hitoshi SASAKI)
2. 信頼性理論による防波堤の滑動安定性に関する理論的検討  
.....高山知司・藤井 久.....35~64  
(Probabilistic Estimation of Stability of Slide for Caisson Type Breakwaters  
..... Tomotsuka TAKAYAMA, Hisashi FUJII)
3. 繰り返し荷重を受ける粘土の強度・変形特性  
.....山崎浩之・善 功企・加賀谷宏基・館下 徹.....65~83  
(Strength and Deformation Characteristics of Clays due to Cyclic Loading  
..... Hiroyuki YAMZAKI, Koki ZEN, Hiroki KAGAYA and Toru TACHISHITA)
4. RI を利用した海底密度測定器の開発  
.....石塚浩次・根本孝志.....85~109  
(Development of Mud Layer Density Meter Using Radio Isotope  
.....Koji ISHIZUKA and Takashi NEMOTO)

# 1. 直立消波ケーソンの部材波力特性と耐波設計法

高橋重雄\*・下迫健一郎\*\*・佐々木均\*\*

## 要 旨

直立消波ケーソンに作用する波力に関して、従来の設計法では、消波部を無視して、ケーソン本体に波圧が働くものとし、合田式を準用する方法が示されている。しかしながら、この方法はケーソン全体の安定性に関するものであり、透過壁を含む各部材に作用する波力や、位相差の影響については考慮されておらず、設計上の技術課題のひとつとされている。

本研究では、直立消波ケーソンに作用する波力に関する水理模型実験を行い、各部材の波力特性を明らかにするとともに、ケーソン全体の安定性の検討と部材設計の両方に用いることができる新しい波力算定法を提案した。

直立消波ケーソンの設計において考慮すべき押し波時の位相として、各部材に作用する波力がピークとなる3つの位相を定義し、各位相における部材ごとの波力を明らかにした。すなわち、透過壁に作用する波力がピークとなる押し波時Ⅰ、遊水室後壁に作用する衝撃的波力がピークとなる押し波時Ⅱa、遊水室後壁にややゆるやかに変化する波力がピークとなる押し波時Ⅱbにおける各部材に作用する波力である。

これらの押し波時の波力の算定法として、合田式を準用し、各部材ごとに波力補正係数 $\lambda$ を用いて修正する方法を提案した。なお、衝撃的波力については、 $\alpha_2$ のかわりに、マウンド前肩幅の影響も考慮した衝撃波力係数 $\alpha_1$ と $\alpha_2$ のどちらか大きいほうを用いる。ただし、通常的设计条件では、遊水室がケーソン下端まででない場合、すなわち、遊水室下部に不透過壁がある場合の遊水室後壁にかかる波力を除いて、衝撃的波力はほとんど作用しない。

設計においては、全体の安定性、部材設計ともに、これらの位相のうちで最も厳しい位相に対して検討する必要がある。本設計法を用いることにより、マウンドが高い場合や遊水室下部に不透過壁がある場合など、従来の設計法では波力を適切に算定できなかった場合も含めたより広い範囲において、直立消波ケーソンに作用する波力を適切に算定できる。

本設計法で求められる直立消波ケーソンに作用する波力は、従来のケーソンに作用する波力と比較すると全体的に小さく、直立消波ケーソンは耐波安定性の面からも有利な構造であることが確かめられた。

キーワード：直立消波ケーソン、防波堤、波力、部材、衝撃碎波力

\* 水工部耐波研究室長  
\*\* 水工部耐波研究室

# 1. Experimental Study on Wave Forces Acting on Perforated Wall Caisson Breakwaters

Shigeo TAKAHASHI \*  
Ken-ichirou SHIMOSAKO \*\*  
Hitoshi SASAKI \*\*

## Synopsis

Perforated wall caissons are increasingly adopted as seawalls and breakwaters, because of their high wave-absorbing ability and high stability against waves.

However, the standard pressure formula for the perforated caissons has not been established yet. Especially wave forces for the design of the caisson members cannot be evaluated properly. The design of caisson members is crucial for perforated wall caissons in rough seas.

A series of model experiments have been carried out in order to investigate the characteristics of wave forces acting on perforated wall caissons.

The characteristics of wave forces acting on the members and the stability of the caisson are discussed, and a calculation method of the wave forces is proposed in this report.

The proposed method gives the wave pressure distributions based on Goda's pressure formula for ordinary vertical walls with some modification factors, which are defined respectively for the following three phases :

Phase I ; wave pressure at the perforated wall is maximum.

Phase II a ; impulsive wave pressure at the impermeable rear wall of wave chamber is predominant,

Phase II b ; slowly varying wave pressure at the rear wall is predominant.

The wave pressure distribution can be used for the design of the caisson members and also of the whole caisson.

The present paper also describes impact wave pressure on the perforated wall caisson. The wave force becomes very impulsive when the rubble mound foundation of the caisson is high. Such impulsive pressures can be greatly reduced by the perforated wall. The pressure formula presented here can evaluate the impulsive pressures.

**Key Words :** Perforated Wall Caisson, Breakwater, Wave Force, Structural Member, Impact Breaking Wave Force

---

\* Chief of Maritime Structures Laboratory, Hydraulic Engineering Division

\*\* Member of Maritime Structures Laboratory, Hydraulic Engineering Division

# 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	7
2. 既往の研究と本研究の目的 .....	7
2. 1 直立消波ケーソンの構造 .....	7
2. 2 消波特性に関する研究 .....	7
2. 3 波力特性に関する研究と現行設計法 .....	8
2. 4 本研究の目的と概要 .....	9
3. 実験の方法 .....	9
3. 1 実験水路と堤体断面 .....	9
3. 2 実験ケースと実験波 .....	11
3. 3 波力の測定方法 .....	11
4. ケーソン各部に作用する波力の特性（低マウンドの場合） .....	13
4. 1 波の作用状況と波圧波形の例 .....	13
4. 2 スリット部に作用する波力とそのピーク値 .....	14
4. 3 ケーソン前面不透過壁に作用する波力とそのピーク値 .....	15
4. 4 遊水室後壁および下床版に作用する波力とそのピーク値 .....	16
5. マウンドの影響による波力の増大 .....	17
5. 1 衝撃的波力の考え方 .....	17
5. 2 高マウンドの場合の衝撃波圧波形 .....	18
5. 3 スリット部に作用する衝撃的波力のピーク値 .....	19
5. 4 前面不透過壁に作用する衝撃的波力のピーク値 .....	20
5. 5 遊水室後壁に作用する衝撃的波力のピーク値 .....	20
6. スリット形状による波力特性 .....	21
6. 1 スリット部材の断面形状による波力の変化 .....	21
6. 2 スリット天端高の影響 .....	24
7. 直立消波ケーソンの耐波設計法 .....	24
7. 1 設計波力の考え方 .....	24
7. 2 各位相における波力補正係数 .....	24
7. 3 新しい波力算定法 .....	25
7. 4 新算定法に基づく直立消波ケーソンの波力の特徴 .....	31
8. まとめ .....	32
9. あとがき .....	33
参考文献 .....	33
主要記号一覧 .....	34

## 1. まえがき

直立消波ケーソンは、前壁が透過性の直立壁で、その背後に遊水室と呼ぶ室を有したもので、波を消すことができる特殊なケーソンである。この直立消波ケーソンは、Jarlan<sup>1)</sup>が1961年に孔あきケーソンを提案して以来広く注目を集めることになったもので、1962年にカナダのコモ湾において初めて施工された。わが国においても、高松港や神戸港などで縦スリットケーソンによる防波堤や岸壁が初めて施工されて以来、防波堤や護岸、岸壁などに多数用いられている<sup>2)</sup>。

直立消波ケーソンの消波特性については、これまでに多くの理論的・実験的研究が行われており<sup>3)4)5)6)</sup>、透過壁および遊水室の構造や波浪条件の違いによる反射率の変化がかなり明らかになっている。したがって、現在では現地の波浪条件に対応して適切な消波効果が得られる構造の選択が可能となっている。

一方、直立消波ケーソンに作用する波力については、通常の直立壁の場合と異なり、透過壁の形状や遊水室の幅、遊水室上床版の有無など、消波部の構造によっても複雑に変化する。しかしながら、その特性については十分に明らかにされておらず、一般的な耐波設計法はいまだ確立されていない。したがって、実際の設計においては通常の合田式を用い、必要に応じて模型実験による確認を行っている場合が多い。そのため、これまではおもに水深が浅く波高も小さい場所に用いられており、波浪条件の厳しい外海ではほとんど用いられていない。

しかしながら、直立消波ケーソンの耐波安定性が通常のケーソンに比べて高いことが明らかになるにつれて、厳しい波浪条件においても直立消波ケーソンの適用が検討されるようになってきている。たとえば、釜石湾口防波堤（最大水深63m）のように大水深・大波浪海域においても、二重横スリット型の消波部を有する直立消波ケーソンが用いられている。したがって、ケーソン各部材の設計および全体の安定性の検討に用いる設計波力の算定法を確立する必要がある。

本研究では、最も基本的な形状である縦スリット型を対象として、直立消波ケーソンの各部材に働く波力について検討を行った。すなわち、マウンドの影響やスリット部材の形状の違いによる波力の特性を明らかにし、新しい波力算定法を提案した。なお、本研究においては、遊水室の上床版のない構造のみを対象とした。上床版がある場合には、波作用時に遊水室内の水位が上昇し、上床版に大きな揚圧力が働く場合があることに注意する必要がある。

## 2. 既往の研究と本研究の目的

### 2.1 直立消波ケーソンの構造

直立消波ケーソンは、透過壁と遊水室からなる消波部をもつケーソンである。図-1は、その構造要素を模式化して示したものである。直立消波ケーソンは、透過壁の形状、上床版の有無、遊水室の深さなどにより、多様な構造形式が考えられる。透過壁の形状としては縦スリットが最も一般的であるが、横スリットや多孔壁が用いられることもある。上床版の有無については、天端上の利用条件によって決まることが多い。遊水室の深さについては、消波性能やケーソンの重量バランスなどによって決まり、遊水室がケーソン下端までなく、遊水室の下に不透過壁をもつ構造とする場合がある。さらに、透過壁を二重にしたケーソンや、縦スリットケーソンの特殊な例として曲面スリットケーソン<sup>7)8)</sup>や部分消波ケーソン<sup>9)</sup>などもある。

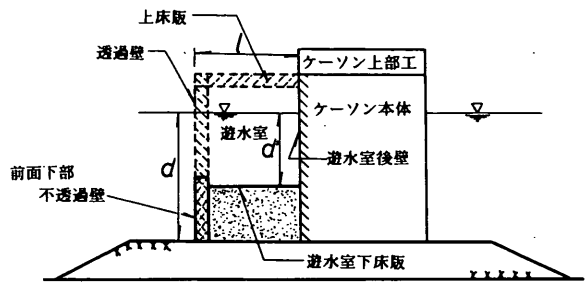


図-1 直立消波ケーソンの部材波力特性

### 2.2 消波特性に関する研究

直立消波ケーソンの消波性能は、波浪条件や構造条件によって大きく変化する。谷本・吉本<sup>3)</sup>は、直立消波ケーソンの反射率に関する理論的および実験的研究を行い、その特性を明らかにしている。それによると、反射率に影響する主要なパラメータは、波浪条件として水深波長比  $h/L$ 、波形勾配  $H/L$ 、構造条件として遊水室幅  $l$  と波長  $L$  の比  $l/L$ 、遊水室の深さ  $d'$  と前面水深  $d$  の比  $d'/d$  ( $=q$ )、スリット部の開口率  $\epsilon$  などである。したがって、波浪条件に応じて適切な構造諸元を選定することにより、反射率を小さくできる。ただし、反射率を最小にする構造諸元は必ずしも一義的に決まるわけではなく、たとえば、ある遊水室幅に対して最適な  $d'/d$  と  $\epsilon$  が存在する。なお、遊水室の深さ  $d'$  は遊水室内へ波の透過する割合を示すものであり、開口部下端までの深さが遊水室内の深さよりも小さい場合には、開口部下端までの深さを用いるのが妥当である。

遊水室幅については、消波対象とする波の周期が長い場合には、波長に応じて広くとることが望ましい。消波性能が最もよくなる遊水室幅は、 $l/L=0.10\sim 0.15$ 程度であり、この場合、 $d'/d$ の選択には比較的自由度が高く、 $d'/d=0.4\sim 1.0$ であれば、 $d'/d$ の値に応じて適切な $\epsilon$ ( $0.2\sim 0.4$ 程度)を選択することにより、計算上の反射率はほぼ0.2以下となる。

しかしながら、実際の設計においては、施工性や経済性を考慮すると十分な遊水室幅をとれない場合がある。こうした場合、遊水室幅に応じて適切なスリット部の深さや開口率を選択しなければならない。一般に、 $l/L < 0.10$ の場合、反射率を小さくするためには $d'/d=1.0$ とし、開口率 $\epsilon$ を0.2よりもかなり小さくする必要がある。ただし、その場合でも、 $l/L=0.10\sim 0.15$ の場合に比べて反射率は大きくなる。

### 2.3 波力特性に関する研究と現行設計法

スリット壁に作用する波力に関して、浦島ら<sup>10)</sup>はモリソン式を用い、抗力係数 $C_D$ 、質量係数 $C_M$ の値についての検討を行っている。しかしながら、直立消波ケーソンの場合はスリットの背後に遊水室を有しており、この方法を適用するためには遊水室内の水位上昇や後壁からの反射波の影響を考慮しなければならない。したがって、直立消波ケーソンのスリット部材に作用する波力を、モリソン式で適切に算定することはむずかしい。

堀口ら<sup>11)</sup>は、直立消波ケーソンに作用する波力に関して、ポテンシャル理論を用いた波力の計算を行い、比較的波高の小さい領域では実験結果と一致することを示している。ただし、波高が大きくなると乱れが大きくなりポテンシャル理論が適用できなくなるため、実際の設計で対象となるような波高の大きい波については、この方法を用いることができない。

永井ら<sup>12)</sup>は、スリット型ケーソンと通常のケーソンの波圧実験を行い、砕波が作用する場合には、スリット型の波圧合力は通常型の7割程度に減少するのに対して、重複波の場合は通常型とほとんど変わらないことを示している。

谷本・高橋ら<sup>13)14)</sup>は、各種の直立消波ケーソンに対して滑動実験を行い、ケーソンの滑動限界波高から波力を逆算し、合田式における波圧分布を準用した波力算定法を提案した。現行の設計においては、これらの結果に基づいて、直立消波ケーソンの滑動や転倒に対する安定性の検討法が示されている<sup>15)</sup>。この方法では、ケーソンの滑動や転倒に対する安定性は、波の峰が遊水室後壁に達する位相で決まり、このとき透過壁では前面からの波力

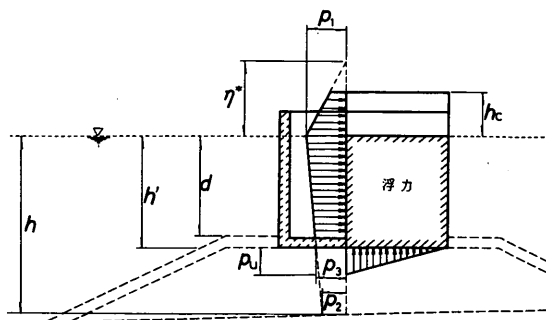


図-2 現行設計法における安定性の検討に用いる波圧分布

と遊水室内からの波力が打ち消し合うため、ほとんど0になると考えている。また、揚圧力についても、遊水室下床版に下向きに働く波力と打ち消し合うため、消波部の揚圧力は0としている。すなわち、図-2に示すように、消波部を除いたケーソン本体に波圧が働くものとし、次式で計算される波圧を用いて波力の算定を行うものである。

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos \beta) \lambda_1 H_D \quad (1)$$

$$p_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta)(\alpha_1 + \lambda_2 \alpha_2 \cos^2 \beta) \lambda_1 \omega_0 H_D \quad (2)$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh(2\pi h/L)} \quad (3)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (4)$$

$$p_0 = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta) \lambda_1 \alpha_1 \alpha_3 \omega_0 H_D \quad (5)$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[ \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2 \quad (6)$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h_b - d}{3hb} \left( \frac{H_D}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_D} \right\} \quad (7)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left[ 1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right] \quad (8)$$

ここに

$\eta^*$ : 静水面上波圧強度が0となる高さ (m)

$p_1$ : 静水面における波圧強度 (tf/m<sup>2</sup>)

$p_2$ : 海底面における波圧強度 (tf/m<sup>2</sup>)

$p_3$ : 直立壁底面における波圧強度 (tf/m<sup>2</sup>)

$p_0$ : 消波部を除いたケーソン本体部の底面前趾での揚圧力強度 (tf/m<sup>2</sup>)

$h$ : 直立壁前面における水深 (m)

$h_b$ : 直立壁前面から沖側へ有義波高の5倍だけ離れた地点での水深 (m)

