

# 港湾技研資料

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

No. 543 Dec. 1985

大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その3)  
—波力特性に関する実験—

谷 本 勝 利  
吉 本 靖 俊  
岡 幸 夫

運輸省港湾技術研究所



# 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	3
2. 対象とした構造の概要 .....	4
3. 実験の方法 .....	5
3.1 実験水路 .....	5
3.2 実験の水利条件 .....	5
3.3 模型と構造条件 .....	6
3.4 波力の測定方法および測点 .....	8
3.5 波力の解析法 .....	11
4. 実験結果 .....	11
4.1 水平板構造 .....	11
4.2 水平板付立体骨組構造 .....	16
4.3 上部半円形断面構造 .....	23
4.4 透過壁式二重セル構造 .....	29
4.5 各種構造に働く全波力の比較 .....	34
5. 試設計の例 .....	38
5.1 基本設計 .....	38
5.2 波力条件 .....	38
5.3 構造諸元と安定計算結果 .....	42
5.4 合成滑動波力、波力モーメントおよび端し圧の時間変化 .....	44
6. あとがき .....	48
参 考 文 献 .....	49
主要記号一覧 .....	49
付 録 .....	51



# 大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その3)

## ——波力特性に関する実験——

谷 本 勝 利 \*  
吉 本 靖 俊 \*\*  
岡 幸 夫 \*\*\*

### 要 旨

海洋空間の有効利用を促進するために、外洋に面した大水深海域において巨大な波浪を制御し、適度に静穏な海域を経済的に造成する技術の開発が望まれている。この目的のため、各種の波浪制御構造物を検討し、その水理特性を調べてきた。本資料はこのうち海底設置型の3構造(水平板付立体骨組構造、上部半円形断面構造、透過壁式二重セル構造)について、その波力特性を報告するものである。

各構造に作用する全水平波力は、不透過な直立壁に対する合田式による波力に比べて小さく、試設計条件( $T_{1/3} = 1.4\text{s}$ ,  $H_{1/3} = 9\text{m}$ ,  $H_{\text{max}} = 16.2\text{m}$ )では水平板付立体骨組構造が0.39、上部半円形断面構造が0.67、透過壁式二重セル構造が0.72倍に減じる。また、全鉛直波力の上向きの最大値は、同じ底幅に対する合田式による全揚圧力に比べて、それぞれ1.37、0.63、0.74倍になり、水平板付立体骨組構造では大きい、他の2構造では小さい。全水平波力と全鉛直波力は一般に位相が異なり、上部半円形断面構造や透過壁式二重セル構造では水平波力最大時に鉛直波力は0かやや下向きに働く。水平板付立体骨組構造の場合は位相差は小さいが、このときには水平波力が小さい。

水深50mの海域を対象とした試設計の結果、水平板付立体骨組構造では静水面下3mに水平板を設け、1函あたり幅50、延長50m、全高55mの規模で基部ケーソン(高さ18m)は水張りのままとしても充分安定であり、端し圧も $29\text{tf/m}^2$ と小さい。上部半円形断面構造は幅35m、延長50m、全高58mで基部ケーソン(高さ20m)の80%を中詰した状態で滑動、転倒は十分安定であるが、端し圧は幅2mのフーチングを設けても $81\text{tf/m}^2$ と大きい。透過壁式二重セル構造は幅40m、延長40m、全高50mで基部ケーソン(高さ20m)の70%を中詰めした状態で滑動安全率が1.24となる。転倒は十分安全であるが、端し圧は $72\text{tf/m}^2$ と大きい。

### 1. ま え が き

我が国の外海大水深域では波浪条件が厳しく、そうした海域の有効利用を図るためには、巨大な波浪を制御し適度に静穏な海域を造成する技術が重要であり、そのための構造物を波浪制御構造物と呼んでいる。

この波浪制御構造物について、筆者らは新しい合理的な構造を開発すべく、昭和57年度から研究に着手しており、

既に3種の海底設置型の透過性構造物(水平板付立体骨組構造、上部半円形断面構造、透過壁式二重セル構造)の反射、伝達特性を不規則波実験によって明らかにし、<sup>1)</sup>さらに構造物の法線(延長)方向に断続的に開口部を設けたときの伝達率の算定法<sup>2)</sup>などを検討した。

本資料は、これらの研究につづき、3種の構造についての波力の特性を明らかにするものである。実験はすべて規則波を用いたものであり、基部ケーソンを除いた上

\* 水工部 防波堤研究室長

\*\* 水工部 防波堤研究室

\*\*\* 昭和59年度研修員 (飛鳥建設株式会社)

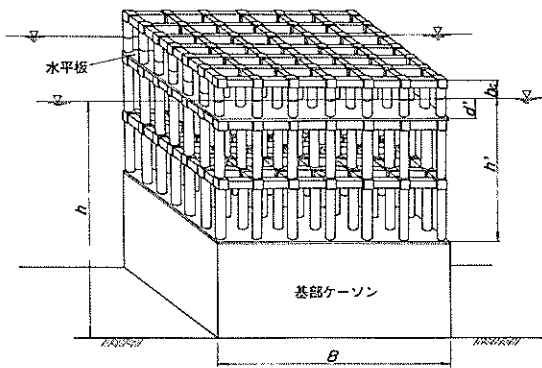


図-1 水平板付立体骨組構造

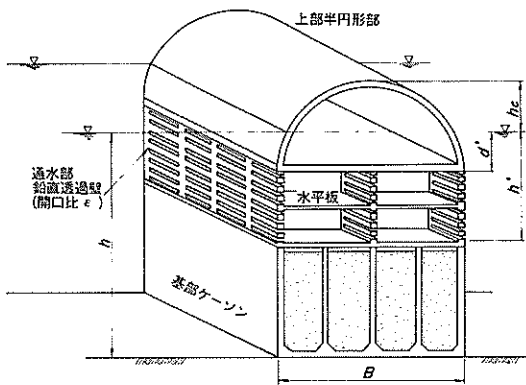


図-2 上部半円形断面構造

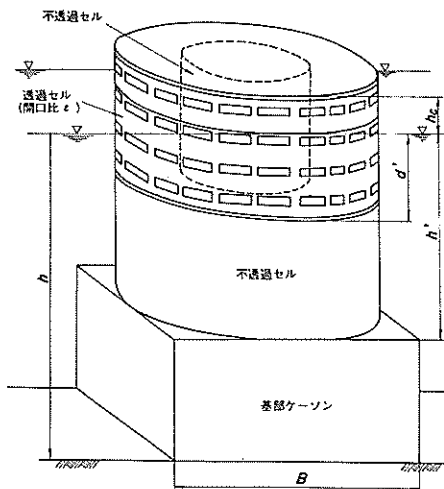


図-3 透過壁式二重セル構造

部構造に働く全波力を測定するとともに、各部材に働く波力や波圧を測定している。

## 2. 対象とした構造の概要

対象とした構造物は図-1～3に示す水平板付立体骨組構造、上部半円形断面構造、透過壁式二重セル構造の3構造である。いずれも水深50m程度の海底に直接設置する型式で通水性を有する構造であり、波力に対しては主として基部ケーソンの重量で抵抗する。各構造についての特徴や狙い、伝達特性を略述すると以下のとおりである。

### ① 水平板付立体骨組構造 (図-1)

本構造は水平板による防波効果を活用したものであり、これを立体骨組部材により水面下の適当な位置に支える構造である。水平板による防波効果のほかに、立体骨組部材によっても若干のエネルギー消費が期待できる。伝達率は水平板の幅および取り付け水深によって変化し、水深に等しい幅(50m)の水平板を静水面下3.75mに設置したとき、有義波周期が10～11sの条件下で伝達率は極小となり、極小伝達率は0.3である。反射率は有義波周期12～13sで極大となるが、最大でも0.5であり、全体に低反射である。これらのほかにも、この構造は直立壁で波を止めるものでないため、水平波力が非常に小さく、流れをほとんど阻止しないという特徴を有する。

### ② 上部半円形断面構造 (図-2)

水面付近を安定性の面で優れた半円形断面とし、その下部に水平孔を有する通水部を設けた構造で、高さに対して狭い幅で安定性を高めようとするものである。伝達波は天端からの越波伝達波と透過部からの透過波のエネルギー合成で表すことができる。前者による伝達率は通常の直立壁よりもわずかに高い程度であり、後者による伝達率は、静水面下水深の0.25～0.55倍のところに開口比0.25の鉛直壁を幅方向に3枚設けたとき、最大でも0.25程度である。反射率は0.7～0.9とやや高い。

### ③ 透過壁式二重セル構造 (図-3)

基部ケーソンの上を二重円筒(セル)構造とし、静水面付近の外壁を透過性としたもので、円筒構造による材料の節約を図りつつ、水面付近での波力の緩和、遊水室による消波効果を狙った構造である。反射率は透過壁の開口比によって異なり、周期が長いほど大きくなる傾向を示す。逆に、伝達率は長周期の波ほど小さくなる傾向を示す。静水面下水深の0.2倍より上の部分を透過構造とし、開口比を0.25としたときの伝達率は、有義波周期11s以上の波に対し0.4以下である。

なお、図中に諸元の記号を表示しているが、 $h$ は水深、

$B$ は構造物の幅、 $h'$ は基部ケーソン上面の深さ、 $h_c$ は天端高を表し、 $d'$ はそれぞれ水平板の深さ（水平板付立骨組構造）、上部半円形部下端の深さ（上部半円形断面構造）、透過部下端の深さ（透過壁式二重セル構造）を表す。

### 3. 実験の方法

#### 3.1 実験水路

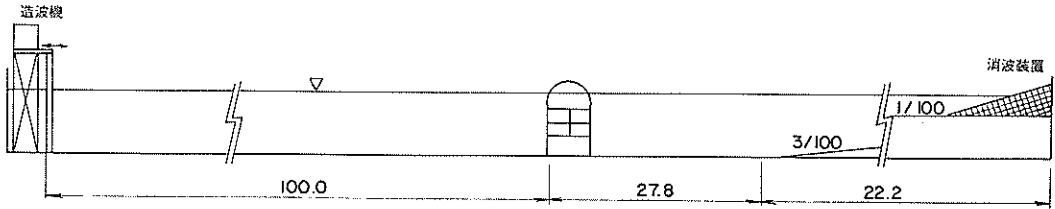
本実験には、先の反射・伝達波実験と同じ全長163m、幅1.0m、深さ1.5mの長水路（図-4）を用いた。造波機は低慣性直流電動機駆動のピストン型式であり、入力信号に追従して任意波形の波を発生させることができる。水路床は造波板から127.8mの地点まで水平床で、そのあとは勾配3/100、1/100の複合斜面としてあり、水

路端には消波装置を設けている。堤体模型の設置位置は造波板から100mの地点であり、この部分は片面ガラス張り側面からの観察が可能である。

#### 3.2 実験の水理条件

本実験は大水深海域における波浪制御構造物の開発を目的としており、水深は現地で50mを想定した。実験波はすべて規則波で、周期は現地量で8~18sの範囲で5種類、波高は周期によって異なるけれども、2.0~17.5mの範囲で3~5種類を対象とした。