- $h'$  : 直立壁底面の水深 (m)  
 $d$  : 根固め工またはマウンド被覆工天端のいずれか小さいほうの水深 (m)  
 $w_0$  : 海水の単位体積重量 (tf/m<sup>3</sup>)  
 $H_0$  : 設計計算に用いる波高 (m)  
 $L$  : 水深  $h$  における設計計算に用いる波長 (m)  
 $\min \{ a, b \}$  :  $a$  または  $b$  のいずれか小さい値  
 $\alpha_1$  : 合田式において、重複波的波力成分を表すパラメータ  
 $\alpha_2$  : 合田式において、マウンド高さや海底勾配の影響等による衝撃的波力成分を表すパラメータ  
 $\beta$  : 直立壁法線の垂線と波の主方向から  $\pm 15^\circ$  の範囲で最も危険な方向となす角度 (度)  
 $\lambda_1, \lambda_2$  : 直立消波ケーソンの構造等による波圧の補正係数

補正係数  $\lambda_1, \lambda_2$  の値として、平均的には  $\lambda_1 = 1.0, \lambda_2 = 0$  で与えることができるとされている。

しかしながら、こうした現行の設計法には以下に示すいくつかの問題点が残されている。

- ①各部材の設計波圧が示されていない。
- ②波の峰が遊水室後壁にあるときに、滑动や転倒に対して危険となるとは限らない。
- ③マウンド高さや遊水室の深さの効果が明確でない。
- ①について谷本ら<sup>16)</sup>は、二重横スリットケーソンの部材に働く波力について実験を行い、各部材に働く最大波力の分布を示すとともに、各部材に働く波力が最大となるときの他の部材の同時波圧分布についても示している。しかしながら、種々の条件における消波部の一般的な設計法ははまだ確立されていない。

③について村田ら<sup>17)</sup>は、遊水室の下に不透過壁を有する横スリットケーソンに関する実験を行っている。その中で、設計波力の算定法として合田式を準用する場合に、条件によってはマウンドの影響を表すパラメータ  $\alpha_2$  を考慮する必要があり、さらに、揚圧力についても、消波部を含むケーソン全体に作用すると考えたほうが適切な場合があることを示している。ただし、遊水室の深さの影響については明らかにされていない。

## 2.4 本研究の目的と概要

### (1) 研究の目的

今回の研究は、遊水室の下に不透過部を有する構造の縦スリットケーソンを対象に、その耐波設計法を確立することを目的としている。特に、以下の点について検討を行った。

- ①各部材およびケーソン全体に作用する波力の特性と

### 位相差の影響

ケーソン全体に作用する合力が最大となる位相は、必ずしも遊水室後壁に働く波力が最大となる位相とは限らない。そこで、従来の設計法のように1つの位相だけでなく、各部材に働く波力が最大となる位相ごとにケーソン全体の波圧分布を与えた。このような位相を考慮した設計法は、すでに二重円筒ケーソンの波力算定法<sup>18)</sup>で用いられている。

### ②マウンドの影響による波力の増大

従来の設計法では、マウンドの影響による波力の増大は考慮されていないため、高マウンドの場合に波力を過小に評価する可能性がある。そこで、高マウンドの場合の波力について検討を行い、マウンドの影響を考慮した波力算定法を示した。

### ③スリット部材の形状の違いによる波力の特性

波に対するスリット部材の抵抗は、部材の断面形状の違いによって異なる。断面形状を変えた場合の波力特性について検討を行った。

### ④遊水室形状の違いによる波力の特性

遊水室後壁に作用する波力は、遊水室深さ  $d'$  と前面水深  $d$  の比  $d'/d$  および遊水室幅  $l$  と波長  $L$  の比  $l/L$  の値によっても変化する。このような遊水室形状の違いによる波力の特性について検討を行った。

新しい波力算定法では、これらの点を考慮して、静水面における波圧  $p_1$  を、式(2)のかわりに次式で定義した。

$$p_1 = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) (\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_2 \alpha^* \cos^2 \beta) w_0 H_0 \quad (9)$$

$$\alpha^* = \max \{ \alpha_2, \alpha_1 \}$$

ここに、 $\alpha_1$  は衝撃波力係数とよばれる新しいパラメータである。

新しい算定法は、従来のように  $\lambda_1, \lambda_2$  を一定の値として与えるのではなく、押し波時の波力を検討する3つの位相それぞれに対して、各部材ごとに異なった  $\lambda_1, \lambda_2$  の値を与えている。したがって、これらの係数にどのような値を与えるかが重要である。本報告では、各部材に作用する波力の特性を明らかにするとともに、これらの係数について検討を行っている。

## 3. 実験の方法

### 3.1 実験水路と堤体断面

実験は、図-3に示す小型造波水路で実施した。造波板前面から堤体前面まで28.5mあり、水路床は造波板中立位置から7.7~12.5mの区間が1/16勾配で、それ以外





表-1 実験波

水深 h (cm)	周期 T (s)	波高 H (cm)
55	1.5	10, 20, 25
	2.0	10, 20, 30
	2.5	10, 20, 25
63	1.5	10, 20, 25
	2.0	10, 20, 30
	2.5	10, 20, 25
71	1.5	10, 20, 25
	2.0	
	2.5	

3.2 実験ケースと実験波

実験は規則波を用いて行った。実験に先立ち、水路内に模型を設置しない状態で通過波検定を実施した。図-6は、造波板のストロークを指定するダイヤル値 $e$ と模型設置位置での通過波高 $H$ の関係を示したもので、水深 $h$ が63cmの場合の例である。通過波高は、模型の設置予定位置の中心と、その前後に波長 $L$ の1/4の間隔でセットした3台の波高計によって測定し、その平均値で与えている。波高はストロークとともにほぼ直線的に増大するが、ストロークが大きくなると、砕波による波高の頭打ちがみられる。

これらの通過波検定結果をもとに、表-1に示すような実験波を決定した。3種の水深に対して周期をそれぞれ3種類、各周期ごとに波高レベルを3段階に変化させている。なお、周期については、前述のように周期の短い波を消波対象波、周期の長い波を安定性の対象波にしている。

表-2は実験条件の一覧である。スリット形状を変えた実験は、マウンド無と高マウンドの場合について行っている。

3.3 波力の測定方法

実験では、ケーソンの各部材に作用する波力を、超小型波圧計および3分力計により測定した。図-7は波圧計と3分力計の配置を示したものである。実験に用いた3分力計は、X、Y、Zの3成分の荷重を同時に計測できるが、ここでは図中に示した成分のみを測定した。なお、分力計による測定は、水路幅方向に対して中央部の幅22cmを対象とし、それぞれの部材に働く波力を測定した。

一般に分力計を用いた測定系の固有振動数は、波圧計の固有振動数に比べて小さいため、分力計では衝撃的な

表-2 実験条件

水深 h (cm)	マウンド上水深と 前面水深比 $d/h$	スリット条件
55	1.0	矩形1 円形 駒形 矩形2
63		
71		
55	低マウンド	矩形1
63		
71		
55	高マウンド	矩形1 円形 駒形 矩形2
63		
71		

波力を正確に測定できない場合がある。そこで、ケーソン模型をハンマーでたたき、測定系の固有振動数を調べた。その結果、固有振動数は空中、水中いずれで測定した場合も、各成分とも400~500 Hz程度であり、実験で得られた波圧波形の振動数よりもかなり大きく、実用上問題ないことがわかった。図-8はスリット部に作用する波力に関して、波圧計により得られた測定値と分力計による測定値を、単位面積あたりの平均波力強度に直して相関をとったもので、押し波時の岸向き方向の波力を正としている。負の波力について、 $h=63$ cmのときに波

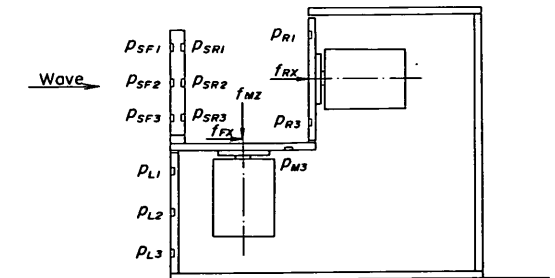


図-7 波圧計および3分力計の配置

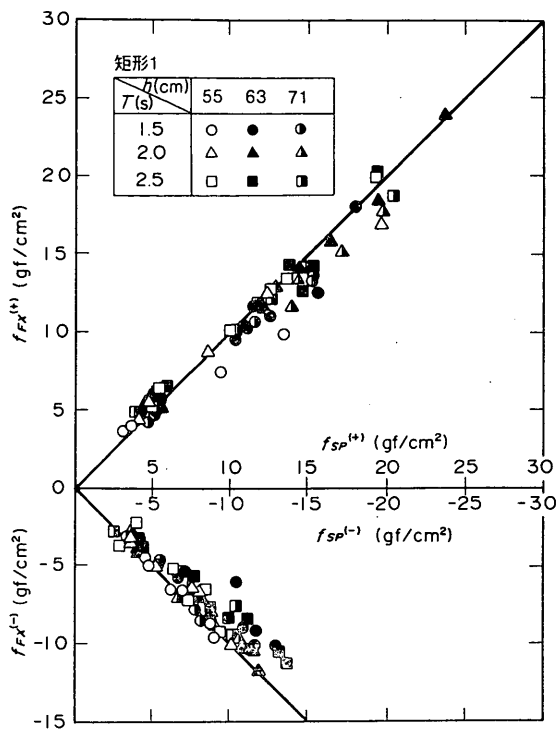


図-8 波圧計と分力計の測定値の相関

圧計のほうが分力計よりもやや大きくなっているが、全体として波圧計と分力計の測定値はよく一致している。したがって、今回の実験におけるケーソン全体の合力は、下部不透過壁以外はすべて分力計の値を用いることにした。

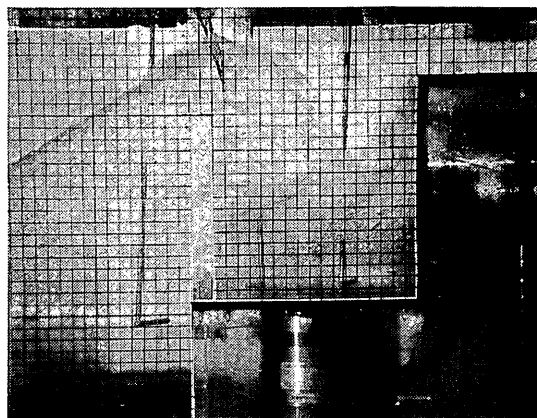


写真-1(2) 波の作用状況(押し波時II a)

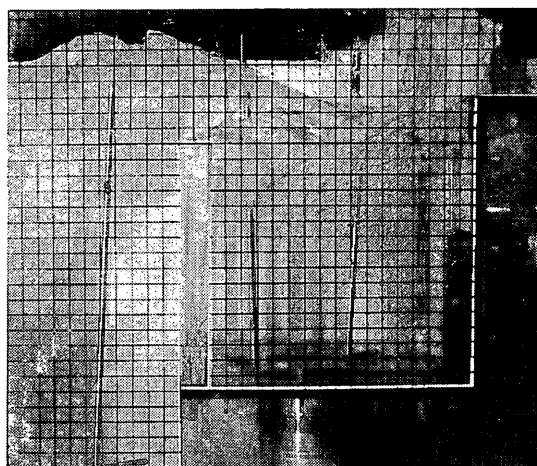


写真-1(3) 波の作用状況(押し波時II b)

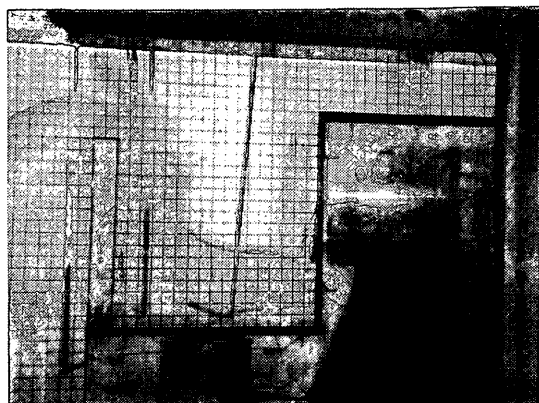


写真-1(1) 波の作用状況(押し波時I)

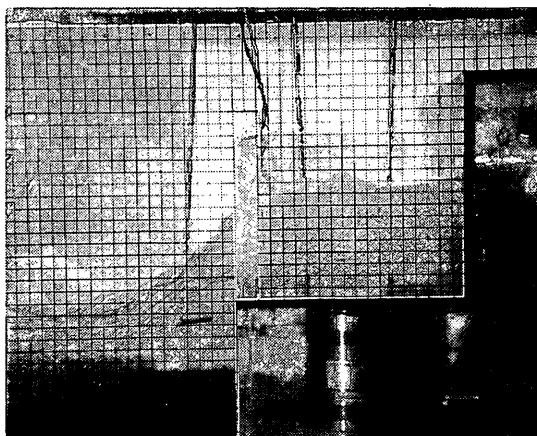


写真-1(4) 波の作用状況(引き波時II)

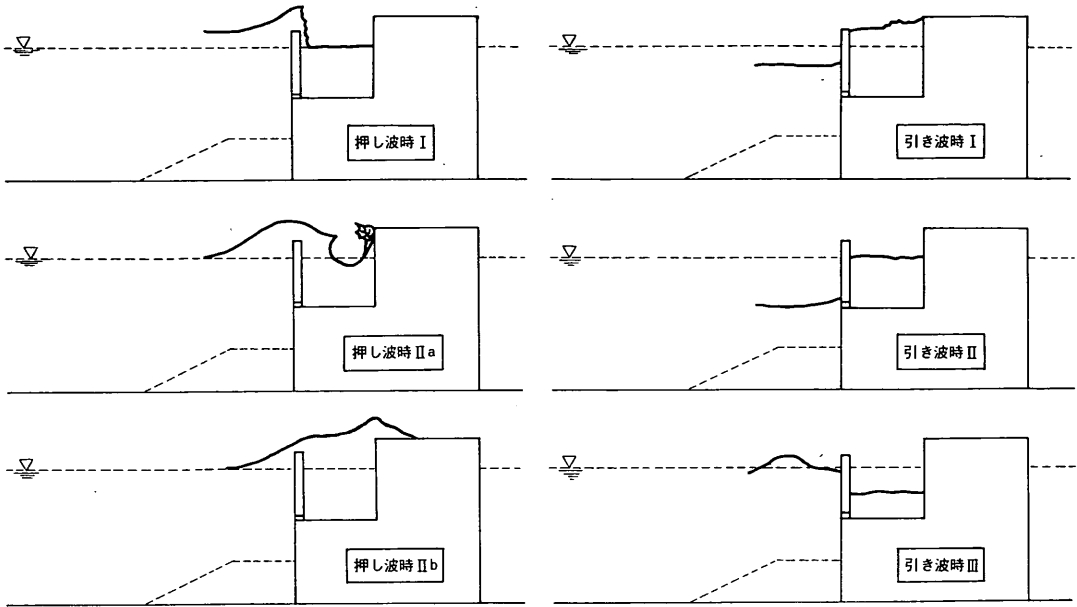


図-9 各位相における波の作用状況

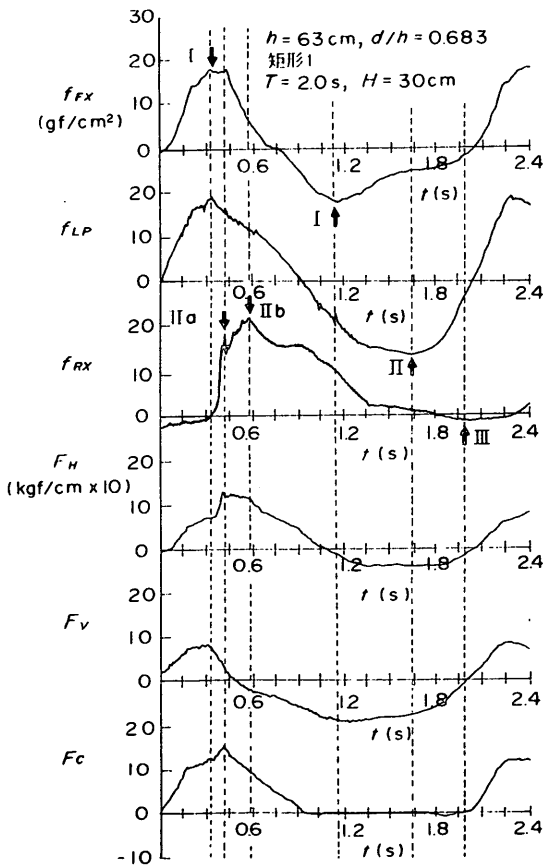


図-10 波力の時間変化の例

#### 4. ケーソン各部に作用する波力の特性（低マウンドの場合）

##### 4.1 波の作用状況と波圧波形の例

写真-1(1)~(4)および図-9は、直立消波ケーソンの波の作用状況の例を示したものである。直立消波ケーソンの設計においては、図-9に示した6つの位相を考慮する必要がある。すなわち、押し波時については以下の3つの位相を考える。

- ①押し波時Ⅰ：スリット部の波力が最大となる位相
  - ②押し波時Ⅱa：遊水室後壁に衝撃的な波力のピークが現われる位相
  - ③押し波時Ⅱb：遊水室後壁に比較的ゆるやかに変化する波力のピークが現われる位相
- 一方、引き波時についても以下の3つの位相を考える。
- ①引き波時Ⅰ：スリット部の波力が負のピークとなる位相
  - ②引き波時Ⅱ：ケーソン前面の水位が最も低下する位相
  - ③引き波時Ⅲ：遊水室内の水位が最も低下する位相

図-10は、波力の時間変化の例であり、スリット部、前面不透過壁、遊水室後壁の各部材に作用する単位面積あたりの平均波力強度（それぞれ  $f_{FX}$ 、 $f_{LP}$ 、 $f_{RX}$  と表す）と、単位幅あたりの全水平波力  $F_H$ 、全鉛直波力  $F_V$ 、滑動合成波力  $F_C$  を示している。鉛直波力は上向きを正にとっている。滑動合成波力  $F_C$  はケーソン全体の滑動安

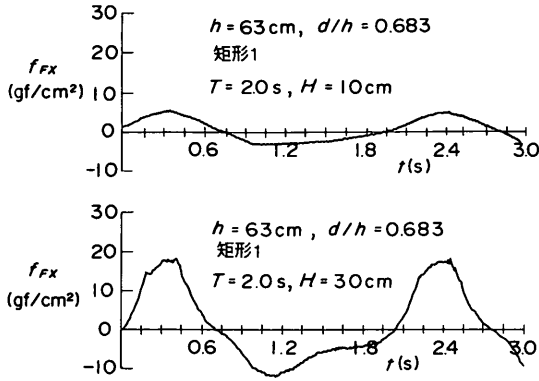


図-11 スリット部の波力の時間変化の例

定性の検討に用いる波力で、次式で定義される。

$$F_c = F_H \pm \mu F_V \quad (10)$$

ここに、±は $F_H$ の正負に対応している。また、 $\mu$ は摩擦係数(=0.6)である。なお、全鉛直波力 $F_V$ が負(下向き)の場合、 $F_V$ はケーソンの安定性を高める効果がある。このとき、 $|\mu F_V| > |F_H|$ であれば、水平波力を考慮しても、ケーソン全体としては安定性が高く、計算上は $F_c$ と $F_H$ の符号が逆になる。そこで、このような場合は $F_c = 0$ とする。図-10の $F_c$ において、0.9~1.8s前後がこれに相当する。

この図から、押し波時Ⅰでスリット部と前面不透過壁の波力がほとんど同時に正のピークとなっていることがわかる。そのあと、押し波時Ⅱaで遊水室後壁の波力に鋭いピークが現われ、やや遅れて押し波時Ⅱbで比較的ゆるやかなピークとなっている。遊水室後壁の波力については、この例ではⅡbで最大となっているが、条件によってはⅡaで最大となる場合もある。なお、周期の長い波や波高の小さい波が作用する場合には、Ⅱaのピークは現われぬこともある。また、滑動合成波力は押し波時Ⅱaで最大となっているが、条件によっては押し波時Ⅰや押し波時Ⅱbで最大となることもある。

引き波時の波力については、ケーソン前面と遊水室内の水位変化の位相差により生じるもので、引き波時Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの順に現われている。

本章では、おもに低マウンドでスリット形状が矩形Ⅰのケースを対象とし、それぞれの部材ごとに、押し波時および引き波時における波力のピーク値についての検討を行う。なお、高マウンドにおける衝撃的波力については5章で検討する。

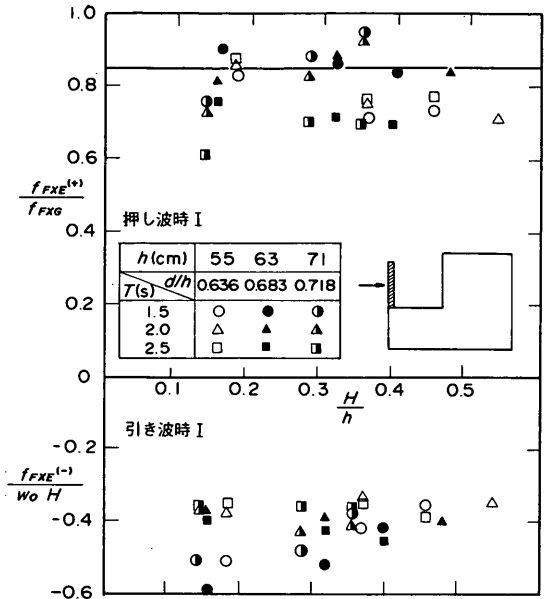


図-12 スリット部の波力のピーク値

#### 4.2 スリット部に作用する波力とそのピーク値

##### (1) 波圧波形

図-11は、低マウンドの場合のスリット部に作用する平均波力強度 $f_{FX}$ の時間変化の例を示したものである。スリット部に作用する波力は、直立壁の場合と異なり、ケーソン前面と遊水室内の水位差による静水圧的な力も影響する。また、波が開開口を透過することにより、直立壁に比べて波力が減少し、特に、衝撃的な波力は発生しにくい。ただし、高マウンドになると、直立壁の場合よりは小さいが、やや衝撃的波力が作用することもある。図-11の場合、低マウンドであるので、波高が大きくなってもほとんど衝撃的な波力は作用していない。

##### (2) 押し波時Ⅰ

図-12の上側は、低マウンドの場合について、スリット部に作用する平均波力強度の正のピーク値 $f_{FXE}^{(+)}$ (押し波時Ⅰ)を、横軸に波高水深比 $H/h$ をとって示したものである。ただし、 $f_{FXE}^{(+)}$ は直立壁に対する合田式の計算値 $f_{FXG}$ で無次元化している。なお、合田式においてマウンドの影響を表すパラメータ $\alpha_2$ は0としている。

押し波時Ⅰの波力については、遊水室内の水深が小さい場合、すなわち $h=55$ cmでは、周期の違いによる変化はあまりなく、波高が小さいときにやや大きな値となっているものの、全体的にばらつきは小さい。これに対して、それ以外の水深では、2.5sの波に対する値が

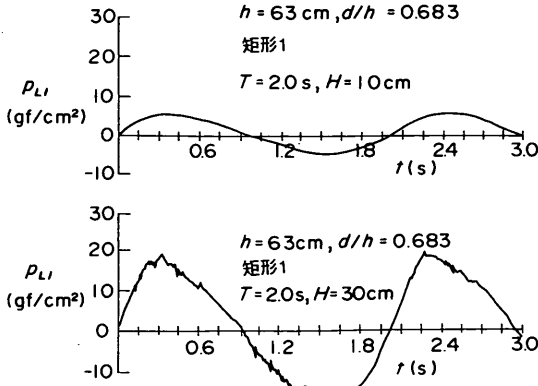


図-13 前面下部不透過壁の波圧の時間変化の例

1.5 s, 2 s の波に対する値に比べて明らかに小さくなっている。これは、周期が長いと波長も長くなり、ケーソン前面と遊水室内の水位差が付きにくくなるためと考えられる。遊水室内の水深が大きい場合、すなわち  $h = 71\text{cm}$  では、波高が大きくなるにつれて  $f_{FXE}^{(+)} / f_{FXG}$  の値も大きくなっている。これは、波高が大きくなるほど水位差が大きくなるためと考えられる。

$f_{FXE}^{(+)} / f_{FXG}$  の値は、合田式における波力の補正係数に相当するものである。スリット部に作用する押し波時 I の波力を式 (9) および式 (3), (4) を用いて表すものとし、式 (9) における  $\lambda_1, \lambda_2$  を、スリット部に関する補正係数を表すものとして  $\lambda_{s1}, \lambda_{s2}$  と定義すると、上述の特徴をすべて表すことはできないが、やや安全側の値として  $\lambda_{s1} = 0.85$  程度、 $\lambda_{s2} = 0$  が妥当と考えられる。すなわち、通常の条件においてはスリット部には衝撃的波力は作用せず、平均的には直立壁の場合に比べて 15% 程度波力が減少することになる。なお、この場合の  $\lambda_{s1}$  は  $p_1$  の補正のみに用いており、式 (1) で表される波力の作用高さ  $\eta^*$  は補正していない。

(3) 引き波時 I

図-12 の下側は、引き波時 I の負のピーク値  $f_{FXE}^{(-)}$  を、 $w_0 H$  で無次元化した値を示している。ここに、 $w_0$  は水の単位体積重量である。引き波時 I の波力については、波高が大きくなるにつれて、 $-0.4 w_0 H$  程度の値に近づいている。ただし、実際にはスリット部全体に  $0.4 w_0 H$  の波圧が等分布で作用しているわけではなく、スリット前面と遊水室内との水位差による静水圧的な力で、台形状の分布であると考えられる。ここでは示していないが、それぞれの水位は、平均的にみると前面で  $0.35 H$  程度低下し、遊水室内は逆に  $0.35 H$  程度上昇し

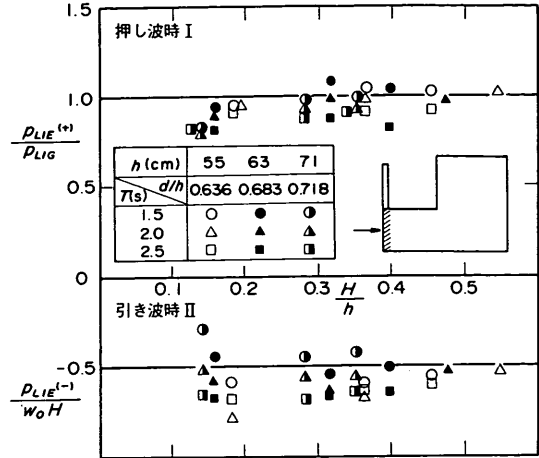


図-14 前面下部不透過壁の波圧のピーク値

ている。したがって、静水面上  $0.35 H$  の位置で 0、静水面上  $0.35 H$  で  $0.7 w_0 H$  の三角形分布、そしてそれ以下では  $0.7 w_0 H$  の等分布であるような台形分布となる。ただし、単位面積あたりの平均波力強度に換算すると、波高によって多少異なるが、ほぼ  $0.4 w_0 H$  程度の値となる。

4.3 ケーソン前面不透過壁に作用する波力とそのピーク値

(1) 波圧波形

図-13 は、ケーソン前面不透過壁に作用する波圧  $p_{L1}$  の時間変化の例を示したものである。前面不透過壁では、上方のスリット部を波が透過するため、衝撃的波力は発生しにくい。ただし、通常の直立壁の場合でも、静水面よりも下側ではそれほど大きな衝撃的波力は発生しないため、前面不透過壁に作用する波力は通常の直立壁の場合とあまり変わらず、特に、スリット部が静水面付近のみで、不透過壁の割合が大きくなると、通常の直立壁に作用する波力とほとんど同じになると考えられる。図-13 の場合は、低マウンドであり、しかもスリット部の割合が比較的大きいため、波高が大きくなっても衝撃的波力はほとんど生じていない。

(2) 押し波時 I と引き波時 II

図-14 は、ケーソン前面不透過壁に作用する波圧のピーク値を示したものである。ただし、正のピーク値  $p_{L1E}^{(+)}$  は、 $p_{L1}$  と同じ位置における直立壁の場合の合田式 ( $a_2 = 0$ ) による計算値  $p_{L1C}$  で無次元化しており、また、負のピーク値  $p_{L1E}^{(-)}$  は  $w_0 H$  で無次元化して示している。

押し波時の波圧については、直立壁に対する合田式の計算値とほぼ一致している。すなわち、前面不透壁に作用する波力を、スリット部と同様に式(9)および式(3)、(4)を用いて表すものとし、式(9)における $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ を、前面不透壁における補正係数を表すものとして $\lambda_{L1}$ 、 $\lambda_{L2}$ と定義すると、 $\lambda_{L1}=1.0$ 、 $\lambda_{L2}=0$ と考えられる。引き波時の波圧は、平均すると $-0.5w_0H$ 程度であり、引き波時Ⅱにおいては前面の水位が $0.5H$ 低下すると考えてよい。これは通常の不透過なケーソンにおける引き波時の波力と同じ程度である。

#### 4.4 遊水室後壁および下床版に作用する波力とそのピーク値

##### (1) 波圧波形

遊水室内の後壁および下床版に作用する波力は、遊水室の深さや周期、波高等の違いによってその波形が大きく変化する。図-15、16は遊水室後壁および下床版に作用する波力の時間変化の例を示したものである。

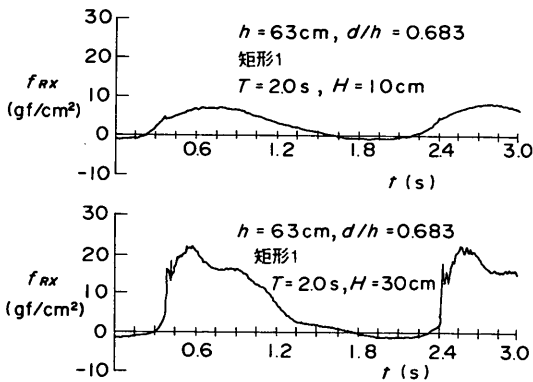


図-15 遊水室後壁の波力の時間変化の例

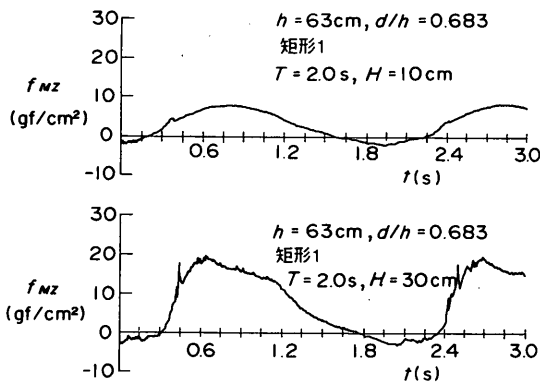


図-16 遊水室下床版の波力の時間変化の例

遊水室後壁には、まず遊水室内の水位が低下している状態で、スリット部を透過してきた水塊によるやや衝撃的な波力のピークが現われ、その後、やや遅れてスリット部を透過、あるいは越波した水塊による比較的ゆるやかに変化する波力のピークが現われる。すなわち、4.1で定義した押し波時Ⅱaと押し波時Ⅱbであり、図-15でも見られるように二山のピークをもつ波力波形となる。遊水室下床版に働く鉛直波力についても、後壁の波力と同じような時間変化を示している。ただし、こうした現象は種々の条件によって異なり、たとえば、波高が小さい場合には、衝撃的波力のピークが現われないことがあり、また、スリット部の天端高が低く、遊水室の幅が比較的狭い場合には、越波によって遊水室後壁の上部に局部的に衝撃的波力が作用することもある。

押し波時ⅡaとⅡbのどちらの波力が大きいかは、マウンド高さ、遊水室深さ、波高、周期等によって異なる。したがって、遊水室後壁および下床版に働く押し波時の波力については、ⅡaとⅡbに分けて検討する必要がある。なお、波高が非常に小さい場合や周期の長い場合には、衝撃的波力は生じない。また、遊水室の深さが前面水深と等しい場合にも、衝撃的波力は発生しにくくなる。本章では押し波時Ⅱbの重複的波力と引き波時の波力について検討し、衝撃的波力については5章であらためて検討する。

##### (2) 押し波時Ⅱb

図-17は、遊水室後壁に作用する波力の押し波時Ⅱbにおける値 $f_{RXE}^{(+)}$ を、直立壁に対する合田式( $\alpha_2=0$ )の計算値 $f_{RXG}$ で無次元化して示したものである。ややばらつきが大きいのが、全体的には波高が大きくなるにつれて値が小さくなる傾向がある。これは、波高が大きいか

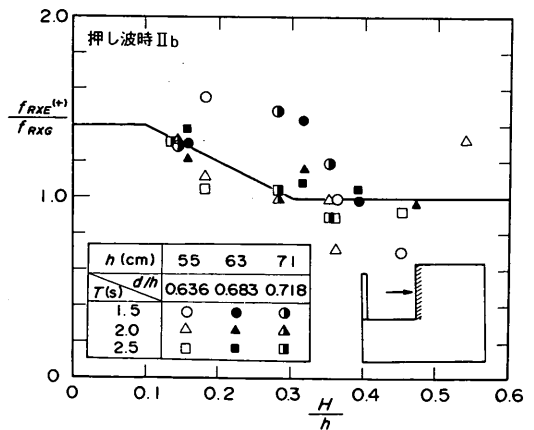


図-17 押し波時Ⅱbにおける遊水室後壁の波力

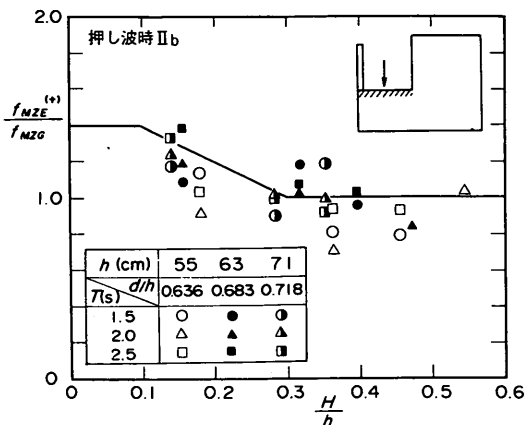


図-18 押し波時Ⅱbにおける遊水室下床版の波力

ドスリット部における消波効果が顕著になり、後壁に作用する波の勢いが相対的に弱められるためである。図中の実線は、実験値のほぼ平均的な値を示しており、次式で表される波力補正係数  $\lambda_{R1}$  に相当する。

$$\lambda_{R1} = \begin{cases} 1.4 & : H/h \leq 0.1 \\ 1.6 - 2H/h & : 0.1 < H/h < 0.3 \\ 1.0 & : H/h \geq 0.3 \end{cases} \quad (11)$$