本実験の縮尺は1/50を基本としているが、透過壁式二重セル構造の場合には、水路幅と模型構造諸元の都合により1/40とした。したがって、実験水深（ $h$ ）および実験波の周期（ $T$ ）は、前者では100cm、および1.13~2.55s、後者では125cm、および1.27~2.85sである。



単位：m

図-4 実験水路（津波造波水路）

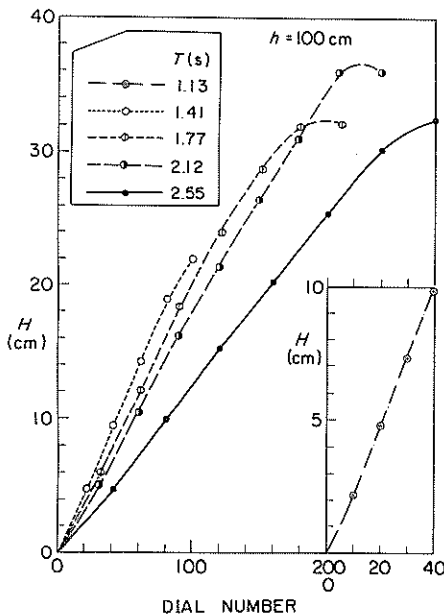


図-5 通過波高（ $h = 100$  cm）

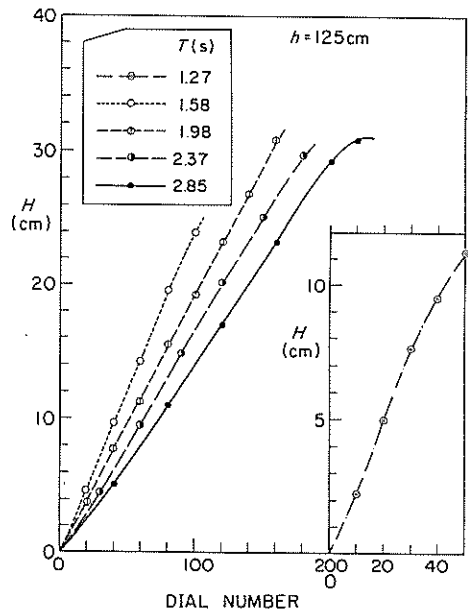


図-6 通過波高（ $h = 125$  cm）

図-5, 6は模型堤体設置以前の状態で測定した造波板のストロークを指定するダイヤル値と通過波高( $H$ )の関係を示したものである。ここに、通過波高は堤体の設置予定位置を中心に波長( $L$ )の $1/4$ の間隔でセットした5台の波高計による測定値の平均値である。 $H$ はストロークとともにほぼ直線的に増大するが、大ストロークでは碎波による頭打ちが認められる。これらの通過波検定試験結果から、 $h = 100$ および $125\text{cm}$ に対し、表-

1に示すような実験波を決定した。表中、 $s$ は縮尺を示しており、 $h = 125\text{cm}$  ( $s = 1/40$ ) に対しては縮尺に依じて、 $h = 100\text{cm}$  ( $s = 1/50$ ) の場合より大きな波高を対象とすべきであるけれども、水路側壁の高さ等の制限のため、 $H=30\text{cm}$ までの波とせざるをえなかった。

### 3.3 模型と構造条件

#### (1) 基部ケーソンと全波力測定装置

今回の実験では、基部ケーソンを水路床に固定し、そ

表-1 水理条件

構造	縮尺 $s$	水深 $h(\text{cm})$	周期 $T(\text{s})$ ( $h/L$ )	波高 $H(\text{cm})$	実験波名
水平板構造 水平板付 立体骨組構造 上半円形 断面構造	$\frac{1}{50}$	100	1.13 (0.503)	5	SWJR1
				7.5	SWJR2
				10	SWJR3
			1.41 (0.331)	10	SWKR1
				15	SWKR2
				20	SWKR3
			1.77 (0.229)	15	SWLR1
				20	SWLR2
				25	SWLR3
			2.12 (0.177)	30	SWLR4
				15	SWMR1
				20	SWMR2
				25	SWMR3
				30	SWMR4
			2.55 (0.140)	35	SWMR5
				15	SWNR1
20	SWNR2				
25	SWNR3				
30	SWNR4				
透過壁式 二重セル構造	$\frac{1}{40}$	125	1.27 (0.503)	5	HWJR1
				8	HWJR2
				11	HWJR3
			1.58 (0.331)	10	HWKR1
				15	HWKR2
				20	HWKR3
				25	HWKR4
			1.98 (0.229)	15	HWLR1
				20	HWLR2
				25	HWLR3
				30	HWLR4
			2.37 (0.177)	15	HWMR1
				20	HWMR2
				25	HWMR3
				30	HWMR4
			2.85 (0.140)	15	HWNR1
20	HWNR2				
25	HWNR3				
30	HWNR4				

の基部ケーソンの中に全波力計を固定してケーソン上面を含めた上部構造に働く波力を測定しているの、各構造ごとの模型と構造条件を述べる前にこれを説明しておく。ただし、測定の原理やセンサー等の詳細は後述することにし、ここでは模型と関連するもののみ述べる。

図-7は基部ケーソンとその中に固定した全波力測定装置のスケッチを、写真-1は水路内でのその設置状況を示したものである。全波力測定装置は二分力検出器4台を用いたもので、その荷重伝達用のジグ上面に基部ケーソン上板を固定して、上部構造を支える構造である。

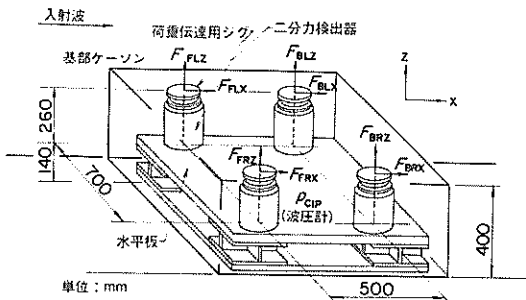


図-7 全波力測定装置 (水平板付立体骨組構造の場合)

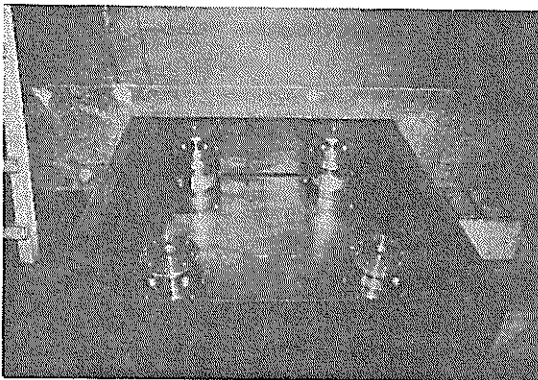


写真-1 全波力測定装置

基部ケーソン上板と側壁とは構造的に切り離してあり、したがって全波力測定装置は基部ケーソン上板を含めた上部構造に働く波力のみを測定する。

基部ケーソンの諸元は構造によって異なるけれども、水路幅方向にはいずれも98cmで同じで、上板ともに鋼製である。

## (2) 水平板付立体骨組構造

当構造においては、水平板に働く波力が最も重要である。そのため、まずはじめに立体骨組部材を省略した基部ケーソンと水平板のみの構造(以降、水平板構造と呼ぶ)を対象として、水平板の設置深さによる波力の変化を調べ、そのあと骨組部材を含めた構造について波力を測定した。

水平板構造の模型は鋼製の基部ケーソンとアクリル樹脂板で製作した水平板(厚さ2cm)を組み合わせたものである。水平板の位置は可変で、鋼製の外枠に固定し基部ケーソンの上板と一体化される。実験の構造条件は表-2に示したとおりであり、 $B$ は100cm( $B/h=1.0$ )、 $h'$ は60cm( $h'/h=0.6$ )で一定とし、 $d'$ を0~20cm( $d'/h=0\sim0.20$ )の範囲で5種類に変化させた。

一方、骨組部材を有した水平板付立体骨組構造の構造条件は一種で、水平板構造において $d'/h=0.075$ の条件に対応する。これは先に実施した反射・伝達波実験の結果による最適条件である。立体骨組部材は、鉛直部材が直径4cm(模型量)の円柱であり、水平部材(桁および梁)は一辺4cmの正四角材である。このうち、鉛直部材は前出の図-1のように波の進行方向および水路幅方向ともに7列配置で、中心間隔はそれぞれ15.8cm、15.5cmである。また、水平部材は天端、水平板の下面、および基部ケーソン上面との間の高さに設け、合計3層とした。これらの骨組部材の交点は $5\text{cm}\times 5\text{cm}\times 4\text{cm}$ の接合材で強固に固定してある。

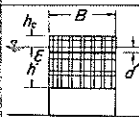
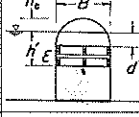
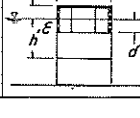
表-3は他の2構造とともに構造条件をまとめて示し

表-2 水平板構造の構造条件

構造	ケース名	構造条件			記号
		$B/h$	$h'/h$	$d'/h$	
水平板構造 基部ケーソン + 水平板	C00	1.00	0.60	0.00	
	C05	1.00	0.60	0.05	
	C10	1.00	0.60	0.10	
	C15	1.00	0.60	0.15	
	C20	1.00	0.60	0.20	



表-3 構造条件

構造	ケース名	構造条件					記号
		$B/h$	$h'/h$	$d'/h$	$h_c/h$	$\epsilon$	
水平板付 立体骨組構造	H1	1.00	0.60	0.075	0.10	0.58 (投影開口率)	
上部半円形 断面構造	E6	0.80	0.55	0.25	0.15	0.25	
透過壁式 二重セル構造	F2	0.80	0.60	0.20	0.20	0.25	

たものであるが、水平板付立体骨組構造の骨組部材上端の高さ(天端高)は静水面上10cm( $h/h=0.10$ )である。また、表中 $\epsilon$ の水平板付立体骨組構造の値は正面から見た構造物の全体の見掛けの投影面積に対する開口部面積の比である。基部ケーソンを除いた上部構造に限ればこの値は0.91となり、ほとんど締め切らない構造であることが知られる。

(3) 上部半円形断面構造

本構造の模型は基部ケーソンの上にアクリル合成樹脂板で製作した通水部と硬質塩化ビニール樹脂板(厚さ1.5cm)で製作した上部半円形部を固定したもので、構造条件は1種である。基本的な諸元の関係は表-3に示したとおりであり、幅 $B$ は80cm( $B/h=0.80$ )、基部ケーソン上面の深さ $h'$ は55cm( $h'/h=0.55$ )、上部半円形部の下端の深さ $d'$ は25cm( $d'/h=0.25$ )、天端高 $h_c$ は15cm( $h_c/h=0.15$ )である。したがって、通水部の高さ( $h'-d'$ )は30cmであるが、その中間に厚さ2cmの水平板を設け上段と下段に分けている。また、前面、中央および後面に厚さ2cmの横スリット壁を設けている。この横スリット壁の開口比は0.25である。表中の $\epsilon$ はこの値を示しているが、正面から見た構造物全体の見掛けの投影面積に対する開口比に換算すると0.043となり、締め切り度の高い構造である。

(4) 透過壁式二重セル構造

本構造の模型は基部ケーソンの上に硬質塩化ビニール樹脂板(厚さ1.5cm)で製作した下部不透過セルとアクリル合成樹脂板(厚さ1.5cm)で製作した上部透過セルおよび硬質塩化ビニール樹脂板(厚さ1.5cm)で製作した内部不透過セルを固定したもので、構造条件は1種である。これについても基本的な構造諸元の関係を表-3に示しているが、幅 $B$ は100cm( $B/h=0.80$ )、基部ケー

ソン上面の深さ $h'$ は75cm( $h'/h=0.60$ )、透過セルの下端の深さ $d'$ は25cm( $d'/h=0.20$ )、天端高 $h_c$ は25cm( $h_c/h=0.20$ )である。また表中には示していないけれども、内部不透過セルの直径は47cmである。透過セルの開口比 $\epsilon$ は0.25であるが、正面から見た構造物全体の見掛けの投影面積に対する開口比に換算すると0.083となる。

3.4 波力の測定方法および測点

(1) 上部構造に働く全波力

本実験では、基部ケーソンを除いた上部構造に働く全波力と各部材に働く波力あるいは波圧を測定した。このうち上部構造(基部ケーソンの上面を含む)に働く全波力は前述した全波力測定装置により測定するもので、付録に示しているように水平波力 $F_{FXT}$ 、鉛直波力 $F_{FZT}$ 、およびモーメント $M_T$ を算出できる。これらの分力の符号は、水平力は波の進行方向、鉛直力は上向き、モーメントは背後へ倒す方向に働くときそれぞれ正と定義する。

測定結果の整理においては、水平波力、鉛直波力については次のように上部構造の作用方向投影面積で除した平均波力強度で表示する。

$$f_{FXT} = \frac{F_{FXT}}{(h_c + h) D} \dots\dots\dots(1)$$

$$f_{FZT} = \frac{F_{FZT}}{B D} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $f_{FXT}$ 、 $f_{FZT}$ は上部構造に働く水平波力強度および鉛直波力強度であり、 $D$ は堤体の水路幅方向の長さである。

なお、構造全体の安定性の検討においては、上部構造に働く波力のみならず、基部ケーソンに働く波力を考慮する必要がある。しかし、基部ケーソンは構造が単純であり、これに働く波力は波圧測定によって容易に求める

ことができるので別に測定するようにしたものである。このため、基部ケーソンと上部構造は構造的に切り離してあり、上部構造の下面にも波力が働く。これは基部ケーソンの上面に相当するものであって、本来その裏面には波力は作用しないと考えなければならない。そのため、本実験においては基部ケーソンと上部構造の透き間をビニールシートで覆ったけれども圧力の伝播を完全に遮断することはできず、これを補正するために基部ケーソンの内部でも波圧を測定した。上述の上部構造に働く全波力の鉛直分力はこれによって補正したものである。

## (2) 部材に働く波力

各部材に働く波力は波圧計およびひずみ（歪み）ゲージによって測定した。これらによる波圧強度や波力強度を  $p$  および  $f$  に測点あるいは部材を表す添字を付けて表示する。以下に、各構造別の測定部材および測点を示す。

### ① 水平板構造

当構造については、水平板に働く波力の一般的性質を明らかにすることが主たる目的であり、測点は図-8に示しているように水平板の上面に4点（HP2, HP4, HP6, HP8）、下面に4点（HP1, HP3, HP5, HP7）、合計8個の波圧測点を設けた。これらの上下の測点はほぼ同じ位置であるが、波圧計の取り付け上の理由から若干ずらしてある。用いた波圧計は受圧面の直径が10mmの超小型波圧計である。また、基部ケーソンには上面に2点（CP1, CP2）、前壁に1点（CFP）、後壁に1点（CBP）の合計4点の波圧測点を設けた。上面の2点は超小型半導体波圧計、側面の2点は受圧面の直径が28mmの小型波圧計である。さらに、図には示していないけれども、基部ケーソン内部に小型波圧計1個（CIP）を

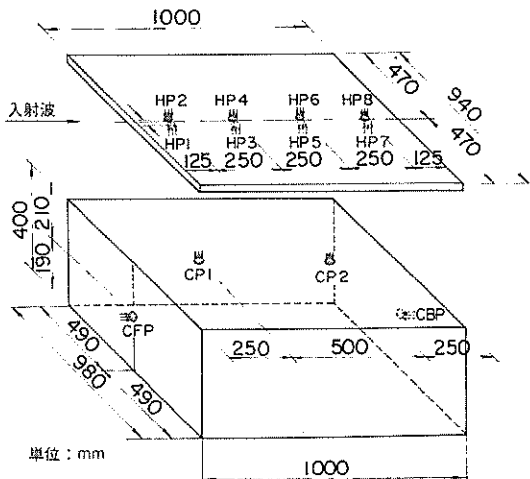


図-8 水平板構造の測点

設けている。これは前述したように、上部構造に働く全波力測定において基部ケーソンの上板下面に働く波力を補正するためのもので、基部ケーソン内部での圧力がほぼ一様であることを確認したのち、一点の測点に限ったものである。

### ② 水平板付立体骨組構造

当構造においては、水平板および基部ケーソンに働く波力を波圧計により測定するとともに、鉛直および水平の骨組部材に働く波力をひずみゲージによって測定した。このうち、波圧の測点は図-9に示しているように、水平板上面に6点（HB1, HB3, HB5, HB7, HB9, HB11）、下面に6点（HB2, HB4, HB6, HB8, HB10, HB12）、基部ケーソンの前・後壁に1点ずつ（CFP, CBP）の合計14測点（基部ケーソン内の測点CIPを除く）である。

一方、骨組部材に働く波力については、図-10に示しているように波の入射側の第一列の部材と最後列の部材に限って測定した。このうち、横梁は角材であるので、水平方向と鉛直方向波力を別の部材で最上段と最下段についてのみ測定している。すなわち、最前列についてはFH1, FU1, FH2, FU2の4部材、最後列についてはBH1, BU1, BH2, BU2の4部材である。鉛直部材については上・中・下の3部材に分けて測定しており、最前列はFV1, FV2, FV3、最後列はBV1, BV2, BV3の合計6部材である。したがって、測定部材の総数は14となる。いずれも、ひずみを大きく出力するために、一端を切り離して片持ち梁構造とし、さらに板厚を支障のない範囲で変えるなどして、2ゲージ法を採用している。これらの詳細は付録で述べるが、この方法による作用波力は等分布荷重として求める。

以上、当構造の部材波力の測点は合計28である。

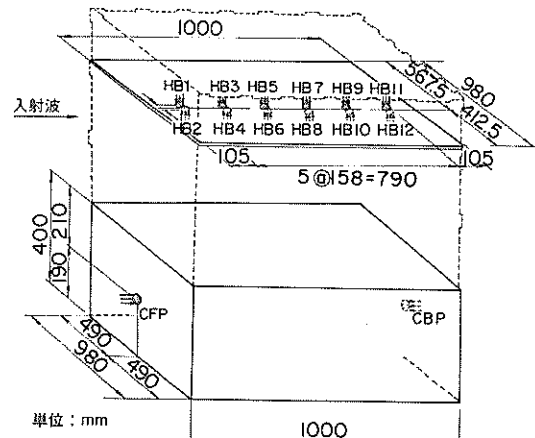


図-9 水平板付立体骨組構造の測点

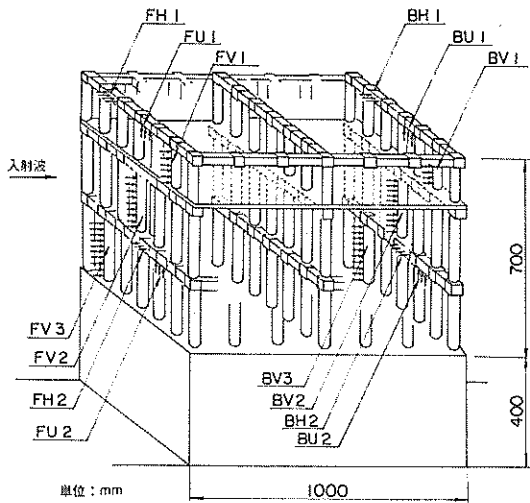


図-10 水平板付立体骨組構造の測定部材

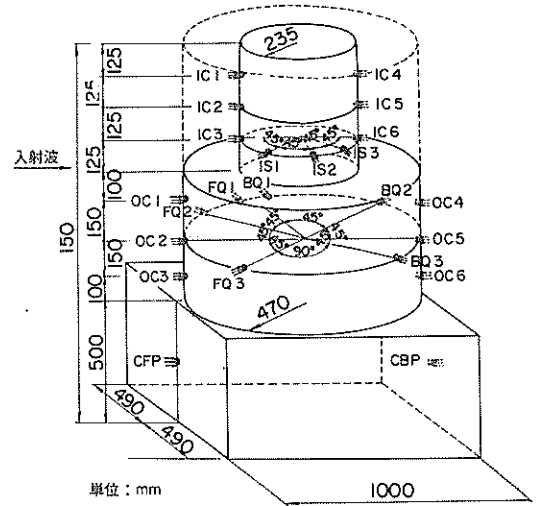


図-12 透過壁式二重セル構造の測点

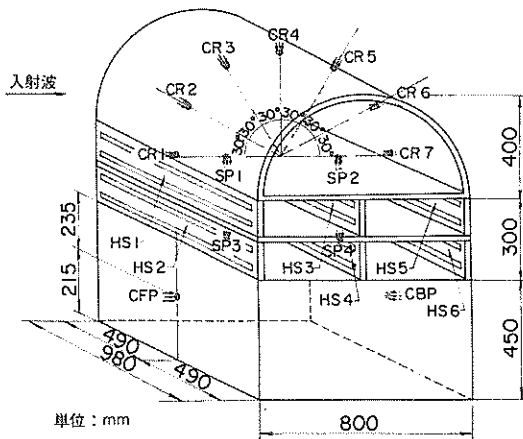


図-11 上部半円形断面構造の測点

### ③ 上部半円形断面構造

当構造においては、上部半円形部に働く波力が最も重要であり、図-11に示しているように、半円形表面に7点(CR1, CR2, CR3, CR4, CR5, CR6, CR7)、底面に2点(SP1, SP2)の合計9点で波圧を測定した。基部ケーソンについては上面に2点(SP3, SP4)、前・後壁面に1点ずつ(CFP, CBP)の合計4測点である。

一方、通水部の横スリット部材については、前面、中央面、後面のそれぞれ上・下段の合計6部材(HS1, HS2, HS3, HS4, HS5, HS6)で作用波力をひずみゲージにより測定した。ただし、横スリット部材模型は簡単のために途中の縦柱を省略しており、スパンを非常に長くしてある。そのため、特に片持ち梁としなくても充分なひずみが出力されるが、両端の固定条件は完全でない。本