ただし、 $\lambda_{R1}$  は式(9)における  $\lambda_1$  で、遊水室後壁における補正係数を表すものである。なお、 $\lambda_2$  に対応する  $\lambda_{R2}$  は 0 とする。

図-18は、遊水室下床版に作用する波力について、図-17と同様に示したものである。後壁の波力とほぼ同様の傾向があり、補正係数  $\lambda_{R1}$  は  $\lambda_{R1}$  と同じく式(11)で表されることがわかる。

### (3)引き波時Ⅲ

遊水室後壁については、通常は引き波時の波力が問題となることはないが、ケーソン内の中詰土圧や静水圧を考える場合は、遊水室内の水位が最も低下した状態である引き波時Ⅲについて検討しておくことが必要となる。

図-19は、遊水室下床版の波圧の負のピーク値を波高との関係で示したもので、遊水室内の水位低下量を表していると考えてよい。波高が大きくなると水位低下量は頭打ちになっており、水深が浅い、すなわち遊水室内の静水位が低いほど、水位低下量も小さい。また、同じ水深の場合、周期が長いほど水位低下量は大きくなっている。今回の実験結果における平均的な水位低下量  $\eta_1^-$  は、次式で与えられる。

$$\eta_1^- = \{ \min(0.6H, 0.35d') \} \quad (12)$$

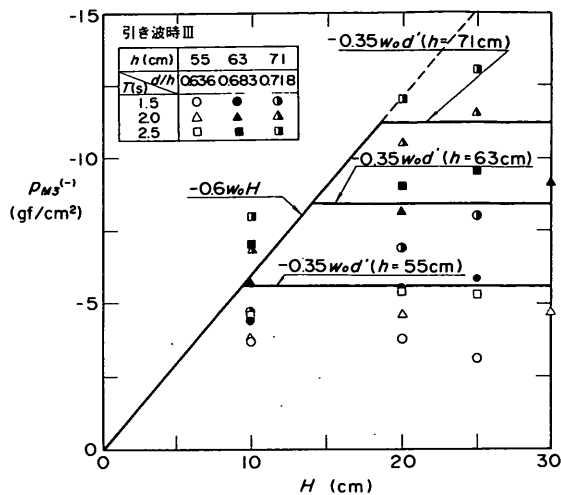


図-19 遊水室下床版の負の波圧のピーク値

すなわち、図中に実線で示したように、波高が小さいうちは波高に比例して  $0.6H$  だけ低下し、波高が大きくなると、 $0.35d'$  ( $d'$  は遊水室の深さ) で頭打ちとなると推定した。

## 5. マウンドの影響による波力の増大

### 5.1 衝撃的波力の考え方

通常の直立壁の場合、マウンドが高くなるにつれて波力は増大する。合田式においてはこの影響を  $a_2$  によって考慮している。ただし、マウンドがかなり高く、いわゆる衝撃砕波力が作用するような場合には、合田式の計算値よりも大きな波力が作用するため、 $a_2$  では波力を適切に評価できない。このような場合には、波力における衝撃的成分を評価する適切なパラメータを与える必要がある。

谷本・高橋・北谷<sup>14)</sup>は、混成堤に働く衝撃砕波力に関する実験を行い、種々の条件における波力の算定図を与えている。著者らは、これらの実験結果をもとに、 $a_2$  のかわりに衝撃的な波力成分を表す衝撃波力係数  $a_1$  を定義した<sup>19)</sup>。ここに、 $a_1$  は波高の影響を表すパラメータ  $a_{10}$  と、マウンド形状の影響を表すパラメータ  $a_{11}$  の積であり、 $a_1$  および  $a_{10}$  は次式で表される。

$$a_1 = \begin{cases} 0 & : a_{11} \leq 0 \\ a_{10} \cdot a_{11} & : a_{11} > 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$a_{10} = \begin{cases} \frac{H}{d} & : \frac{H}{d} \leq 2 \\ 2.0 & : \frac{H}{d} > 2 \end{cases} \quad (14)$$



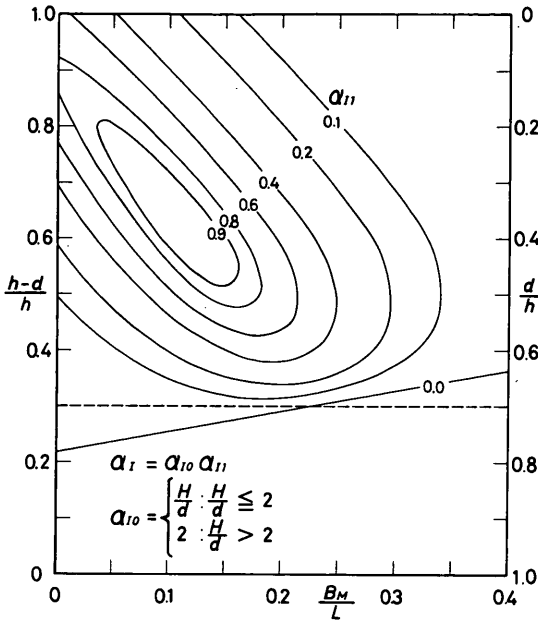


図-20 マウンド形状による  $\alpha_{11}$  の算定図

一方、 $\alpha_{11}$  の値は図-20から読み取ることができる。ここに、

- $h$  : 堤体設置位置における水深
- $d$  : マウンド天端上の水深
- $B_M$  : マウンド前肩幅
- $L$  : 水深  $h$  における波長

である。 $B_M/L = 0.1 \sim 0.15$ 、 $(h-d)/h = 0.6$ 前後のとき、衝撃的波力が最も大きくなるのがわかる。なお、 $\alpha_{11}$  の値は次式で計算することができる。

$$\alpha_{11} = \begin{cases} \frac{\cos \delta_2}{\cosh \delta_1} & : \delta_2 \leq 0 \\ \frac{1}{\cosh \delta_1 (\cosh \delta_2)^{1/2}} & : \delta_2 > 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\delta_1 = \begin{cases} 20 \delta_{11} & : \delta_{11} \leq 0 \\ 15 \delta_{11} & : \delta_{11} > 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\delta_2 = \begin{cases} 4.9 \delta_{22} & : \delta_{22} \leq 0 \\ 3 \delta_{22} & : \delta_{22} > 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\delta_{11} = 0.93 \left( \frac{B_M}{L} - 0.12 \right) + 0.36 \left( \frac{h-d}{h} - 0.6 \right) \quad (18)$$

$$\delta_{22} = -0.36 \left( \frac{B_M}{L} - 0.12 \right) + 0.93 \left( \frac{h-d}{h} - 0.6 \right) \quad (19)$$

なお、 $\delta_1$  および  $\delta_2$  は図-20における  $\alpha_{11}$  の傾向を表すために便宜的に導入したものである。

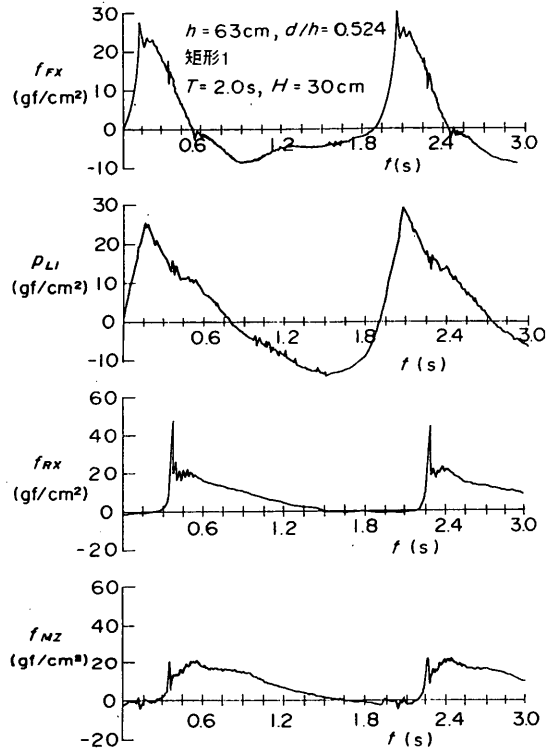


図-21 高マウンドにおける各部材に作用する波力の時間変化の例

$\alpha_{11}$  は、 $H/d \geq 2$  で  $d/h = 0.4$ 、 $B_M/L = 0.12$  のときに最大値 2.0 となる。また、 $d/h > 0.7$  では、ほとんど  $\alpha_{11} = 0$  であり、合田式における  $\alpha_2$  よりも小さくなる。したがって、従来の合田式で波圧を計算する場合は、式(9)で示したように  $\alpha_2$  と  $\alpha_{11}$  のどちらか大きいほうを、従来の  $\alpha_2$  のかわりに用いる。

本研究では、直立消波ケーソンにおいて衝撃的波力が作用するような高マウンドの場合についても検討しているが、上述の結果に基づき、 $\alpha_{11}$  を用いて整理した。ただし、遊水室後壁に働く衝撃的波力は、スリット部や前面不透過壁の場合と異なり、マウンドの形状だけでなく、遊水室の深さや幅によっても変化する。そのため、遊水室後壁についてはこれらの影響も考慮したパラメータ  $\alpha_{11}'$  を新たに定義し、 $\alpha_{11}'$  を用いて整理した。

## 5.2 高マウンドの場合の衝撃波圧波形

図-21は、各部材に作用する波力の時間変化を、高マウンドの場合について示したものである。スリット部  $f_{FX}$  では、押し波時 I のピークでやや切り立った波形と

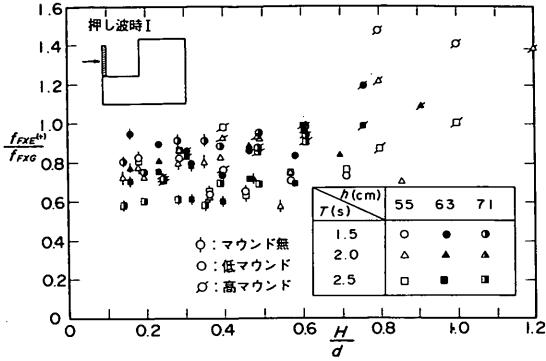


図-22 スリット部の波力に対するマウンドの影響

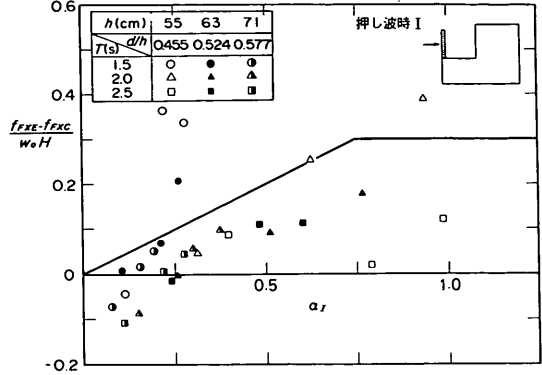


図-23 スリット部の波力の衝撃的成分と  $\alpha_1$  の関係

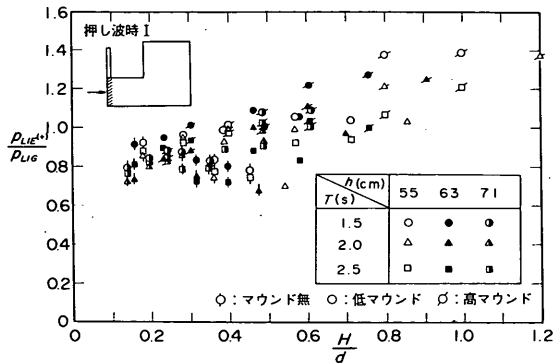


図-24 前面下部不透過壁の波圧に対するマウンドの影響

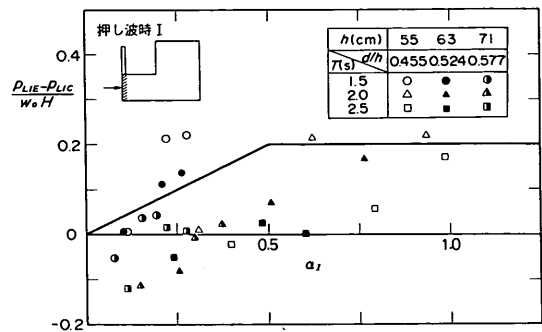


図-25 前面下部不透過壁の波圧の衝撃的成分と  $\alpha_1$  の関係

なっているが、波力は  $1.0 w_0 H$  以下であり、衝撃的波力はそれほど大きくない。これは、波が開口部を通過していくため、静水面より上の位置で局部的にやや衝撃的な波圧が生じる場合があっても、スリット全体の合力としては、それほど衝撃的な波力にならないためと考えられる。

前面不透過壁  $P_{L1}$  についてもあまり大きな波力は作用していない。これは、上部にスリット壁があるため、碎波が作用する場合でもスリット壁に大きな衝撃力が発生せず、ここにもその影響が  $f_{RX}$  現われているためである。

一方、遊水室後壁  $f_{RX}$  では、押し波時 II a のピークが押し波時 II b の2倍以上になっており、かなり大きな衝撃的波力が作用している。また、遊水室下床版  $f_{MZ}$  でも、押し波時 II a において衝撃的波力が作用しているが、値としては  $f_{RX}$  に比べてかなり小さい。

### 5.3 スリット部に作用する衝撃的波力のピーク値

図-22は、スリット部に作用する正の波力のピーク値

と、 $\alpha_2 = 0$  とした場合の合田式による計算値の比を、すべてのマウンド条件について示したものである。マウンド無と低マウンドの場合は、波高が大きくなって、実験値と計算値の比はほとんど変化しないのに対して、高マウンドの場合は波高が大きくなるにつれて、その比が急激に増大している。これは、スリット部に衝撃的な波力が作用していることを表している。

図-23は、高マウンドの場合について、スリット部に作用する波力のうちの衝撃的成分を示したものである。すなわち、スリット部に作用する正の波力のピーク値と合田式を準用した計算値 ( $\alpha_2 = 0$ ,  $\lambda_1 = 0.85$ ) の差を、 $w_0 H$  で無次元化して表している。横軸には前述の  $\alpha_1$  をとっているが、 $\alpha_1$  の値が大きくなるにつれて実験値と計算値の差も大きくなっており、衝撃的な波力の割合が増加していることがわかる。ただし、その割合は直立壁に比べて小さく、最大でも  $0.3 w_0 H$  程度である。図中の折れ線は、周期が短い場合を除いた実験結果のほぼ上限を表したものである。スリット部に作用する波力の衝撃的成分を  $f_{FX2}$  とし、図-23の実線の値を用いると、

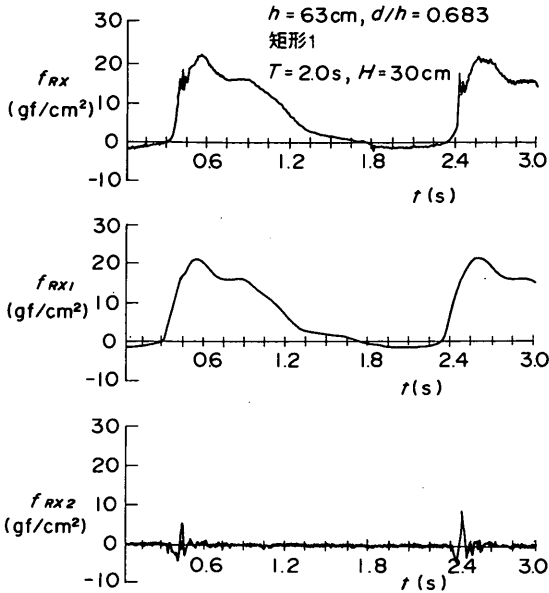


図-26 遊水室後壁の波力の重複波成分と衝撃的成分の分離

$f_{RX2}$ は次式で表すことができる。

$$f_{RX2} = \begin{cases} 0.4 \alpha_1 w_0 H & : \alpha_1 \leq 0.75 \\ 0.3 w_0 H & : \alpha_1 > 0.75 \end{cases} \quad (20)$$

したがって、式(9)における波力補正係数  $\lambda_{s2}$  は、次式で表される。

$$\lambda_{s2} = \begin{cases} 0.4 & : \alpha^* \leq 0.75 \\ 0.3 / \alpha^* & : \alpha^* > 0.75 \end{cases} \quad (21)$$

ただし、 $\alpha^*$  は式(9)で示したように  $\alpha_1$  と  $\alpha_2$  のどちらか大きいほうであり、波力が衝撃的な場合はほとんど  $\alpha_1$  となる。

#### 5.4 前面不透過壁に作用する衝撃的波力のピーク値

図-24は、前面不透過壁の波圧について、図-22と同様に示したものである。スリット部と同じく、高マウンドの場合に衝撃的な波力が作用している。

図-25は、図-23と同様に衝撃的成分と  $\alpha_1$  の関係を示したものである。下部不透過壁の場合はスリット部よりも衝撃的な波力の割合が小さく、最大でも  $0.2 w_0 H$  程度であり、その上限値は図中の折れ線ではほぼ表される。下部不透過壁に作用する波圧の衝撃的成分を  $p_{L2}$  とし、図-25の実線の値を用いると、 $p_{L2}$  は次式で表すことができる。

$$p_{L2} = \begin{cases} 0.4 \alpha_1 w_0 H & : \alpha_1 \leq 0.5 \\ 0.2 w_0 H & : \alpha_1 > 0.5 \end{cases} \quad (22)$$