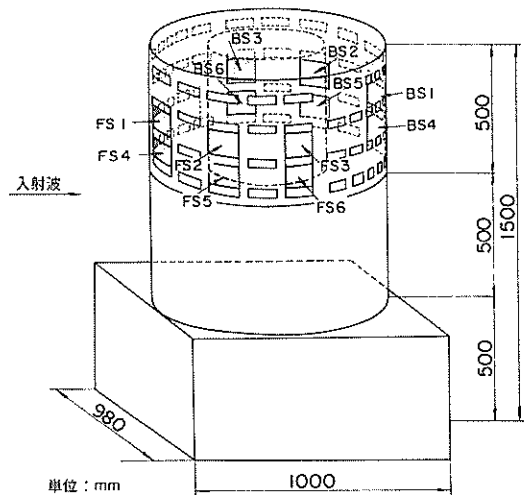


図-13 透過壁式二重セル構造の測定部材

実験においては、これを補償するために4ゲージ法を採用している。

以上、当構造の部材波力測点は合計19である。

### ④ 透過壁式二重セル構造

当構造の不透過部の波力は図-12に示しているような23の測点で波圧を測定することによって。すなわち、内部不透過セルについては、前端のIC1, IC2, IC3、後端のIC4, IC5, IC6、および周辺のIS1, IS2, IS3の合計9点である。このうち、IC3, IC6と周辺部の波圧測点は同一高さでの円周上に位置する。下段の不透過

セルについては、前端的OC1, OC2, OC3, 後端的OC4, OC5, OC6, 周辺の前半部のFQ1, FQ2, FQ3, 後半部のBQ1, BQ2, BQ3の合計12点である。このうち、OC2, OC5と周辺部の波圧測点は同一高さの円周上に位置する。基部ケーソンについては、前・後壁の2点で(CFP, CBP)である。

一方、透過セルの横スリット部材については、図-13に示しているように、前半部のFS1~FS6の6部材および後半部のBS1~BS6の6部材の合計12部材で、ひずみゲージにより測定した。この場合は片持ち梁であり、2ゲージ法によっている。

以上、当構造の部材波力全測点数は35である。

### 3.5 波力の解析法

波力データはデータレコーダーに収録したのち、不規則波実験解析装置(DS-600)を用いてオフラインで解析した。その際、適宜ローパスフィルターを通して、ノイズをカットした。解析プログラムの概要は付録で述べるが、解析の内容は波力のピーク値解析や平均波力波形の作成、および同時波圧分布の解析などである。

## 4. 実験結果

### 4.1 水平板構造

#### (1) 波の作用状況

写真-2, 3に周期2.12s, 波高30cmの波の水平板構造への作用状況を示す。これらは水平板の設置水深が $d'/h=0$ , および0.10の条件の例である。

$d'/h=0$  (写真-2)の場合の写真(1)では、水平板下に空気が閉じ込められているのが認められる。これは写真(4)に見られるように、引き波時に水平板下面の前端からはく離が生じて、それが後端にまで及び以前に次の波が作用することによって生じたもので、閉じ込めたと同時に空気塊は後方へ移動し、写真(2)に見られるように波が水平板上に打ち込むときには、勢いよく後端から噴出する。このとき、水平板後端での水位は静水面(水平板上面)より高くなっており、水平板上ではこれによる逆流が生じる。写真(3)ではこの逆流する水塊と前端からの水塊が衝突するようすが認められる。

$d'/h=0.10$  (写真-3)の場合には、水平板下面での大きな空気の閉じ込めは生じないが、水平板上での水塊の挙動は $d'/h=0$ の場合とほぼ同じであり、写真(2)では双方からの水塊の衝突が認められる。

以上のように、当構造の場合水平板の設置深さと波浪条件によって水平板下に空気塊を閉じ込める現象が生じることが一つの特徴である。そこで、実験時に目視によって空気塊の閉じ込めが生じるかどうか観察した。図

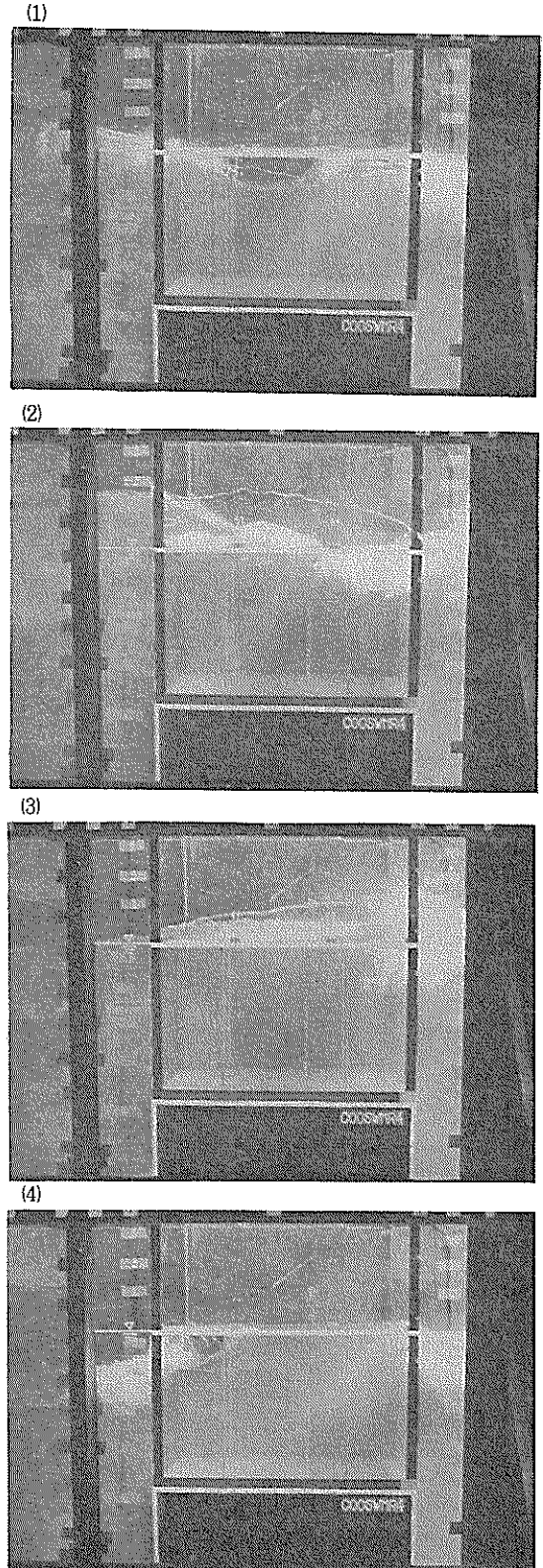


写真-2 水平板構造の透過状況 ( $d'/h=0$ )

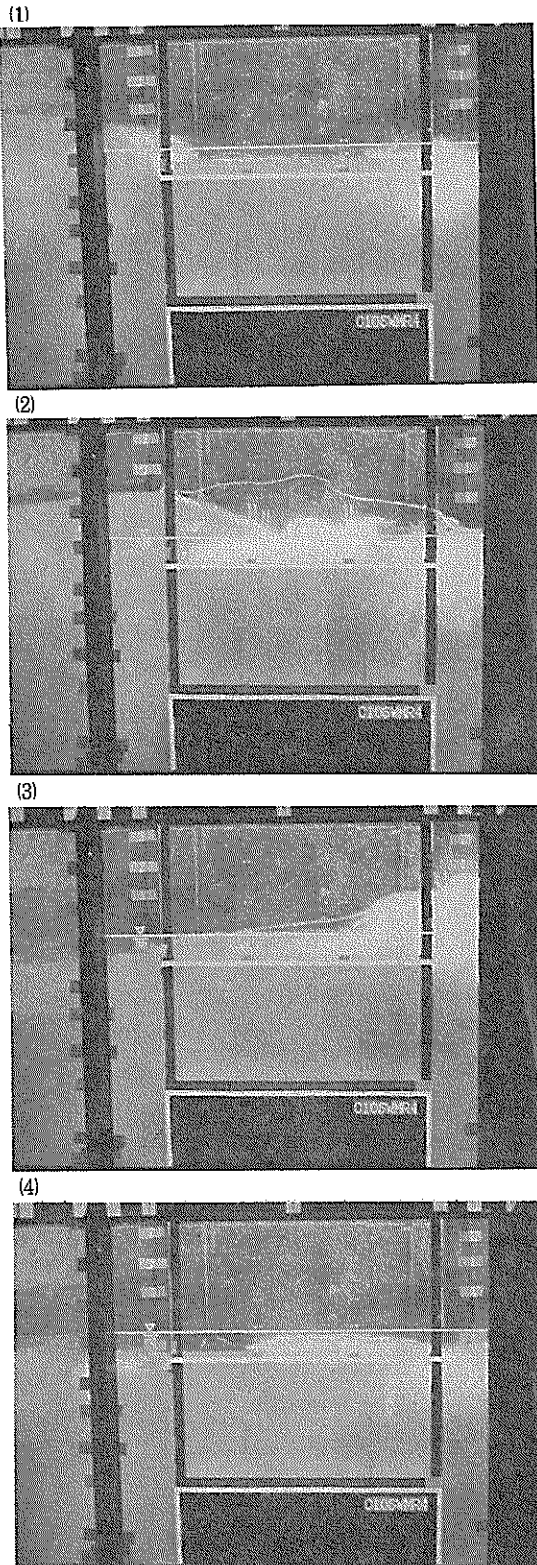


写真-3 水平板構造の透過状況 ( $d'/h = 0.1$ )

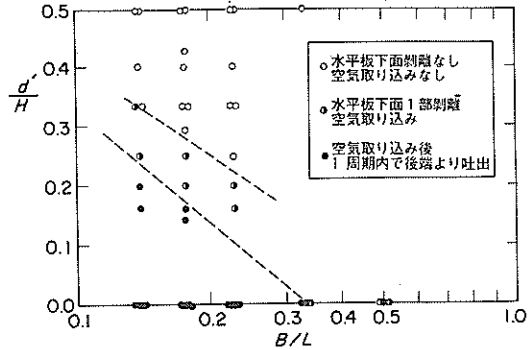


図-14 水平板下面への空気を取り込み

図-14はその結果を示したものである。横軸に $B/L$ 、縦軸に $d'/H$ をとって、空気閉じ込めの程度を区別してプロットしてある。ここで、 $L$ は波長、 $H$ は入射波高である。図中、●は空気が水平板前方で閉じ込められて、1周期の内に後端から噴出する場合を表し、○は空気を全く閉じ込めず、かつ前後端ともはく離を生じない場合を表す。◐は両者の中間であり、水平板下面に空気を閉じ込めるけれども、1周期の内に後端から噴出せず、徐々に後方に移動する場合、あるいは水平板の前端または後端にはく離のみが生じる場合を表す。図中これらの境界を破線で示しているが、一般に $B/L$ および $d'/H$ が小さいほど空気を大量に閉じ込める傾向にある。たとえば、 $d'/H$ が0すなわち水平板が静水面に位置する場合には、すべての条件で空気が閉じ込められ、周期が長いほど後端から勢いよく噴出していた。特に、周期が2.12s以上で波高が30cm以上の場合には、引き波時に水平板全体が空気中に露出する状態であった。

#### (2) 波力波形の例

水平板構造に働く波力や波圧波形の例を図-15に示す。これは水平板の設置水深が $d'/h = 0.10$ の条件において、 $T = 2.12s$ 、 $H = 30cm$ の波が作用したときのものである。これらの波形はいずれも有効波内で数波測定した波形を平均したもので、同じ波形を2波分示してある。図中に示す $f_{FZT}$ は全波力測定装置によって測定した鉛直波力、すなわち水平板と基部ケーソンの上面に働く波力の鉛直合力を、水平板の面積で割って求めた平均波力強度であり、上向きに働くときが正である。 $p_{CPT}$ 、 $p_{CFP}$ 、 $p_{CBP}$ はそれぞれ基部ケーソンの上面、前、後面壁に働く平均波圧強度である。したがって、 $f_{FZT}$ から $p_{CPT}$ を引いたものが水平板に働く平均波力強度となるが、図中上から五番めの $f_{H2T}$ はこれを表している。さらに、水平板の上・下面で波圧を測定しているが、これから求