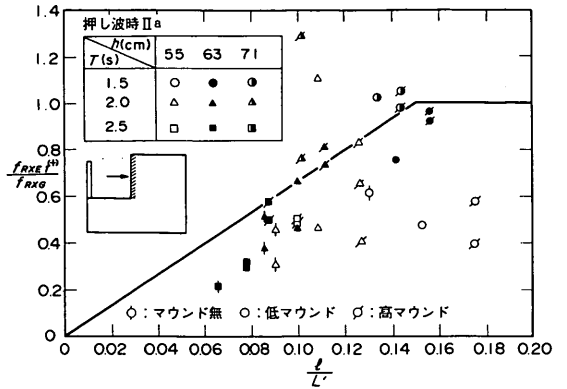


図-27 押し波時IIaにおける遊水室後壁の波力の重複波成分

したがって、式(9)における波力補正係数  $\lambda_{L2}$  は、次式で表される。

$$\lambda_{L2} = \begin{cases} 0.4 & : \alpha^* \leq 0.5 \\ 0.2 / \alpha^* & : \alpha^* > 0.5 \end{cases} \quad (23)$$

ただし、今回の実験条件では、高マウンドの場合、スリット部に比べて不透過壁の部分が小さく、この不透過部が大きくなれば、衝撃的波力の割合が大きくなり、通常の直立壁の場合に近づくと考えられる。

#### 5.5 遊水室後壁に作用する衝撃的波力のピーク値

##### (1) 重複波成分と衝撃的成分の分離

遊水室後壁については、他の部材と異なり、条件によっては非常に衝撃的な波力が作用する。ただし、押し波時IIaにおける波力には重複波的成分も含まれるため、重複波的成分と衝撃的成分を分離する必要がある。ここでは、遊水室後壁に作用する波力の重複波的成分として、500 Hz でサンプリングした  $f_{RX}$  のデータから、前後50データずつ100データ(0.2秒間)の平均をとった波力  $f_{RX1}$  を定義する。また、 $f_{RX}$  の値から  $f_{RX1}$  の値を引いた波力  $f_{RX2}$  を衝撃的成分として定義する。図-26はこれらの波形を例示したものである。 $f_{RX2}$  がピークとなる位相が押し波時IIa、 $f_{RX1}$  がピークとなる位相が押し波時IIbとみなすことができる。

##### (2) 押し波時IIaにおける重複波成分

図-27は、押し波時IIaにおける遊水室後壁に作用する波力の重複波成分  $f_{RX1}$  の値を示したものである。ただし、縦軸には実測値  $f_{RX1}$  を合田式 ( $\alpha_2 = 0$ ) による波力  $f_{RX0}$  で無次元化した値、横軸には遊水室幅  $l$  をマウンド上水深  $h'$  における波長  $L'$  で無次元化した値を示している。データはかなりばらついているが、全体として

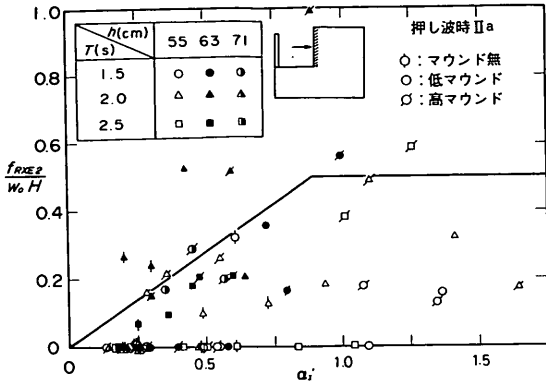


図-28 遊水室後壁の波力の衝撃的成分と  $\alpha_1'$  の関係

は、波長に対して遊水室幅が広がるほど波力が大きくなる傾向にある。図中の折れ線は実験値のほぼ上限を示すものである。

押し波時IIaにおける  $f_{RX1}$  の値を、式(9)および式(3)、(4)を用いて算定する場合、図-27の実線の値を用いると、式(9)における波力補正係数  $\lambda_{R1}$  は次式で表される。

$$\lambda_{R1} = \begin{cases} \frac{20 \ell}{3 L'} & : \ell / L' \leq 0.15 \\ 1.0 & : \ell / L' > 0.15 \end{cases} \quad (24)$$

### (3) 押し波時IIaにおける衝撃波力成分

遊水室後壁に作用する波力の衝撃成分については、波高やマウンドの形状だけでなく、遊水室の深さや幅によってもその値が変化する。そこで、前述の衝撃波力係数  $\alpha_1$  のかわりに遊水室における衝撃波力係数  $\alpha_1'$  を定義する。ここに、 $\alpha_1'$  は、式(13)～(19)で表される  $\alpha_1$  の算定式において、以下のように置き換えて計算する。

$$\begin{aligned} d &\rightarrow d' \quad (\text{遊水室下端深さ}) \\ L &\rightarrow L' \quad (\text{前面水深 } d \text{ における波長}) \\ B_M &\rightarrow B_M' \quad (= \ell - (d - d')) \end{aligned}$$

図-28は、衝撃波力成分のピーク値  $f_{RX2}$  と遊水室における衝撃波力係数  $\alpha_1'$  の関係を示したもので、縦軸は  $f_{RX2}$  を  $w_0 H$  で無次元化した値をとっている。図中にはマウンド無、低マウンド、高マウンドのすべての結果を示しており、縦軸の値が0となっているデータは、 $f_{RX}$  の波形から衝撃的波力は生じていないと判断したケースである。図中の折れ線は、実験値のほぼ上限を示すものである。押し波時IIaにおける  $f_{RX2}$  の値を  $\alpha_1'$  を用いて与えるものとし、図-28の実線の値を用いると、 $f_{RX2}$  は次式で表される。

$$f_{RX2} = \begin{cases} 0.56 \alpha_1' w_0 H & : \alpha_1' \leq 25/28 \\ 0.5 w_0 H & : \alpha_1' > 25/28 \end{cases} \quad (25)$$

したがって、式(9)における波力補正係数  $\lambda_{R2}$  は、次式で表される。

$$\lambda_{R2} = \begin{cases} 0.56 & : \alpha^* \leq 25/28 \\ 0.5 / \alpha^* & : \alpha^* > 25/28 \end{cases} \quad (26)$$

なお、遊水室下床版についても、遊水室後壁と同様に衝撃的な波力が下向きに作用する。しかしながら、遊水室後壁の波力に比べるとかなり小さく、最大でも押し波時IIbにおける波力とほぼ同じであるため、部材設計上は特に考慮しなくてもよい。また、下向きの波力はケーソンの滑動安定性を高めることになり、全体の安定性からも考慮しないほうがよい。したがって、遊水室下床版の波力については衝撃的成分は考えないものとする。

## 6. スリット形状による波力特性

### 6.1 スリット部材の断面形状による波力の変化

前章までは矩形のスリット部材に限って波力の検討を行ったが、スリットの形状を円形および駒形に変えた場合、矩形に比べて抵抗が小さくなるため、スリット部材に働く波力は小さくなることが予想される。本章では、スリット部材および遊水室後壁にかかる波力の変化について検討する。なお、実験はマウンド無と高マウンドの2種類について行っている。

図-29(1)、(2)は、円形スリット部材に作用する波力の正負それぞれのピーク値  $f_{FX}$  を、矩形スリット部材に作用する波力のピーク値  $f_{FX}$  との比で表したもので、横軸には波高水深比  $H/h$  をとっている。(1)はマウンドなしの場合の結果であり、(2)は高マウンドの場合の結果である。また、図-30(1)、(2)は、駒形スリット部材について同様に示したものである。正の波力については円形、駒形ともに、平均すると矩形に比べて1～2割程度波力が減少しており、マウンド形状の違いによる差はほとんどみられない。

一方、負の波力については、円形の場合は正の波力と同様に1～2割減少しているが、駒形の場合は逆にやや増大している。これは、駒形断面の場合は引き波時の抵抗の大きさが矩形の場合とほとんど同じであり、押し波時に波が入りやすく遊水室内の水位が高くなる分、引き波時の波力が大きくなっていると考えられる。なお、負の波力についても、マウンド形状の影響はほとんどみられない。

図-31(1)、(2)は、円形スリットにおける遊水室後壁

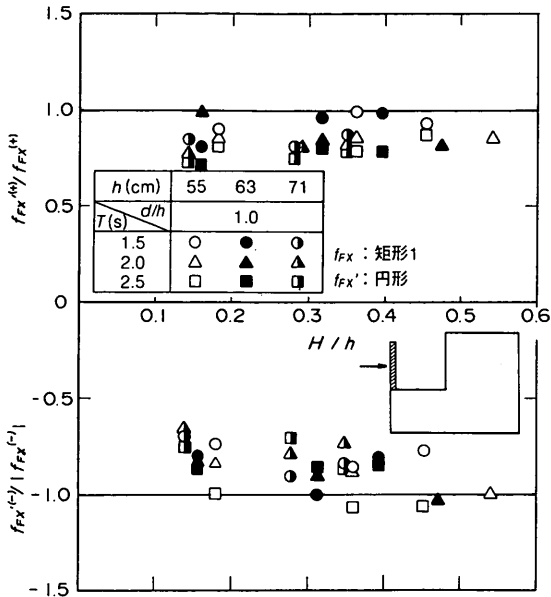


図-29 (1) 円形スリットに作用する波力 (マウンド無)



図-29 (2) 円形スリットに作用する波力 (高マウンド)

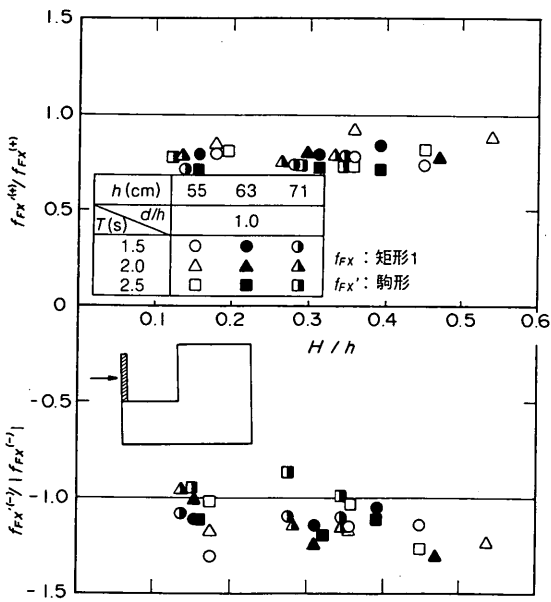


図-30 (1) 駒型スリットに作用する波力 (マウンド無)

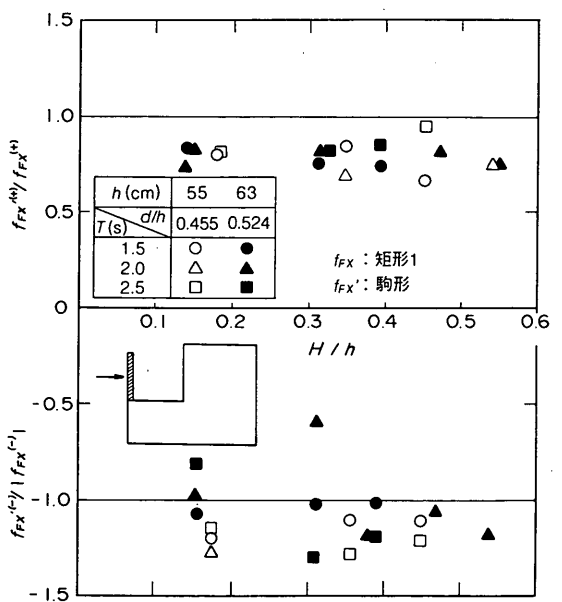


図-30 (2) 駒型スリットに作用する波力 (高マウンド)

に作用する波力の正のピーク値  $f_{FX}'$  を、矩形スリットの場合の波力との比で示したものである。また、図-32(1), (2)は駒形スリットについて同様に示したものである。矩形に比べて波が遊水室内に入りやすいため、ス

リット部とは逆に、平均して2割程度波力が增大しており、特に  $h = 55\text{cm}$  の場合に大きくなっている。マウンド形状の影響はこの場合もほとんどみられなかった。

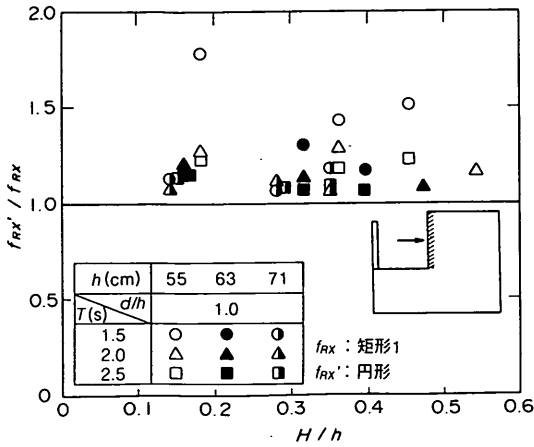


図-31 (1) 円形スリットにおける遊水室後壁の波力 (マウンド無)

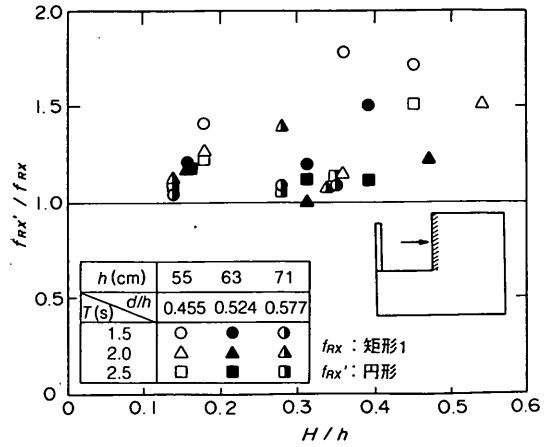


図-31 (2) 円形スリットにおける遊水室後壁の波力 (高マウンド)

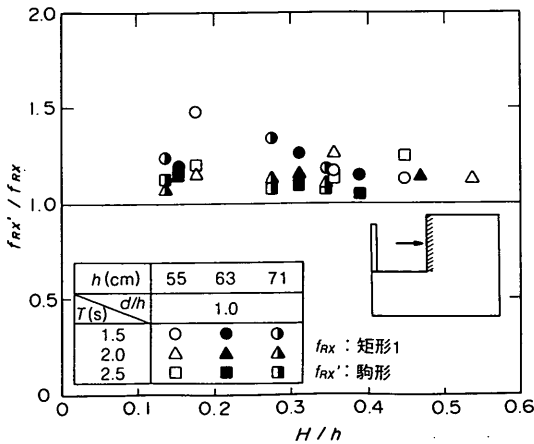


図-32 (1) 駒型スリットにおける遊水室後壁の波力 (マウンド無)

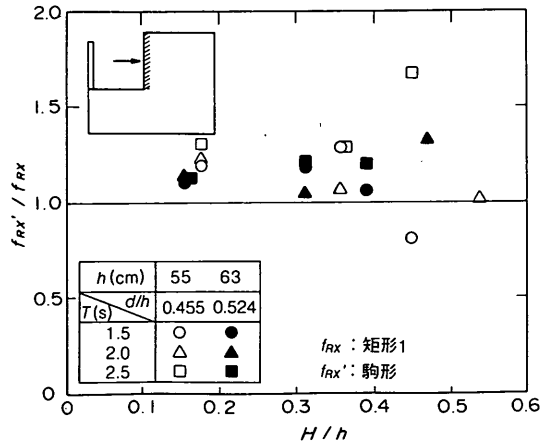


図-32 (2) 駒型スリットにおける遊水室後壁の波力 (高マウンド)

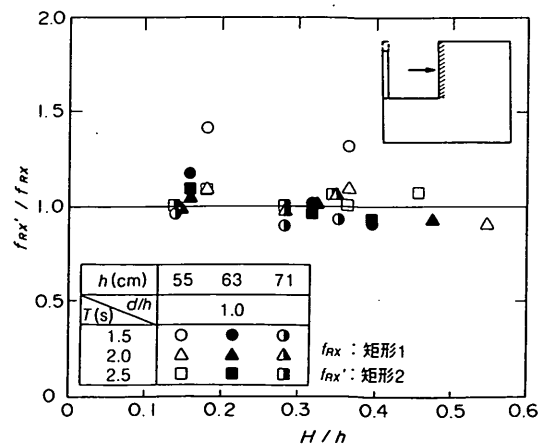


図-33 (1) スリット天端高の違いと遊水室後壁の波力 (マウンド無)

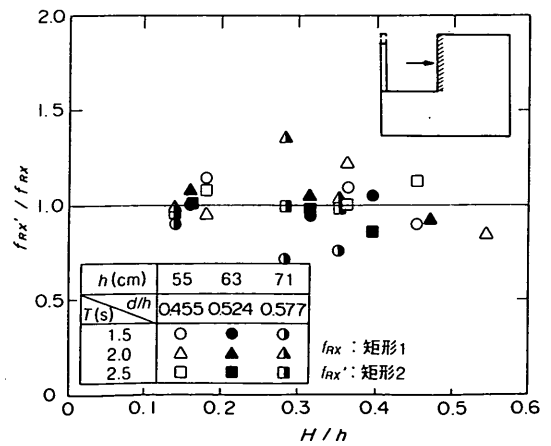


図-33 (2) スリット天端高の違いと遊水室後壁の波力 (高マウンド)

6.2 スリット天端高の影響

今回の実験では、ケーソン本体に上部工がつけられることを考慮し、スリット部の天端高を遊水室後壁よりも低くしたが、スリット部の天端を高くして、後壁と同じ高さにした場合の波力の変化についても検討した。このときのスリット部の形状が矩形2で、開口部の面積は矩形1の場合と同じである。したがって、スリット部全体に対する開口部の面積の割合は、矩形1に比べてやや小さくなっている。

図-33(1), (2)は、矩形2の場合の遊水室後壁に作用する波力の正のピーク値を、矩形1の場合の波力との比で表したものである。データは多少ばらついているが、平均するとほぼ1.0であり、矩形1の場合と波力が変わらないことがわかる。したがって、後壁にかかる波力は、スリットを通過してくる波による影響が大きく、スリットを越波してくる波の影響は小さいと考えられる。ただし、スリットの開口率が小さい場合などは、越波による影響が大きくなり、スリット部の天端が高いほうが後壁の波力が小さくなる可能性もある。

7. 直立消波ケーソンの耐波設計法

7.1 設計波力の考え方

ケーソン全体の滑動安定性を検討する場合は、部材ごとの位相差を考慮し、滑動合成波力が最大となる位相における波力で検討する必要がある。

従来の設計法では、遊水室後壁の波力がピークとなるときに滑動合成波力が最大になると考え、この位相につ

いてケーソンの滑動安定性の検討を行っている。しかしながら、直立消波ケーソンにおいて滑動合成波力が最大となる位相は、水深、周期、波高、マウンド形状、遊水室深さなどの条件によって変化するため、押し波時Iで最大となる場合もある。したがって、以下に示す手順で設計波力に対する検討を行う必要がある。

- ①押し波時I, II a, II b, 引き波時I, II, IIIの各位相ごとに各部材に作用する波力を与える。
- ②それぞれの位相における波力を求め、合力が最も厳しくなる位相について、滑動および転倒に対する検討を行う。
- ③各部材ごとに、波力が最も厳しくなる位相に対して部材断面等の検討を行う。

なお、FEMを用いて部材設計を行う場合は、個々の部材に作用する波力だけでなく、ケーソン全体の波圧分布が重要となる。

7.2 各位相における波力補正係数

(1)押し波時I

押し波時Iは、スリット部および前面不透過壁の波力がピークとなる位相であり、このとき、遊水室後壁にはまだ波は到達していない。したがって、押し波時Iにおいては遊水室後壁の波力は作用しないものとする。一方、遊水室下床版については、波の一部が遊水室内に入って水位がわずかに上昇し、下向きの波力が働く場合もある。しかしながら、下向きの波力はケーソンの安定性を高める方向に作用するため、安全側の値として、下床版の波

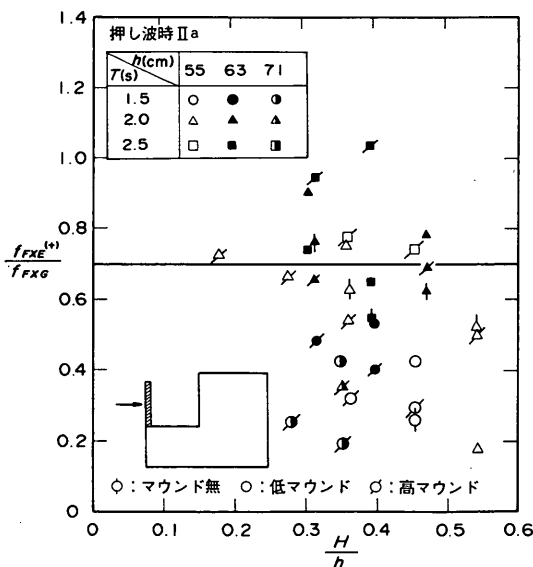


図-34 押し波時II aにおけるスリット部の波力

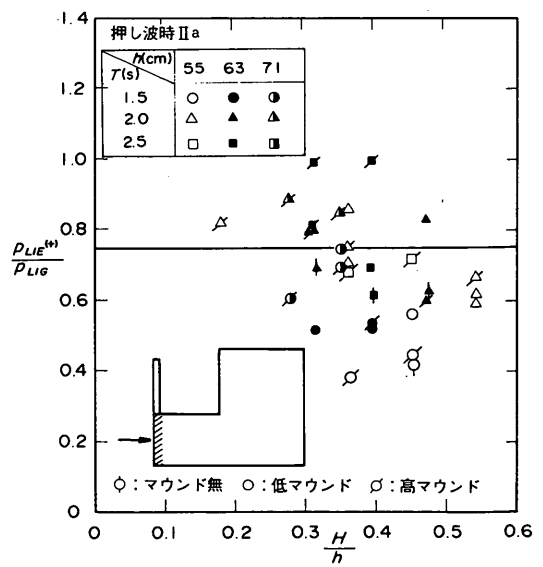


図-35 押し波時II aにおける前面下部不透過壁の波力

力も考慮しないほうが妥当であると考えられる。

(2) 押し波時Ⅱa

押し波時Ⅱaにおいては、これまでの結果に加えて、スリット部および下部不透過壁に作用する波力を与える必要がある。図-34, 35は、押し波時Ⅱaにおけるスリット部および下部不透過壁に作用する波力を、合田式( $\alpha_2 = 0$ )による計算値で無次元化して示したものである。かなりばらついているが、全体的に周期が長いほど大きな値となっている。これは、周期が長いほど押し波時Ⅰから押し波時Ⅱaまでの位相差が小さくなるためである。式(9)における波力補正係数としては、やや安全側の値を考え、スリット部で $\lambda_{s1} = 0.7$ 、下部不透過壁で $\lambda_{L1} = 0.75$ 程度とする。また、押し波時Ⅱaにおいては、これらの部材には衝撃的波力は作用していないので、 $\lambda_{s2} = 0$ 、 $\lambda_{L2} = 0$ とする。

(3) 押し波時Ⅱb

押し波時Ⅱbについても、押し波時Ⅱaと同様にス

リット部および下部不透過壁に作用する波力を与える必要がある。図-36, 37は、押し波時Ⅱbにおけるスリット部および下部不透過壁に作用する波力を、合田式による計算値( $\alpha_2 = 0$ )で無次元化して示したもので、低マウンドの場合の結果である。押し波時Ⅱaに比べてばらつきはやや小さく、スリット部の波力についてはかなり小さい値となっている。式(9)における波力補正係数としては、スリット部で $\lambda_{s1} = 0.3$ 、下部不透過壁で $\lambda_{L1} = 0.65$ 程度とみなすことができる。また、押し波時Ⅱbにおいても、これらの部材には衝撃的波力は作用していないので、 $\lambda_{s2} = 0$ 、 $\lambda_{L2} = 0$ とする。

7.3 新しい波力算定法

(1) 押し波時の波力算定法

これまでの結果を用いることにより、押し波時の3つの位相における、各部材およびケーソン全体の安定性の検討を行うことができる。すなわち、衝撃的成分も考慮して、合田式における波圧 $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 、 $p_u$ および作用高さ $\eta^*$ を次式で表す。

$$p_1 = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) (\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_2 \alpha^* \cos^2 \beta) w_0 H b \quad (9)$$

$$\alpha^* = \max \{ \alpha_2, \alpha_1 \}$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh(2 \pi h / L)} \quad (3)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (4)$$

$$p_u = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \lambda_1 \alpha_1 \alpha_3 w_0 H b \quad (5)$$

$$\eta^* = 0.75 (1 + \cos \beta) H b \quad (27)$$

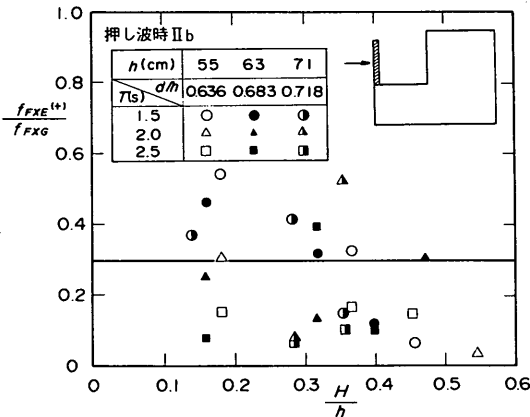


図-36 押し波時Ⅱbにおけるスリット部の波力

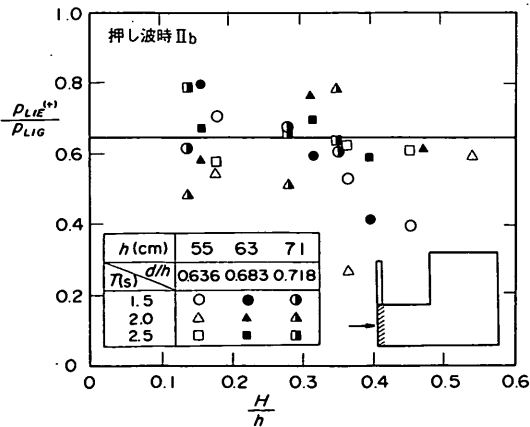


図-37 押し波時Ⅱbにおける前面下部不透過壁の波力

$\lambda_1$ および $\lambda_2$ は、すでに示したように、各位相ごと、各部材ごとにそれぞれ与えている。表-3は各部材ごとの波力補正係数 $\lambda_1$ および $\lambda_2$ の一覧である。押し波時Ⅰにおける $\lambda_{s2}$ 、 $\lambda_{L2}$ は、 $\alpha_1$ と $\alpha_2$ の大きいほうをとる $\alpha^*$ の関数であり、 $d/h \geq 0.7$ のときはほとんど0である。また、押し波時Ⅱaにおける $\lambda_{L2}$ については、 $\alpha_1$ のかわりに遊水室における衝撃波力係数 $\alpha_1'$ を用いて $\alpha^*$ を計算することに注意する必要がある。なお、 $\alpha_1$ は式(13)、 $\alpha_1'$ は5.5(3)に示すとおりである。

式(9)と従来の算定法における式(2)を比較すると、 $\alpha_2$ と $\alpha_1$ のどちらか大きいほうを用いている点と、 $\lambda_2$ が $\alpha^*$ の項のみの係数となっている点が異なっている。これは、波力を重複的成分と衝撃的成分に分離し、それぞれに対して別々に補正係数を与えていることを意味する。ま



表一 3 押し波時における波力補正係数

		押し波時 I	押し波時 II a	押し波時 II b
ス リ ット	$\lambda_{S1}$	0.85	0.7	0.3
	$\lambda_{S2}$	0.4/ ( $\alpha^* \leq 0.75$ ) 0.3/ $\alpha^*$ ( $\alpha^* > 0.75$ )	0	0
前 面	$\lambda_{L1}$	1.0	0.75	0.65
	$\lambda_{L2}$	0.4/ ( $\alpha^* \leq 0.5$ ) 0.2/ $\alpha^*$ ( $\alpha^* > 0.5$ )	0	0
後 壁	$\lambda_{R1}$	0	$\frac{20\ell}{3L'}$ ( $\ell/L' \leq 0.15$ ) 1.0 ( $\ell/L' > 0.15$ )	1.4 ( $H_0/h \leq 0.1$ ) 1.6-2 $H_0/h$ ( $0.1 < H_0/h < 0.3$ ) 1.0 ( $H_0/h \geq 0.3$ )
	$\lambda_{R2}$	0	* 0.56 ( $\alpha^* \leq 25/28$ ) 0.5/ $\alpha^*$ ( $\alpha^* > 25/28$ )	0
下 床 版	$\lambda_{M1}$	0	$\frac{20\ell}{3L'}$ ( $\ell/L' \leq 0.15$ ) 1.0 ( $\ell/L' > 0.15$ )	1.4 ( $H_0/h \leq 0.1$ ) 1.6-2 $H_0/h$ ( $0.1 < H_0/h < 0.3$ ) 1.0 ( $H_0/h \geq 0.3$ )
	$\lambda_{M2}$	0	0	0
揚 圧 力	$\lambda_{U2}$	1.0	0.75	0.65
	$\lambda_{U1}$	0	0	0

\*  $\lambda_{R2}$ に対する  $\alpha^*$  の計算では、 $a_1$  のかわりに  $a_1'$  を用いる。すなわち、 $d \rightarrow d'$ 、 $L \rightarrow L'$ 、 $B_M \rightarrow B_M'$  に置き換えて計算する。ここに、 $d'$  : 遊水室下端深さ、 $L'$  : 前面水深  $d$  における波長、 $B_M' = \ell - (d - d')$  である。

た、式(1)においては作用高さに対しても補正係数  $\lambda_1$  を乗じているが、式(27)においては1.0で一定としている。 $p_2$ 、 $p_3$  および  $p_0$  については、従来の合田式をそのまま用いている。図-38は、押し波時における各位相の一般的な波力分布形を示したものである。

(2) 引き波時における波力算定法

引き波時の波力については、前述のようにケーソン前面および遊水室内の水位を与えることにより、ケーソン全体に作用する波力も計算できる。表一4に引き波時 I、II、IIIのそれぞれの位相における水位を示している。また図-39は、各位相における波力分布形を示したもので

ある。

現地における一般的な設計条件では、直立消波ケーソンの場合、ケーソン全体の安定性について引き波時の波力が問題となることはほとんどない。ただし、大水深域の重複波領域においては、相対的に引き波時の波力が大きくなる。この場合、ケーソン前面の水位は  $-0.5H$  よりも低下することがあり、このときの波力については有限振幅重複波理論<sup>20)</sup>を用いて計算する必要がある。

(3) 滑動合成波力の実験値と計算値の比較

図-40(1)~(3)は、今回の実験における滑動合成波力

直立消波ケーソンの部材波力特性と耐波設計法

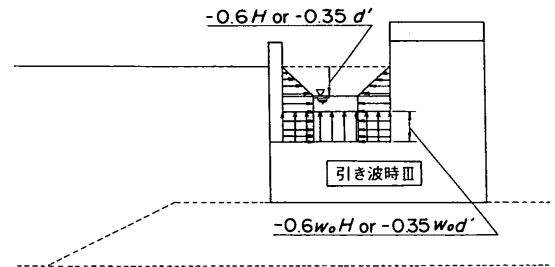
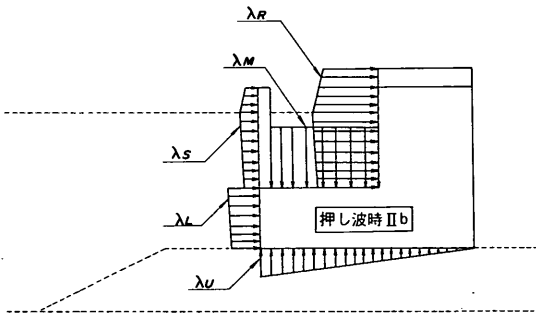
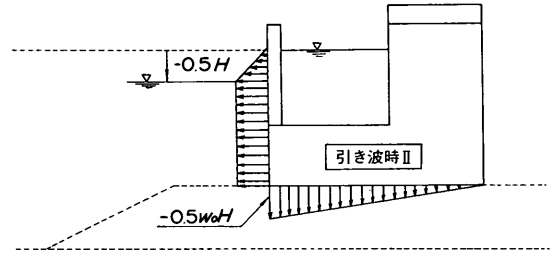
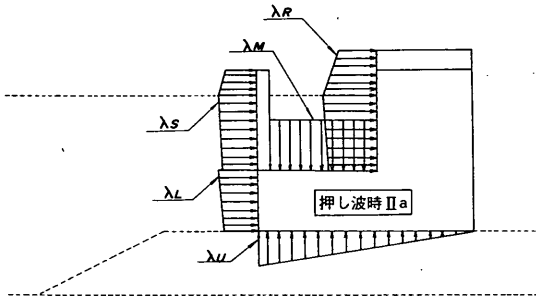
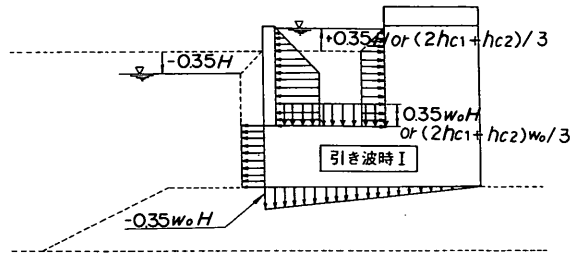
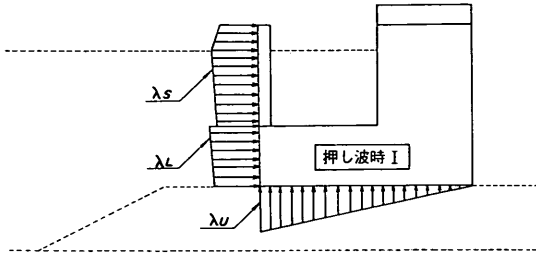