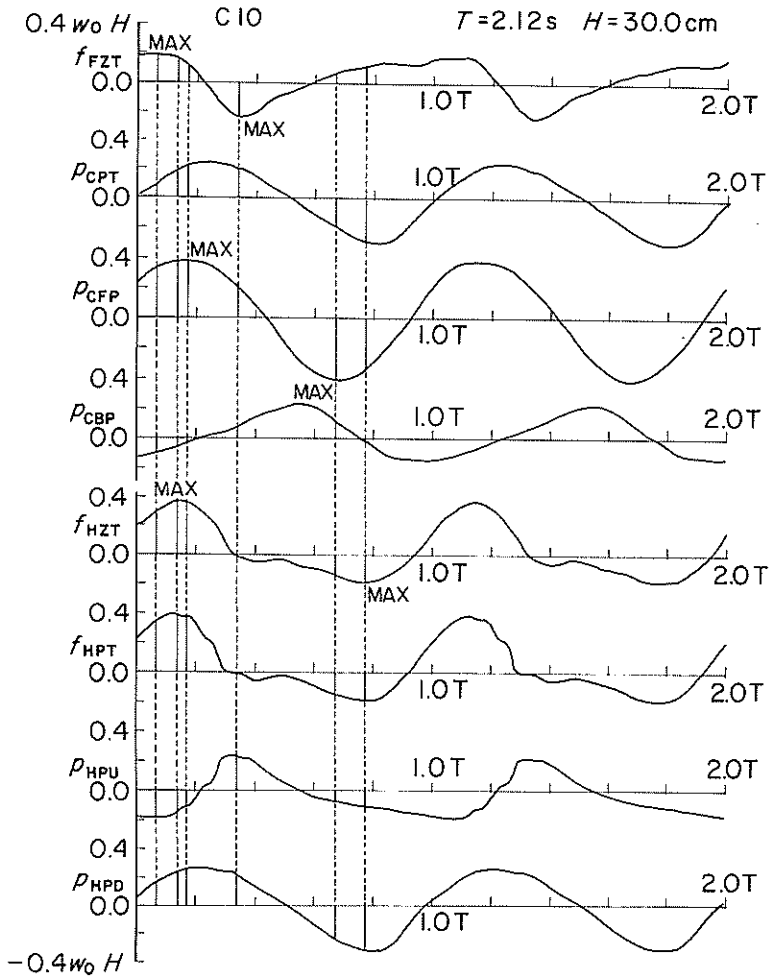


図-15 水平板構造の波力波形 ( $d'/h = 0.1$ )

めた水平板に働く平均波力強度が  $f_{HPT}$  であり、下の  $p_{HPU}$  および  $p_{HPD}$  はそれぞれ水平板上面および下面での平均波圧強度を表す。つまり、 $p_{HPD}$  から  $p_{HPU}$  を引いたものが  $f_{HPT}$  である。ただし、波圧は壁面を押す方向、水平板に働く波力は上向きを正と定義している。また、図にはこれらのうち  $f_{FZT}$ 、 $p_{CFP}$ 、 $f_{HZT}$  の正、負のピーク時について縦線を入れ、ピーク位置を MAX で表示してある。以下、これらの波力の大きさを述べるが、負の波力についてはその絶対値を対象とする。

まず  $f_{FZT}$  を見ると、ピーク値の大きさは負のほうが大きく、作用時間は正のほうが長いという特徴が認められる。この  $f_{FZT}$  は  $p_{HPU}$ 、 $p_{HPD}$ 、および  $p_{CPT}$  の合力に対応するが、 $p_{CPT}$  と  $p_{HPD}$  の波圧波形は大きさおよび位相ともほぼ同じであり、作用方向が反対であるためこれらはほぼキャンセルする。したがって、 $p_{HPU}$  が  $f_{FZT}$  に対応

することになるけれども、事実  $p_{HPU}$  の正負を逆に見れば、両者は微細な部分を除いてほぼ一致していることが知られる。これから、上部構造全体（基部ケーソン上面を含む）に働く鉛直波力としては水平板上面に働く波圧が重要であると言える。

次に、水平板に働く波力であるが、 $f_{HZT}$  と  $f_{HPT}$  がこれを表す。両者は測定法が異なるだけで同じものである。結果に波圧測定による  $f_{HPT}$  に微細な変動が現れているものの、これを除けば両者は非常によく一致していることが確認できる。波力ピーク値は正のほうが大きく、作用時間は負のほうが長い波形となっている。すなわち、ピーク値は水平板を上を持ち上げる方向のほうが大きく、この例の場合平均波力強度は  $0.40 w_0 H$  に達している。これは水平板上面では水位が低下して負圧が働いているところへ、波が上昇を始めて下面を押し上げるとき

に対応する。水平板の上・下面に働く平均波圧強度を見ると、下面の  $\bar{p}_{HPD}$  が比較的単調な変化を示すのに対し、上面の  $\bar{p}_{HPU}$  は複雑な変化を示している。これは水平板上面では前端からの打ち込みや前後からの波が衝突するなど複雑な作用をすることの現れである。なお、この例は水平板下面が露出しない条件であるけれども、空気を閉じ込めるような場合には下面に働く波圧も非常に複雑なものとなる場合がある。

最後に、基部ケーソン前後壁に働く波圧については、両者に  $0.4T$  程度の位相差があり、ピーク値は前壁の  $\bar{p}_{CFP}$  のほうが大きいことが認められる。また、その  $\bar{p}_{CFP}$  の正負のピーク値を比較すると負のときのほうがやや大きく、引き波が大きいたことが知られる。これは実験時の観察によっても認められており、また後述の他の構造でも同様で、透過性構造物の場合の特徴のようである。この前壁面に働く波圧の正のピークと水平板に働く波力の正のピークはほぼ同時に生じている。後面壁での波圧は正のピークのほうが大きい。

### (3) 水平板に働く波力

図-16, 17 は  $d'/h = 0.10$  の条件における水平板上面での平均波圧  $\bar{p}_{HPU}$ 、および下面での平均波圧強度  $\bar{p}_{HPD}$  の正負のピーク値を入射波高に対してプロットしたものである。 $\bar{p}_{HPU}$  の正のピーク時は水平板上に波が乗りあげたとき、あるいは水平板上で波が砕波し打ち込みを生じるときに対応し、ピーク値は入射波高が大きいほど大きくなっているが、 $T = 2.12$  s の波では波高が 30 cm を超えると逆に小さくなる傾向を示している。周期の違いによる影響も若干あり、長周期の波ほど大きくなる傾向にある。実験データをほぼ包絡する最大波圧は約  $0.30 \omega_0 H$  である。一方、負の波圧のピーク値は引き波時で水平板上の水位が最も低下するときに発生する。水平板上の水深  $d'$  は 10 cm であるので、 $\bar{p}_{HPU}$  の負のピーク値は最大でも  $-10 \text{ gf/cm}^2$  となりうるが実際には長周期の波に対して最大で約  $-6.5 \text{ gf/cm}^2$  であり、波高の増大とともにこの値に漸近している。

$\bar{p}_{HPD}$  は正、負のピーク値とも波高に比例して大きくなる傾向にある。また、長周期の波ほど大きい傾向を示し、 $T = 2.55$  s の波に対して、正、負のピーク値はそれぞれ  $0.32 \omega_0 H$ 、 $-0.39 \omega_0 H$  である。

図-18 は水平板に作用する平均鉛直波力  $f_{HZT}$  の正、負のピーク値を示したものである。この  $f_{HZT}$  は水平板上面の平均波圧  $\bar{p}_{HPU}$  と下面の平均波圧  $\bar{p}_{HPD}$  の差圧に対応するものであり、鉛直上向きを正と定義している。正のピーク値すなわち水平板全体を持ち上げようとする波力のピーク値は周期の最も長い波を除いて波高に比例して

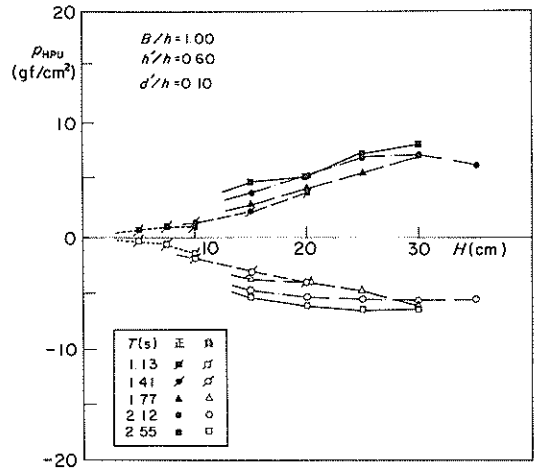


図-16 水平板上面の平均波圧 ( $d'/h = 0.1$ )

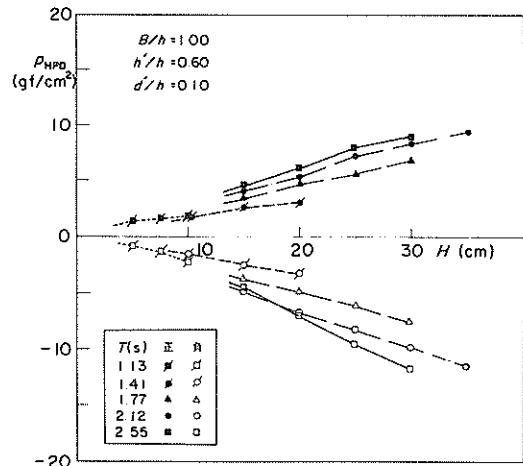


図-17 水平板下面の平均波圧 ( $d'/h = 0.1$ )

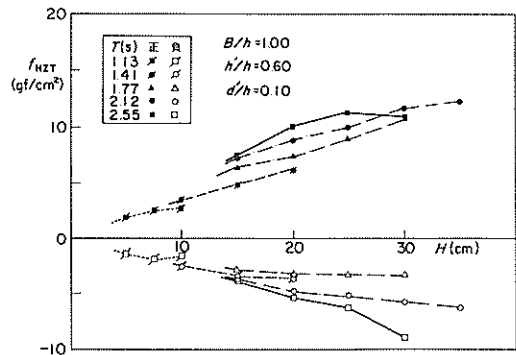


図-18 水平板に作用する平均波力 ( $d'/h = 0.1$ )

増加している。 $T = 2.55$  sの波では波高が25cmを超えると逆に小さくなる傾向を示している。実験データを包絡する値は $0.50 w_0 H$ である。一方、負のピーク値は周期の短い波では波高が増すにつれ一定値に近づく傾向にあるが、周期の長い波では特に $T = 2.55$  sの波では波高の増大とともにピーク値は増大しており、 $-0.25 w_0 H$ 程度である。各周期とも正のピーク値が負のピーク値より大きくなっており、水平板付立体骨組構造のように水平板を支持する骨組部材に対しては圧縮力より引っ張り力の方が大きくなる可能性がある。