図-38 押し波時における設計波力分布

図-39 引き波時における設計波力分布

表-4 引き波時におけるケーソン前面および遊水室内の水位

	引き波時Ⅰ	引き波時Ⅱ	引き波時Ⅲ
前 面	$-0.35H$	$-0.5H$	0
遊水室内	$^* \min \{0.35H, (2hc_1+hc_2)/3\}$	0	$-\min \{0.6H, 0.35d'\}$

\* $hc_1$ : スリットの高、 $hc_2$ : 遊水室後壁の高

のピーク値  $F_{cx}$  を、従来の波力算定法による設計波力  $F_{cc}$  で無次元化して示したものである。図-40(1)は、低マウンドの場合の結果を示したもので、 $F_{cx}/F_{cc}$  は平均値0.999、標準偏差0.101であり、実験値と計算値が

よく一致している。これに対して、図-40(2)は、マウンド無の場合の結果を示したもので、平均値0.797、標準偏差0.067であり、ばらつきは小さいが、全体的に実験値のほうが計算値よりも小さい。また、図-40(3)は、

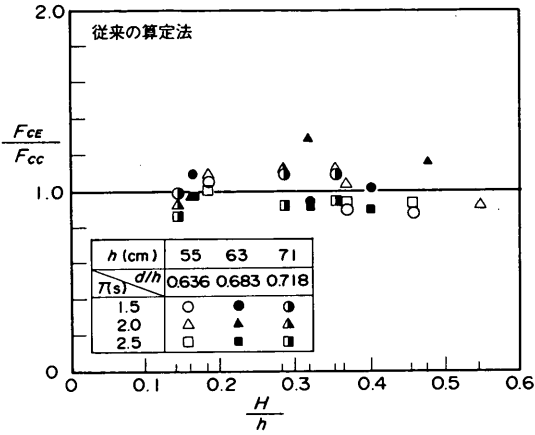


図-40 (1) 従来の算定法による滑動合成波力の検討 (低マウンド)

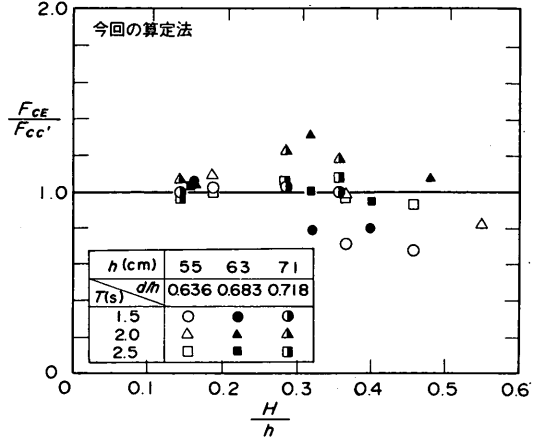


図-41 (1) 今回の算定法による滑動合成波力の検討 (低マウンド)

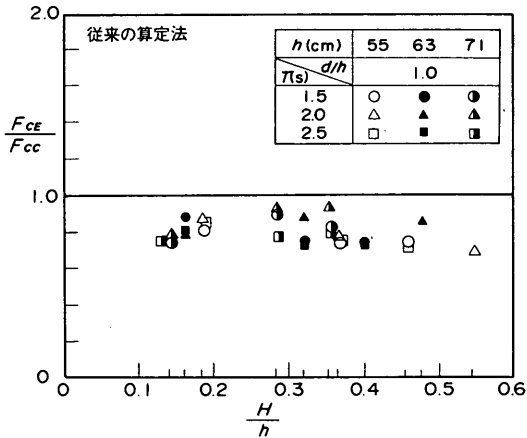


図-40 (2) 従来の算定法による滑動合成波力の検討 (マウンド無)

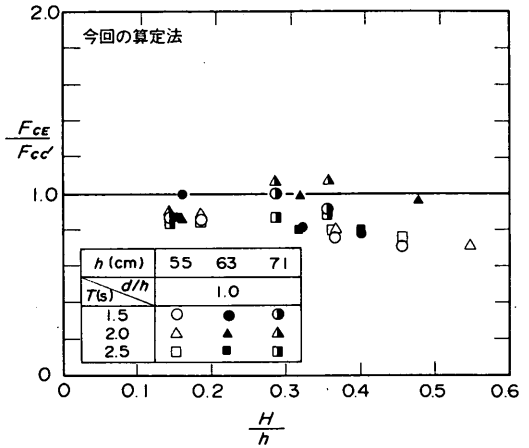


図-41 (2) 今回の算定法による滑動合成波力の検討 (マウンド無)

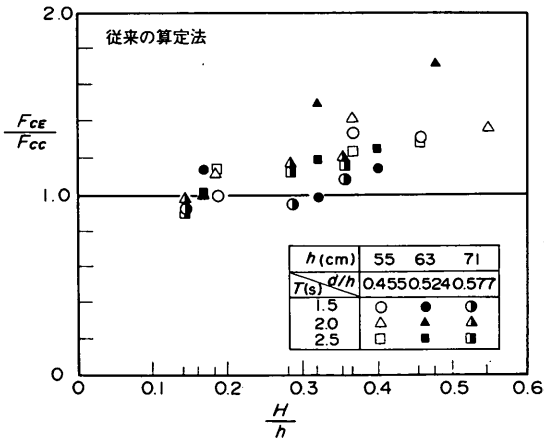


図-40 (3) 従来の算定法による滑動合成波力の検討 (高マウンド)

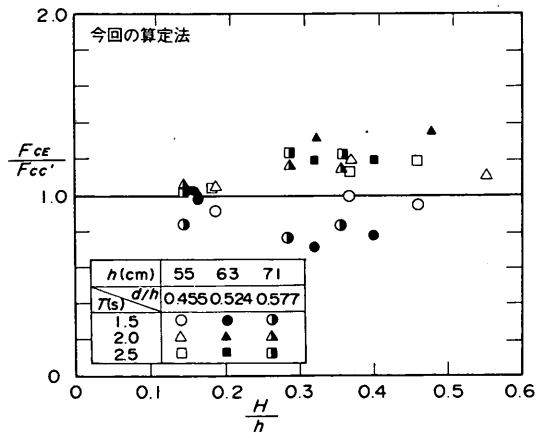


図-41 (3) 今回の算定法による滑動合成波力の検討 (高マウンド)

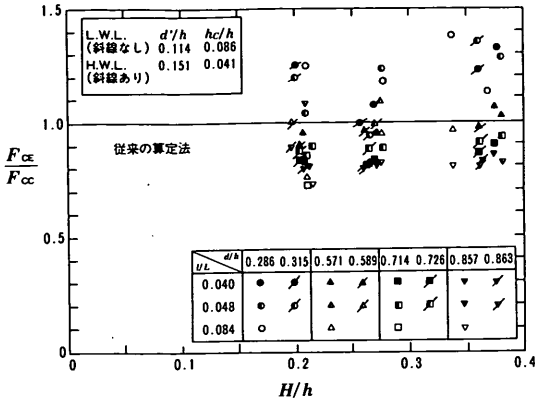


図-42 従来の算定法による滑動合成波力の検討 (村田らの実験結果)

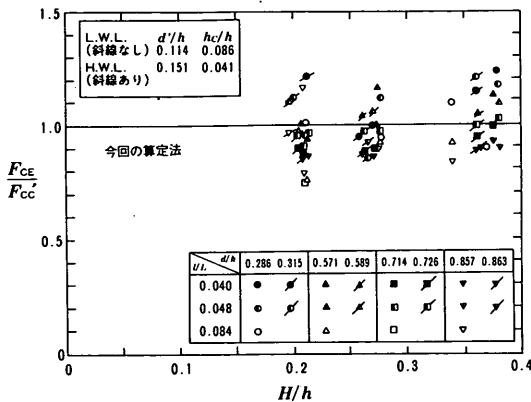


図-43 今回の算定法による滑動合成波力の検討 (村田らの実験結果)

高マウンドの場合の結果を示したもので、平均値1.171、標準偏差0.183であり、実験値のほうが大きくなっている。これは、従来の算定法がマウンドの影響による波力の増大を考慮していないためであり、衝撃的な波力が作用するような条件では危険な設計となることがわかる。

一方、図-41(1)~(3)は、今回の波力算定法を用い、押し波時Ⅰ、Ⅱa、Ⅱbのうち最も大きい値を設計滑動合成波力 $F_{CC}'$ として、実験値を無次元化して示したものである。図-41(1)は、低マウンドの場合の結果を示したもので、 $F_{CE} / F_{CC}'$ は平均値0.993、標準偏差0.140であり、図-40(1)の従来の算定法の場合に比べ、周期が短いケースについてやや大きめの計算値を与えているものの、全体的には計算値と実験値はほぼ一致している。図-41(2)は、マウンド無の場合の結果で、平均値0.866、標準偏差0.096である。また、図-41(3)は高マウンドの場合の結果で、平均値1.053、標準偏差0.164

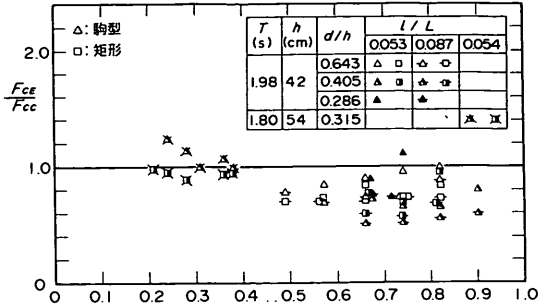


図-44 今回の算定法による滑動合成波力の検討 (滑動実験結果)

である。いずれも、従来の算定法に比べて実験値と計算値がよく一致している。

図-42, 43は、村田ら<sup>17)</sup>の横スリットケーソンに対する実験結果を、従来の波力算定法と新しい波力算定法のそれぞれを用いて整理した結果である。村田らの実験においては、今回の実験よりもより広い範囲でマウンド高さを変化させており、 $d/h = 0.286 \sim 0.863$ である。また、 $l/L = 0.040 \sim 0.084$ であり、今回の実験に比べて相対的に周期が長い。しかしながら、今回の結果とほとんど同じ傾向が現われている。すなわち、従来の算定法では、マウンド高さの影響による波力の違いを考慮していないため、計算値と実験値の差がはっきり現われており、 $d/h$ が小さい場合には実験値は計算値よりも大きく、逆に $d/h$ が大きい場合には計算値よりも小さくなっている。 $F_{CE} / F_{CC}$ の平均値は0.968、標準偏差は0.168である。

一方、新しい設計法では、マウンド高さの影響を考慮しているため、マウンド高さの違いによる差がかなり小さくなっている。また、全体的なばらつきも従来の設計法に比べて小さく、 $F_{CE} / F_{CC}'$ の平均値が0.979、標準偏差が0.115である。

図-44は、谷本・高橋・北谷<sup>14)</sup>が行った直立消波ケーソンに関する滑動実験で得られた滑動合成波力 $F_{CE}$ を、新しい波力算定法によって求めた設計滑動合成波力 $F_{CC}'$ で無次元化して整理した結果である。実験条件は $d/h = 0.286 \sim 0.643$ 、 $l/L = 0.053 \sim 0.087$ で、スリット部材の断面形状を矩形と駒型に2種類に変えている。なお、波力の実験値は分力計や波圧計などにより直接測定したのではなく、滑動限界波高と堤体重量から逆算して求めている。今回の実験結果に比べると $H/h$ の大きい範囲まで実験を行っており、波高の大きい領域、特に衝撃的な波力が発生する条件ではやや安全側の値を与えてい

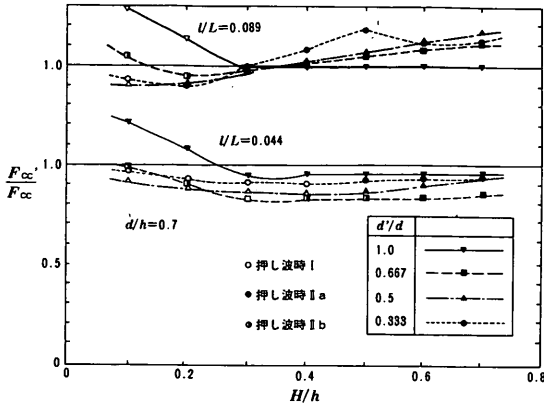


図-45 従来の算定法と今回の算定法による滑動合成波力の比較 ( $d'/d$  の影響)

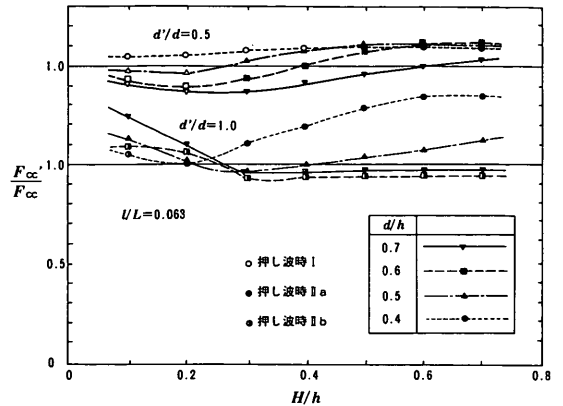


図-46 従来の算定法と今回の算定法による滑動合成波力の比較 ( $d/h$  の影響)

る。ただし、滑動実験では滑動限界を上回る波力が作用しても、作用時間の短い衝撃的な波力であればケーソンが滑動しない場合もあり、実際に作用した波力は図中の実験値よりも大きかったことも考えられる。

これらの結果から判断すると、新しい波力算定法は従来の算定法に比べてより幅広い条件において、波力を適切に求められることがわかる。

(4) 新しい算定法と従来の算定法による設計波力の比較

図-45, 46は、種々の条件において従来の算定法と新しい算定法による設計波力を比較したものである。縦軸には新しい算定法による滑動合成波力  $F_{cc}'$  と従来の算定法による滑動合成波力  $F_{cc}$  の比を、横軸には波高水深比  $H/h$  をとっている。なお、ここで用いた主な設計条件は以下のとおりである。

- 水深  $h$  : 15m (一定)
- マウンド上水深  $d$  : 6, 7.5, 9, 10.5m
- 周期  $T$  : 7, 9, 12 s
- 波長  $L$  : 67.5, 95.5, 135.3m
- 波高  $H$  : 1.5~10.5m
- ケーソン幅  $B$  : 15m (一定)
- 遊水室幅  $l$  : 6m (一定)
- 遊水室の深さ  $d'$  :  $d/3, d/2, 2d/3, d$

図-45は、遊水室の深さ  $d'$  の違いによる波力の変化を示したもので、 $d/h = 0.7$  のときの結果である。周期の短い場合 ( $l/L = 0.089$ ) には、 $H/h \geq 0.4$  の範囲では新しい算定法のほうが波力が大きく、 $d'/d$  が小さいほどその割合が大きい。一方、周期の長い場合 ( $l/L = 0.044$ ) には、従来の算定法のほうが波力が大きく、 $d'/d = 1.0$  のケースを除くと、 $d'/d$  が大きいほどそ

の割合が大きい。新しい算定法のほうが波力が大きくなるのは、波高が小さい場合を除くとすべて押し波時 II a の波力であり、後壁に作用する衝撃的な波力の影響が大きいことがわかる。したがって、設計周期が比較的短い場合や遊水室幅が広い場合には、従来の算定法では波力を過小に評価する可能性があることに注意する必要がある。

図-46は、マウンド高さの違いによる波力の違いを示したもので、 $l/L = 0.063$  のときの結果である。 $d'/d = 0.5$  の場合には、 $d/h = 0.7$  のケースを除いて新しい算定法のほうが波力が大きく、従来の算定法に比べて最大で1割程度大きい。一方、 $d'/d = 1.0$  の場合には、 $d/h \geq 0.6$  では従来の算定法のほうが波力が大きく、 $d/h \leq 0.5$  では新しい算定法のほうが波力が大きく、波高の増大とともにその割合も増加している。

以上の結果から、従来の波力算定法では、高マウンドの場合や、低マウンドであっても遊水室下端がケーソン下端までなく、しかも周期の短い場合に、波力を過小に評価する可能性があることが明らかになった。このような場合、衝撃的成分の影響により波力が増大するため、直立消波ケーソンの適用にあたっては、部材設計およびケーソン全体の滑動安定性について十分に検討する必要がある。

(5) 低マウンドの場合の波力算定法

新しい波力算定法では、遊水室の深さやマウンド高さなどの影響を考慮しているため、一般的な式の形がやや複雑になっている。しかしながら、 $d/h \geq 0.7$  であれば、スリット部材および前面不透過部には衝撃的な波力は作用しないため、 $a^* = 0$  としてよい。したがって、押し波時 I における波力補正係数は、 $\lambda_1$  のみ考慮すればよ

表-5 低マウンドにおける押し波時の波力補正係数

		押し波時Ⅰ	押し波時Ⅱb
スリット	$\lambda_{SI}$	0.85	0.3
前面	$\lambda_{LI}$	1.0	0.65
後壁	$\lambda_{RI}$	0	1.4 ( $H/h \leq 0.1$ ) 1.6-2H/h ( $0.1 < H/h < 0.3$ ) 1.0 ( $H/h \geq 0.3$ )
下床版	$\lambda_{MI}$	0	1.4 ( $H/h \leq 0.1$ ) 1.6-2H/h ( $0.1 < H/h < 0.3$ ) 1.0 ( $H/h \geq 0.3$ )
揚圧力	$\lambda_{UI}$	1.0	0.65

く、すべて定数で表される。さらに、このとき  $d'/d = 1.0$  であれば、遊水室後壁の部材波力、ケーソン全体の安定性ともに押し波時Ⅱbで決まるため、押し波時Ⅱaについては検討する必要がない。したがって、 $d/h \geq 0.7$  かつ  $d'/d = 1.0$  の場合には、波力算定法は簡単になる。すなわち、静水面における波圧  $p_1$  は、式(9)に代わって以下の式で表される。

$$p_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta) \lambda_1 a_1 \omega H d \quad (28)$$

また、表-5は、こうした場合の波力補正係数の一覧である。押し波時Ⅱbにおける遊水室後壁と下床版以外はすべて定数であり、簡潔な形になっている。特に、堤体の滑動・転倒に対する安定性は押し波時Ⅱbにおける検討のみでよく、従来の設計法とほとんど同じである。

#### 7.4 新算定法に基づく直立消波ケーソンの波力の特徴

##### (1) 直立消波ケーソンと通常の混成堤の比較

図-47(1)、(2)は、直立消波ケーソンが通常の混成堤に比べてどれくらい滑動合成波力が減少するかを調べたものである。図には新しい算定法による直立消波ケーソンの設計波力  $F_{cc}'$  と合田式による通常のケーソンの設計波力  $F_{cc}$  の比を示している。ただし、合田式における  $a_2$  については、従来の  $a_2$  と今回定義した  $a_1$  のうち大きいほうの値を用いている。また、設計条件は図-45、46

の場合と同様で、通常の混成堤についてもケーソン幅は変えていない。

図-47(1)は、 $d/h = 0.7$  のときの結果で、 $d'/d = 0.5$  の場合には周期が短くなるほど波力の減少する割合が小さくなっている。一方、 $d'/d = 1.0$  の場合には周期による違いはほとんどなく、 $H/h \geq 0.3$  ではほぼ8割程度に減少している。位相についても、 $d'/d = 0.5$  の場合にはほとんど押し波時Ⅱaであるのに対して、 $d'/d = 1.0$  の場合にはすべて押し波時Ⅱbである。

図-47(2)は、 $d/h = 0.5$  のときの結果で、衝撃的波力の影響が大きいので、位相はほとんど押し波時Ⅱaとなっている。 $d/h = 0.7$  の場合に比べて、全体的に波力の減少する割合が大きい。これは、直立消波ケーソンが通常の混成堤に比べて衝撃的波力があまり大きくならないことを表しており、高マウンドの場合に有利な構造で

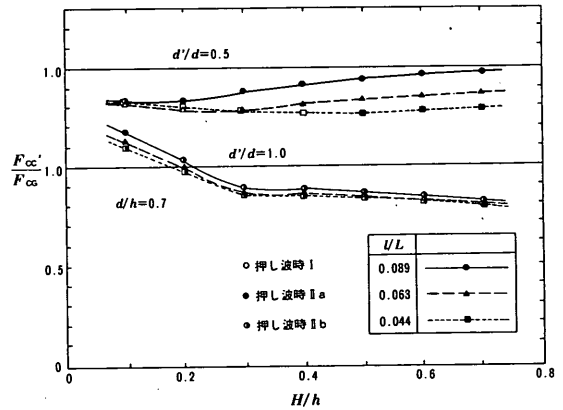


図-47(1) 混成堤との滑動合成波力の比較 ( $d/h = 0.7$ )

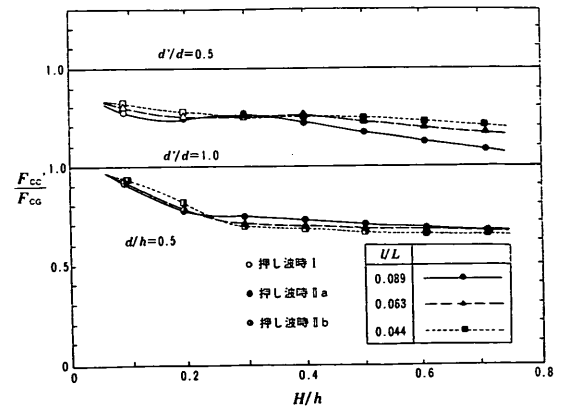


図-47(2) 混成堤との滑動合成波力の比較 ( $d/h = 0.5$ )

あることがわかる。 $d'/d=0.5$ の場合、波高が大きくなると周期の短いほうがやや波力の減少する割合が大きくなっている。一方、 $d'/d=1.0$ の場合は周期による違いはほとんどなく、波高が大きくなるとほぼ7割程度に減少している。

### (2) 波力からみた最適断面の検討

直立消波ケーソンにおける消波部の構造諸元は、主に消波対象とする波の条件から決められることが多い。消波性能に影響を与える構造上の主なパラメータとして、前述のように遊水室幅と波長の比 $l/L$ 、遊水室下端深さとマウンド上水深の比 $d'/d$ 、スリット部の開口率 $\epsilon$ がある。このうち、遊水室幅については経済性等を考慮すると必ずしも自由に決めることはできないが、それ以外のパラメータについては比較的自由度が大きく、波力の影響を考慮して決めることが可能な場合もある。

遊水室幅を適切で十分な大きさに決めることができる場合には、遊水室の深さを変えても、反射率はあまり変化しない。したがって、波力を考慮して遊水室深さを決めることができる。周期が短い場合は、遊水室後壁への衝撃的波力を避けるため、遊水室をケーソン下端まで設けるほうがよい。これに対して、周期が長い場合は、衝撃的波力はあまり大きくならないので、ケーソンの重量や曳航時のバランス等を考慮すると、遊水室をケーソン下端まで設ける必要はないと考えられる。

一方、遊水室幅を十分にとれない場合、反射率を小さくするためには遊水室深さをできるだけ深くする必要があり、また、スリットの開口率も通常より小さくしなければならない。このような条件では、断面形状は消波性能のみで決まるため、波力を考慮して決めることはむずかしい。

高マウンドの場合には、衝撃的波力をできるだけ小さくすることが重要である。したがって、遊水室はケーソン下端までとすることが望ましい。これにより、遊水室下の不透過壁に作用する波力を考慮する必要がなくなり、しかも遊水室後壁への衝撃的波力の増大も避けることができる。なお、遊水室幅とスリットの開口率は、消波性能を考慮し、遊水室の深さに応じた適切な値を選択する必要がある。

### (3) スリット形状の影響

これまで矩形のスリット部材を対象としてきたが、設計ではスリット部材の選択も問題となる。6章で述べたように、円形や駒形のスリットを用いると、スリット部材に作用する波力はやや小さくなる。ただし、この場合、後壁に作用する波力が逆に大きくなるため、全体の安定性は向上しない。図-44に示した滑動実験結果でも、矩

形と駒形とで安定性はほとんど変わらず、むしろ駒形のほうが波力が大きくなっている場合もある。したがって、スリットの部材波力が問題となる場合以外は、円形や駒形の断面を用いることに特に利点はないと考えられる。今回の波力算定法を適用する場合には、スリット部の波力を0.8倍、後壁の波力を1.2倍して準用する方法が考えられるが、滑動安定性等については不明な点もあるので、必要に応じて模型実験により確認することが望ましい。

## 8. まとめ

本研究において得られた主要な結論をまとめると以下のとおりである。

- 1) 直立消波ケーソンの各部材に作用する波力がピークとなる位相は、押し波時Ⅰ、Ⅱa、Ⅱb、引き波時Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの6つに分けられる。各部材の設計およびケーソン全体の安定性の検討は、これらの位相のうち最もきびしい条件について行う必要がある。
- 2) 押し波時の波力は、合田式を準用し、波力補正係数 $\lambda$ により修正する方法で計算できる。ただし、合田式における $\alpha_2$ の代わりに、衝撃的波力の影響を考慮した $\alpha_1$ と $\alpha_2$ のどちらか大きいほうを用いる。
- 3) スリット部および下部不透過壁には、通常的设计条件においては衝撃的波力がほとんど作用しない。高マウンドの場合にはやや衝撃的波力が作用するが、通常混成堤に作用する衝撃的波力に比べると小さい。
- 4) 遊水室の下に不透過壁を有する場合、遊水室後壁には低マウンドであっても衝撃的な波力が作用することがある。この場合の波力は、遊水室深さおよび遊水室幅等の影響を考慮することにより計算できる。ただし、衝撃的波力は、そのばらつきが大きく、部材設計や全体の安定性について十分に検討する必要がある。
- 5) 引き波時の波力は、各位相ごとにケーソン前面遊水室内の水位を与えることにより計算できる。今回の実験条件においては、引き波時の波力は、押し波時の波力に比べて小さく、ほとんど問題にならない。ただし、大水深域の重複波領域では引き波時の波力が相対的に大きくなる。
- 6) ケーソン全体の滑動安定性について、滑動合成波力の実験値と計算値を比較すると、従来の算定法ではマウンドの影響等を考慮していないため、高マウンドの場合には実験値よりも小さい危険側の値となる。これに対して、今回の算定法ではすべてのマウンド条件に対してはほぼ妥当な値を与えている。

7) スリット壁の断面を矩形から円形や駒形などの抵抗の少ない形状に変えると、スリット壁自身に作用する波力はやや小さくなる。ただし、その分遊水室後壁に作用する波力が大きくなるため、ケーソン全体の安定性はあまり変わらない。

8) 直立消波ケーソンは、通常の混成堤に比べてケーソン全体に作用する波力が減少する。滑動合成波力で比較すると、周期や構造諸元によって多少は異なるが、平均すると $d/h=0.7$ 程度では約8割、 $d/h=0.5$ 程度では約7割であり、特に高マウンドの場合に有利な構造形式である。

## 9. あとがき

本研究により、直立消波ケーソンの各部材に作用する波力および全体の滑動安定性を明らかにし、位相差の影響を考慮した新しい波力算定法を提案した。この方法を用いることにより、高マウンドで衝撃的波力が作用する場合も含めて、直立消波ケーソンの各部に作用する波力を適切に算定できる。ただし、波力の算定にあたっては、以下の点に注意する必要がある。

- 1) 今回の算定法は、本研究で対象とした縦スリット型ケーソンだけでなく、各種の直立消波ケーソンに対してほぼ適用できる。ただし、ケーソンの形状が大きく異なる場合には、模型実験等により確認することが望ましい。
- 2) 遊水室に上床版のある構造では、遊水室内における波面の上昇により、上床版に大きな揚圧力が働く場合がある。
- 3) 遊水室後壁には、透過壁の天端高さによっては、越波した波により局所的に非常に大きな波力が作用する場合がある。
- 4) マウンド天端上水深に比べて遊水室の深さがかなり浅い場合、下部不透過壁に作用する波力には、マウンドの影響による波力の増大が生じやすい。

本研究の実施にあたっては、当所の谷本勝利次長や高山知司水工部長から有益な助言を得ている。また、実験の遂行にあたっては、前水工部耐波研究室の木村克俊研究官や水工部海洋エネルギー利用研究室の室善一朗研究員らの協力を得ている。ここに記して謝意を表する次第である。

(1991年9月30日受付)

## 参考文献

- 1) Jarlan, G. E. : A perforated vertical wall break-water: The Dock and Harbour Authority, Vol. 41, No. 488, 1961, pp. 349~398.
- 2) 高橋重雄：新技術の導入, (1)新形式防波堤,「港湾」, 1988.11, pp. 39~43.
- 3) 谷本勝利・吉本靖俊：直立消波ケーソンの反射率に関する理論および実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第21巻第3号, 1982, pp. 43~77.
- 4) 堀口孝男・中道峰夫：多孔壁式防波堤の消波機構と波力, 第23回海岸工学講演会論文集, 1976, pp. 89~94.
- 5) 井島武士・奥蘭英明・湯村やす・坂井久雄：遊水部をもつ直立消波防波堤と護岸, 第19回海岸工学講演会論文集, 1972, pp. 185~192.
- 6) 近藤俊郎：透過性防波堤の伝達波, 第16回海岸工学講演会論文集, 1969, pp. 321~327.
- 7) 谷本勝利・原中祐人・富田英治・和泉田芳和・鈴木諭司：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.
- 8) 谷本勝利・吉本靖俊：斜め入射波に対する曲面スリットケーソンの反射および部材波力特性に関する研究, 港湾技研資料, No. 493, 1984, 49p.
- 9) 高橋重雄・木村克俊・田中智：共振集波効果を応用した直立消波ケーソンの原理と水理特性, 港湾技術研究所報告, 第28巻第3号, 1989, pp. 3~28.
- 10) 浦島三朗・石塚耕一・近藤俊郎：縦スリット壁に作用する波力に関する基礎的研究, 第30回海岸工学講演会論文集, 1983, pp. 337~341.
- 11) 堀口孝男・布施敏一郎・上原正晴：両面多孔壁消波構造の水理解析：第24回海岸工学講演会論文集, 1977, pp. 276~280.
- 12) 永井荘七郎・角野昇八・北浦良樹・植田操：スリット型防波堤に働く波圧に関する研究, 第25回海岸工学講演会論文集, 1978, pp. 311~314.
- 13) 谷本勝利・原中祐人・高橋重雄・小松和彦・轟正彦・大里睦男：各種ケーソン式混成堤の反射・越波および波力特性に関する模型実験, 港湾技研資料, No. 246, 1976, 38p.
- 14) 谷本勝利・高橋重雄・北谷高雄：混成防波堤のマウンド形状による衝撃碎波力の発生と対策について, 港湾技術研究所報告, 第20巻第2号, 1981, pp. 3~39.
- 15) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説(上), 1989, pp. 130~132.
- 16) 谷本勝利・小島朗史・鈴木諭司：二重横スリット

1) Jarlan, G. E. : A perforated vertical wall break-



- ケーソンの部材に働く波力について, 港湾技研資料, No.416, 1982, 29p.
- 17) 村田繁・山本修司・今野茂・木村岩男・岩淵栄一: 横スリットケーソンに作用する波力機構について, 第29回海岸工学講演会論文集, 1982, pp.404~408.
- 18) 谷本勝利・片岡真二・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, 55p.
- 19) 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎・細山田得三: 混成堤のマウンド形状による衝撃波力係数の提案, 海岸工学論文集, 第39巻, 1992
- 20) 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.

- $H$  : 波高  
 $H_D$  : 設計計算に用いる波高  
 $h$  : 水深  
 $h_b$  : 直立壁前面から沖側へ  $5 H_{1/3}$  だけ離れた地点での水深  
 $h'$  : 直立壁底面の水深  
 $L$  : 水深  $h$  における波長  
 $L'$  : 水深  $h'$  における波長  
 $l$  : スリット部を含む遊水室幅  
 $p_1$  : 合田式による静水面での波圧強度  
 $p_2$  : 合田式による水底面での波圧強度  
 $p_3$  : 合田式によるケーソン下端での波圧強度  
 $p_u$  : 合田式によるケーソン前趾での揚圧力強度  
 $p_{L1}$  : ケーソン前面下部不透過壁での波圧強度  
 $p_{M3}$  : 遊水室下床版での波圧強度  
 $T$  : 周期  
 $w_0$  : 水または海水の単位体積重量  
 $\alpha_1$  : 合田式で静水面の波圧の算定に用いるパラメータ  
 $\alpha_2$  : 合田式で海底勾配やマウンドの影響を表すパラメータ  
 $\alpha_3$  : 合田式でケーソン下端の波圧の算定に用いるパラメータ  
 $\alpha_1$  : 衝撃的波力の算定に用いるパラメータ  
 $\alpha_1'$  : 遊水室後壁の衝撃的波力の算定に用いるパラメータ  
 $\beta$  : 直立壁法線の垂線と波の主方向から  $\pm 15^\circ$  の範囲で最も危険な方向とのなす角度  
 $\epsilon$  : スリット部の開口率  
 $\eta^*$  : 静水面上波圧が0となる高さ  
 $\lambda_1$  : 合田式における波力補正係数  
 $\lambda_2$  : 合田式における衝撃的波力の補正係数  
 $\lambda_L$  : 前面下部不透過壁に作用する波力の補正係数  
 $\lambda_M$  : 遊水室下床版に作用する波力の補正係数  
 $\lambda_R$  : 遊水室後壁に作用する波力の補正係数率  
 $\lambda_S$  : スリット部に作用する波力の補正係数  
 $\lambda_U$  : ケーソン底面に作用する揚圧力の補正係数

主要記号一覧

- $B_M$  : マウンド前方幅  
 $d$  : マウンド上水深  
 $d'$  : 遊水室下端深さ  
 $F_C$  : 滑動合成波力  
 $F_{CC}$  : 従来の算定法による滑動合成波力の計算値  
 $F_{CC}'$  : 新しい算定法による滑動合成波力の計算値  
 $F_{CC}$  : 合田式による混成堤の滑動合成波力の計算値  
 $F_H$  : 全水平波力  
 $F_V$  : 全鉛直波力  
 $f_{EX}$  : スリット部に作用する単位面積あたりの平均水平波力強度  
 $f_{M2}$  : 遊水室下床版に作用する単位面積あたりの平均鉛直波力強度  
 $f_{RX}$  : 遊水室後壁に作用する単位面積あたりの平均水平波力強度  
 $f_{RX1}$  :  $f_{RX}$  の重複波成分  
 $f_{RX2}$  :  $f_{RX}$  の衝撃的成分