前出の波力波形を示した図-15で水平板下面の平均波圧 $\bar{p}_{HPD}$ と基部ケーソン上面の平均波圧 $\bar{p}_{CPT}$ がほぼ同位相、同振幅で変化することが認められたが、図-19は全波浪条件に対する両者のピーク値の相関を見てみたものである。ただし、負圧については絶対値で示している。正、負のピーク値とも $\bar{p}_{HPD}$ が若干大きい傾向を示しているが、両者の相関は非常によく、 $\bar{p}_{CPT}$ 、 $\bar{p}_{HPD}$ のピーク値はほぼ等しいとみなしうる。このように、水中での中空部における上面および下面に働く波圧が等しい傾向は水平板付立体骨組構造、および上部半円形断面構造の通水部でも同様である。

#### (4) 水平板の設置水深の影響

水平板の設置水深すなわち水平板上の水深 $d'$ の違いによる $\bar{p}_{HPD}$ 、 $\bar{p}_{HPD}$ 、 $f_{HPT}$ の正、負のピーク値の変化を図-20~22に示す。横軸に $d'/h$ をとり、縦軸に波圧係数をとったものであり、図中に示す各周期の代表的な波高条件について示している。

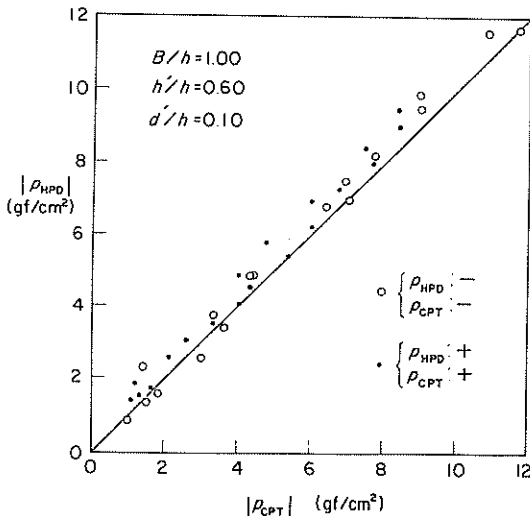


図-19  $\bar{p}_{CPT}$ と $\bar{p}_{HPD}$ の相関

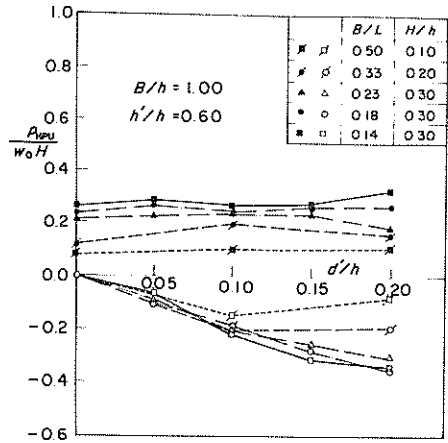


図-20  $\bar{p}_{HPD}$ に対する設置水深の影響

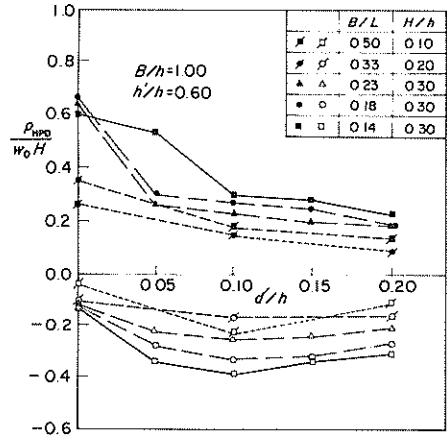


図-21  $\bar{p}_{CPT}$ に対する設置水深の影響

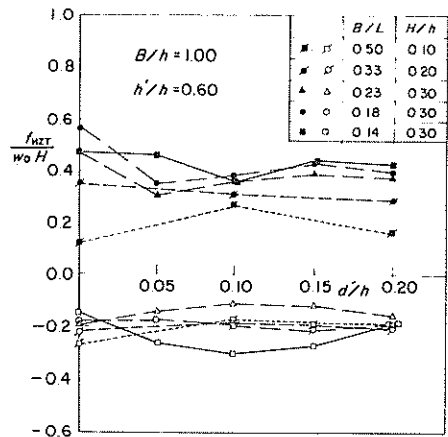


図-22  $f_{HPT}$ に対する設置水深の影響



図-20に示す $p_{HPV}$ の正のピーク値は $d'/h$ にほとんど無関係である。しかし、負のピーク値は $d'/h$ が0~0.1においては $d'/h$ が増すほど大きくなる傾向にある。 $d'/h$ がこれより大きくなると周期によって傾向が異なり、周期の長い波ではさらに大きくなるものの周期の短い波では同程度があるいは逆に小さくなる。

図-21に示す $p_{HPD}$ の正のピーク値は $d'/h = 0.0$ のとき $B/L = 0.14, 0.18, 0.23$ の条件で波圧係数が約0.6と大きい。これは水平板下面が剥離した後に波面が水平板下面に強く打ちあたることなどにより衝撃的な波圧が水平板に作用するためである。 $d'/h = 0.05$ の条件でも $B/L = 0.14$ の場合には空気の取り込みが生じるため、ピーク値が大きくなっている。しかし、他の条件では空気の取り込みは発生せず、ピーク値はそれほど大きくない。また、 $d'/h$ が大きくなるにつれて若干小さくなる傾向はあるもののその変化は小さい。負のピーク値については周期によって若干異なるが、全体に $d'/h = 0$ のとき小さく、 $d'/h = 0.10$ 付近で最大となる傾向を示す。しかし、 $d'/h$ が0.05以上では変化はそれほど大きくない。

図-22に示す $f_{HZT}$ の正のピーク値は周期によって若干異なる変化を示しているけれども、 $d'/h$ が0.05より大きい条件では $d'/h$ の違いによるピーク値の変化はそれほど大きくない。負のピーク値は周期の最も長い $B/L = 0.14$ の条件では $d'/h = 0.10$ で最大となる変化を示しているが、他の条件では逆に $d'/h = 0.10$ で最小となる変化を示している。しかし、その変化の程度は小さく、 $d'/h$ の違いによる顕著な違いは認められない。

#### (5) 同時波力分布

前出の写真-3、図-15に示した $d'/h = 0.10$ 、 $T = 2.12$  s、 $H = 30$  cmの条件における同時波力分布の例を図-23(1)~23(5)に示す。同図は順に $f_{FZT}$ の正、 $p_{CFP}$ の正、 $f_{FZT}$ の負、 $p_{CFP}$ の負、 $f_{HZT}$ の負のピーク時における各測点での同時波力を各ピーク値の発生順に示したものである。

$f_{FZT}$ の正のピーク時(図-23(1))は押し波時の初期に対応し、水平板上では全体に水位が低下しているため一様に分布する負圧が発生している。水平板と基部ケーソンの間の領域では、水平板下面および基部ケーソン上面とも同じ波圧分布を示しており、前側では正圧、後側では負圧となっている。

$p_{CFP}$ の正のピーク時(図-23(2))は $f_{HZT}$ の正のピーク時とはほぼ一致している。水平板前端および後端から水塊が水平板上に侵入しはじめるため、水平板の上面では前後端で小さい負圧分布となっている。水平板下面お

よび基部ケーソン上面では前端で大きく、後端で小さい正の台形分布を示している。このときには $p_{CBP}$ は負圧となっている。

$f_{FZT}$ の負のピーク時(図-23(3))では、水平板の前端および後端から侵入した波が水平板上で衝突し、乱れた状態となるため上面の波圧分布は場所的に変化している。しかし、水平板下面および基部ケーソン上面ではほぼ一様な正圧分布である。

$p_{CFP}$ の負のピーク時(図-23(4))は引き波時に対応し、堤体直前での水位が最も低下しているときであるが、堤体後端では水面が静水面より上にある。したがって、水平板上では前端に負圧、後端で正圧となる変化を示している。

$f_{HZT}$ の負のピーク時(図-23(5))では水平板後端における水位が静水面程度まで低下しており、水平板上での波圧は前端で負圧、後端ではほぼ0となる分布を示している。水平板と基部ケーソンの間では水平板下面および基部ケーソン前面にわたり比較的大きな負圧分布となっている。

## 4.2 水平板付立体骨組構造

### (1) 波の作用状況

写真-4は $T = 2.12$  s、 $H = 30$  cmの波の作用状況を示すものである。当構造の波の作用状況は基本的には前述の水平板構造と同じであるが、骨組部材があるため水平板上における水塊の乱れの程度が大きくなり、これによって生じる気泡の量も多い。また、引き波時には水平板上の水塊が前方および後方へ流出、落下するが、これが骨組部材により若干押さえられ、滞水が多くなるようである。

### (2) 波力波形の時間変化

図-24は波力波形の時間変化の例を示すものであり、条件は前出の写真-4の場合と同じである。なお、図中に示す $f_{HBT}$ は水平板全体に作用する平均鉛直波力であり、水平板上面における平均波圧 $p_{HBV}$ および下面における平均波圧 $p_{HBD}$ の差圧として求めたものである。

$f_{FZT}$ は大きさおよび作用時間とも負すなわち上部構造を押しあつめる方向に作用する場合が卓越している。一方、 $f_{FXT}$ は立体骨組部材に作用する水平波力に起因するものであり、正、負の値とも小さい。しかも $f_{FXT}$ の正のピーク時は $f_{FZT}$ の負のピーク時とはほぼ一致しており、滑動安定性に対して好都合な特徴を有している。基部ケーソン前面の波圧である $p_{CFP}$ は比較的大きく、滑動安定性に関してはむしろ $p_{CFP}$ が支配的であると言える。 $p_{CFP}$ の正、負のピーク値は負圧時のほうがやや大きい。一方、基部ケーソン後面の波

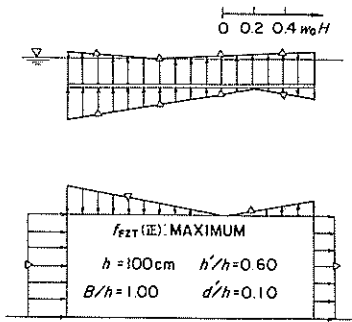


図-23(1) 同時波力分布 ( $f_{FZT}$  (正) ピーク時)

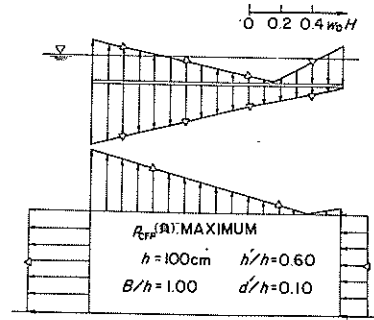


図-23(4) 同時波力分布 ( $R_{CFP}$  (負) ピーク時)

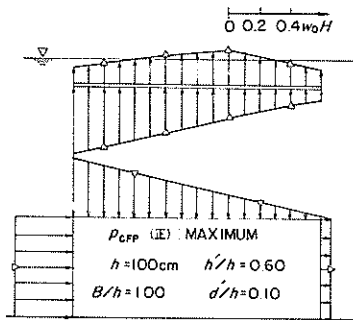


図-23(2) 同時波力分布 ( $P_{CFP}$  (正) ピーク時)

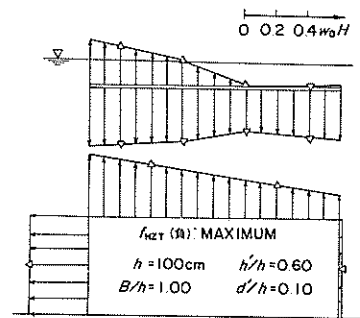


図-23(5) 同時波力分布 ( $f_{UZT}$  (負) ピーク時)

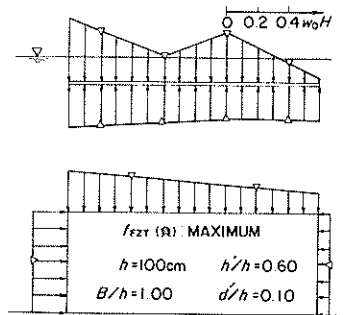
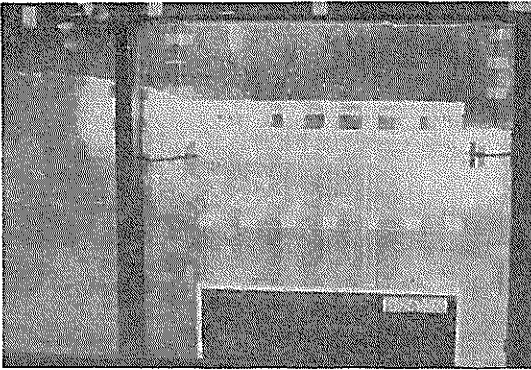
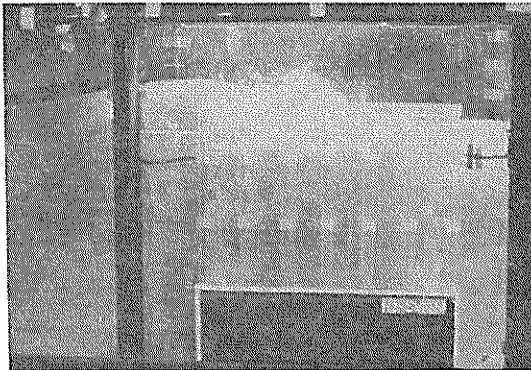


図-23(3) 同時波力分布 ( $f_{ZT}$  (負) ピーク時)

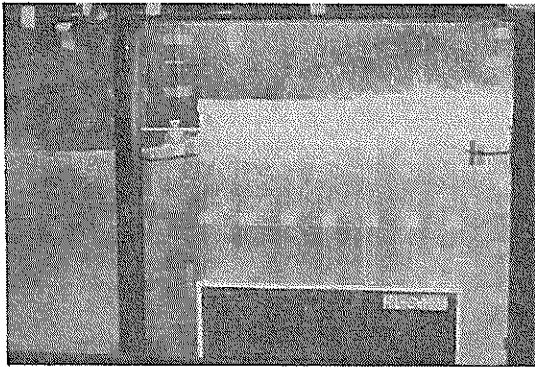
(1)



(2)



(3)



(4)

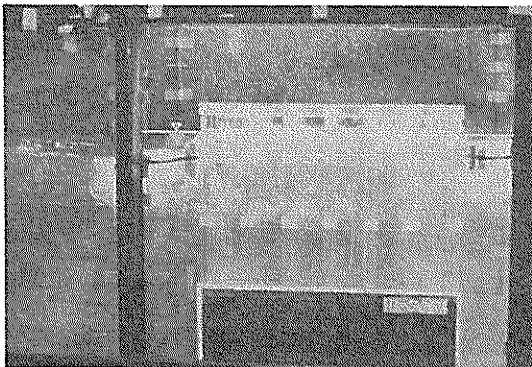


写真-4 水平板付立体骨組構造の透過状況

圧である  $p_{CBP}$  は  $p_{CFP}$  の正のピーク時より約  $0.4T$  経過後に正のピークとなっているが、その値は小さい。負のピーク値は  $p_{CFP}$  と異なり正のピーク値よりも小さい。

水平板上面に作用する平均波圧  $p_{HBV}$  は水平板上に波が打ち込むため比較的急な変化を示しており、正圧時が作用時間的にも、そのピーク値の大きさにおいても卓越している。符号の定義により正、負は逆になっているけれども、 $f_{FZT}$  と  $p_{HBV}$  はほぼ同じ波形変化を示しており、前述の水平板構造と同様に水平板下面の平均波圧  $p_{HBD}$  は基部ケーソン上面の平均波圧と位相および大きさがほぼ一致していることが推定できる。一方、 $p_{HBD}$  は静的な変化を示し、負のピーク値のほうが正のピーク値より大きい。両者の差圧から求まる水平板の平均鉛直波力  $f_{HBT}$  のピーク値は正、負ともほぼ等しいが、作用時間では負圧時が卓越している。また、正および負のピーク時は  $p_{CFP}$  と時間的にはほぼ一致している。

### (3) 上部構造に作用する全波力

図-25(1)、(2)はそれぞれ平均鉛直波力  $f_{FZT}$  の正、負のピーク値とそのピーク時における平均水平波力  $f_{FXT}$  の値を示したものである。

$f_{FZT}$  の変化は前述したように  $p_{HBV}$  の変化に支配されており、これの正のピーク値は水平板上の水位が最も低下するときが発生する。水平板上の水深  $d'$  は  $7.5\text{cm}$  であり、最大でも  $7.5\text{gf/cm}^2$  に制限されるため、 $f_{FZT}$  の正のピーク値は波高の大小によらずほぼ一定となっている。周期の変化に対しては周期の長い波ほど若干大きい。一方、負のピーク値は波高とともに大きくなり、かつ周期の長い波ほど大きい。図-25(2)では  $f_{FZT}$  が正のピーク時における  $f_{FXT}$  の値を黒印、負のピーク時における値を白印で示している。 $f_{FZT}$  の正のピーク時には  $f_{FXT}$  はほぼ0であり、図-24に示して  $T = 2.12\text{s}$ 、 $H = 30\text{cm}$  の波力波形の例で述べたことが、一般的に成立している。一方、 $f_{FZT}$  の負のピーク時には特に周期の長い波の場合水平力が同時に作用している。データを包絡する値として  $0.14w_0H$  程度である。

図-26(1)、(2)は  $f_{FXT}$  の正、負のピーク値と、そのピーク時における  $f_{FZT}$  を示したものである。 $f_{FXT}$  は立体骨組部材に作用する波力に起因するものであり、波高の2乗に比例する抗力が卓越すると考えられる。しかし、 $f_{FXT}$  の正のピーク値についてこの傾向は若干見られるもののそれほど顕著ではない。値は周期の長い波ほど大きく最大で  $0.20w_0H$  である。一方、 $f_{FXT}$  の負のピーク値は波高が大きくなるにつれ一定値に近づく傾向を示しており、その値も小さい。また、周期の違いによる影響もそれほど顕著ではない。

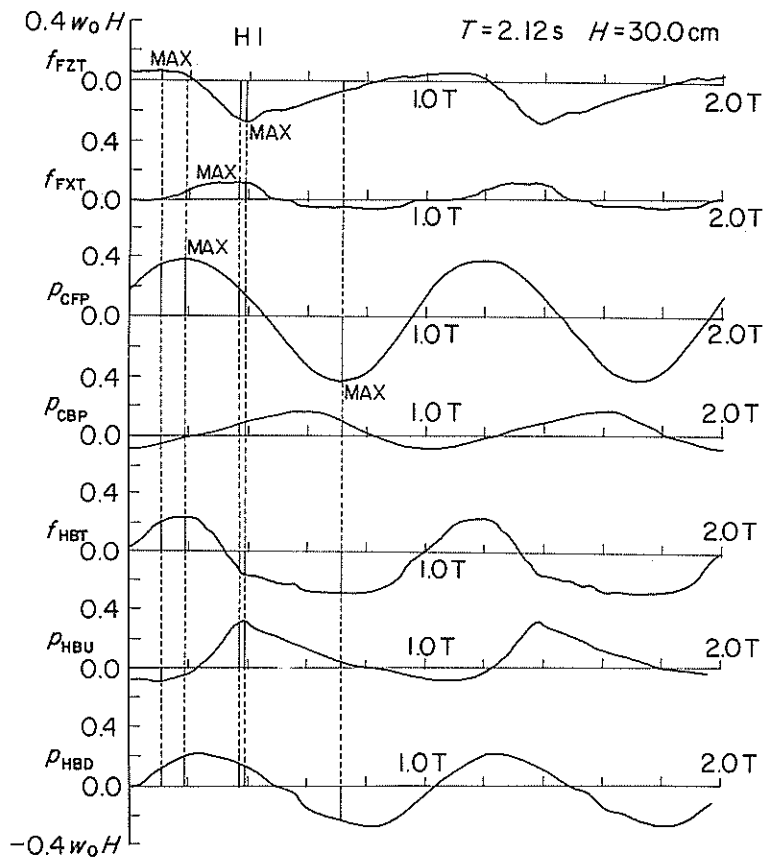


図-24 水平板付立体骨組構造の波力波形

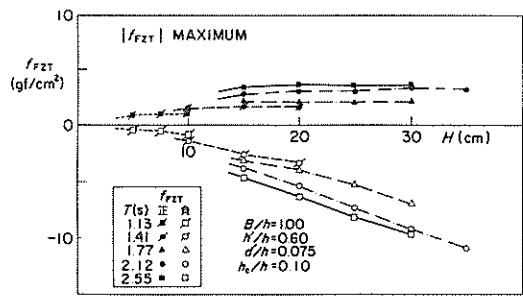


図-25(1)  $f_{FZT}$  のピーク値

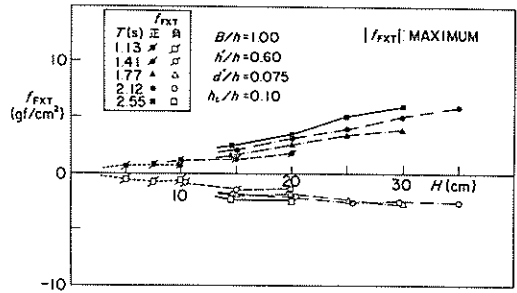


図-26(1)  $f_{FXT}$  のピーク値

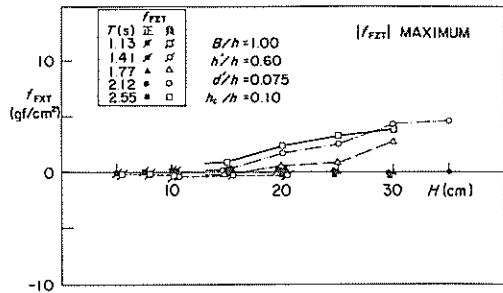


図-25(2)  $f_{FXT}$  ( $f_{FZT}$  のピーク時)

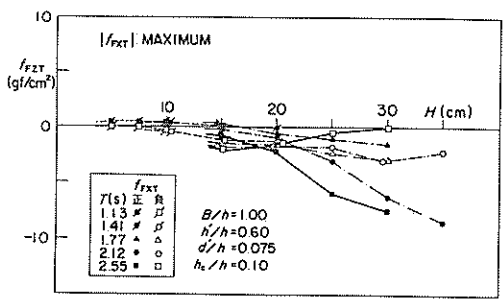


図-26(2)  $f_{FZT}$  ( $f_{FXT}$  のピーク時)

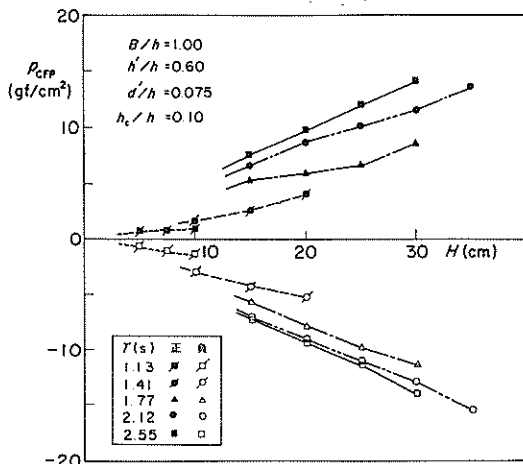


図-27 基部ケーソン前面に作用する波圧

$f_{FXT}$  の正、負のピーク時における  $f_{FZT}$  の値は一部を除いてともに負となっている。すなわち、上部構造に作用する水平波力が波の進行方向(押し波時)、逆方向(引き波時)のどちら向きにピーク値をとろうとも上部構造を押しさえ付けようとする波力が作用していることがわかる。この傾向は長周期で波高の大きい波ほど顕著である。

(4) 基部ケーソンに作用する波力

図-27 は基部ケーソン前面の波圧  $p_{CFP}$  のピーク値を示したものであり、正、負のピーク値とも波高にはほぼ比例して増大している。さらに周期の影響が顕著であり、周期の長い波ほど大きい。  $T = 2.55$  s の波では正、負のピーク値はそれぞれ  $0.49w_0H$ 、 $-0.47w_0H$  で、ほぼ等しいが周期の短い波では負のピーク値のほうがやや大きい傾向にある。

基部ケーソン後面の波圧  $p_{CBP}$  は  $p_{CFP}$  に比べて小さく、  $T = 2.55$  s の波に対する正負のピーク値はそれぞれ  $0.24w_0H$ 、 $-0.6w_0H$  である。

(5) 水平板に作用する波力

図-28 は水平板に作用する平均鉛直波力  $f_{HBT}$  のピーク値を示すものである。正のピーク値は波高の増大とともに大きくなり、かつ長周期の波ほど大きくなる傾向を示す。  $T = 2.12$  s の波に対しては  $0.30w_0H$  程度である。負のピーク値も波高の増大とともに大きくなっているが、周期の違いによる差はない。平均値は  $-0.30w_0H$  程度である。

図-29 は水平板に作用する平均鉛直波力のピーク値が立体骨組部材の有無によってどう異なるか、立体骨組部材のない場合すなわち水平板構造の  $f_{H2T}$  と、水平板付立体骨組構造の  $f_{HBT}$  の相関を示したものである。  $f_{H2T}$  は

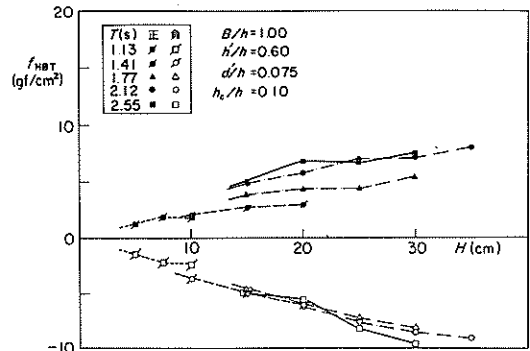


図-28 水平板に作用する平均波力

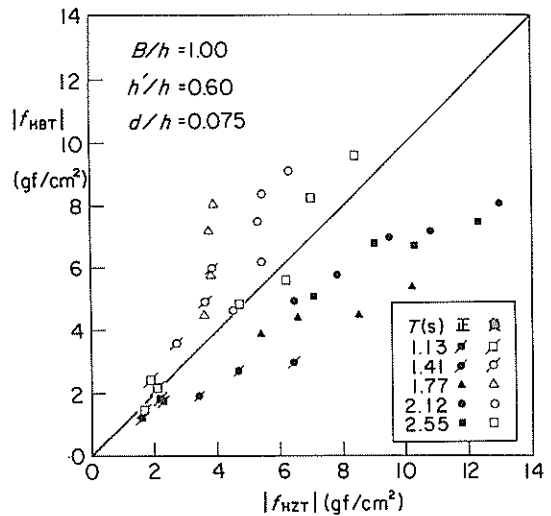


図-29  $f_{H2T}$  と  $f_{HBT}$  の相関

$d'/h = 0.05$  あるいは  $0.0$  における値と  $d'/h = 0.10$  における値から補間して求めたものである。負の値に関しては絶対値で表示している。同図に示すように正すなわち水平板を押し上げる波力のピーク値については、 $f_{H2T}$  すなわち立体骨組部材がない場合が大きい。一方、負のピーク値については逆に  $f_{HBT}$  すなわち水平板付立体骨組構造が大きいことがわかる。これは、水平板の設置水深は一致していないが前出の波力波形図(図-15、図-24)より次の理由によると考えられる。まず、正のピーク時は両構造とも引き波時から押し波時に変化するときに対応しており、水平板上面での水位は静水位より低いままである。したがって、このときの水平板上面での圧力は負圧となっているが、この圧力は水平板構造のほうが大きい。また、水平板下面に作用する圧力は正であり、これも水平板構造のほうが大きく、結果として骨組部材のないほうが水平板に作用する正のピーク値は大きくなる。一方、負のピーク時は引き波時に対応し、水平板下面の

閉塞領域では負圧となっている。この圧力は水平板構造、水平板付立体骨組構造ともほぼ同じ大きさであるが、水平板上面では水平板構造が負圧となっているのに対し、水平板付立体骨組構造では正圧のままである。水平板上面の負圧のピーク値を比較しても水平板付立体骨組構造のほうが小さい。この結果、水平板に作用する負のピーク値は水平板付立体骨組構造のほうが大きくなる。このような波圧の違いは立体骨組部材の有無に起因するものであり、骨組部材の効果として次のことが指摘できる。すなわち、引き波時に水平板上面における水塊の流出が妨げられることにより、水平板上での滞水効果を有する。このことは押し波時に波の打ち込みによって生じる水平板への衝撃波圧の減少にも寄与する。

#### (6) 立体骨組部材に作用する波力

立体骨組部材に作用する波力の例として比較的作用波力の大きい水平板上に位置する部材について示す。図-30～32は最前列の部材FV1, FH1, FU1(図-10参照)に作用する平均波力のピーク値を示すものである。FV1は直立円柱部材であり波の進行方向に作用する波力を正としている。FH1, FU1は水平に置かれた角柱部材で、それぞれ水平波力および鉛直波力を測定しており、FH1については波の進行方向、FU1については鉛直上向きを正としている。また、図-33～35は最後列の部材BV1, BH1, BU1に対する同様な図である。

$f_{FV1}$ の正のピーク値は波高の増大とともに大きくなっており、周期の長い波ほど大きくなる傾向にある。実験データを包絡する値は $0.45w_0H$ である。一方、負のピーク値は一般に小さく、最大でも約 $-0.06w_0H$ である。負のピーク値は引き波時、水平板上を前方へ水塊が流出するときに発生するが、このとき部材FV1は完全に没水しているのではなく、部材の下部のみに流出する水塊の圧力が作用する。波力の算定では部材全体の投影面積に作用する平均波力として求めているため、実際に波力を受ける部分ではここに示したピーク値より大きな波力を受けていると考えられる。

部材FH1は空中に露出しており、波の進行方向に作用する波力のみを受けるため、図-31には $f_{FH1}$ の正のピーク値のみを示している。 $T=2.55$ s,  $H=25$ cmで大きな波力となっており、 $0.44w_0H$ である。

部材FU1も空中に露出した部材であり、波面の到達と同時に上向きの正の波力が作用し、直後に水塊が落下するため上から下へ作用する負の波力が働く。図-32に示す $f_{FU1}$ の正のピーク値は最大で $0.12w_0H$ であり、負のピーク値は最大で $-0.28w_0H$ である。負の波力すなわち部材を上から下へ押す波力が卓越している。

一方、最後列の骨組部材に作用する波力のピーク値は以下のものである。

図-33に示す $f_{BV1}$ の正のピーク値は周期の違いによるばらつきはあるが、波高が20～25cmまでは波高の増大とともに大きくなっている。しかし、波高が25cm以上では逆に多少減少する傾向にある。これは水平板の後端から前方へ逆行しようとする波により、部材の背後にも波力を受けるためと推測される。負のピーク値は波高が15cm程度より大きい条件では波高によらずほぼ一定の値となり、かつ波力も小さい。 $f_{FV1}$ と比較すると負の

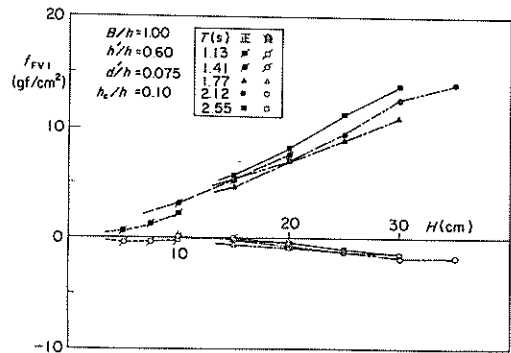


図-30  $f_{FV1}$ のピーク値

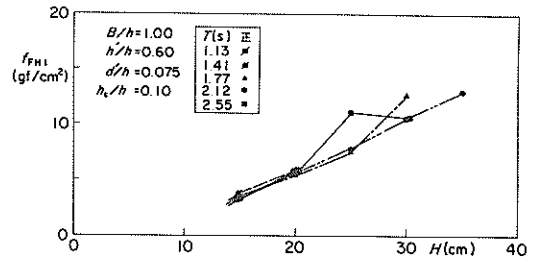


図-31  $f_{FH1}$ のピーク値

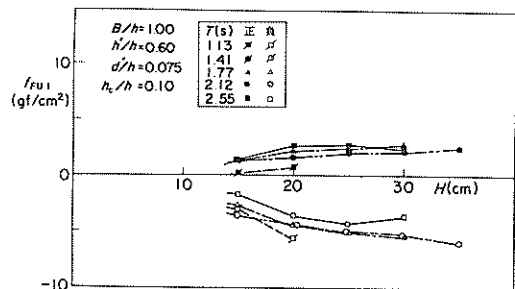


図-32  $f_{FU1}$ のピーク値

ピーク値が若干大きい、正のピーク値は特に波高の大きい条件で  $f_{FV1}$  より小さくなっている。

部材 BH1 は最後列の最上段に位置する水平角柱部材であり、これに作用する水平波力  $f_{BH1}$  は  $f_{FH1}$  と同様に波の進行方向のみに作用する。波の入射時には水平板の後端においても水位が上昇し、水平板上を逆行する流れが発生するが、目視観測や  $f_{BH1}$  の波形図より当部材にはこの流れはあたっていないことを確認した。したがって、図-34 には正のピーク値のみを示している。これによると  $f_{BH1}$  は  $T = 2.55$  s,  $H = 30$  cm の条件を除いて波高

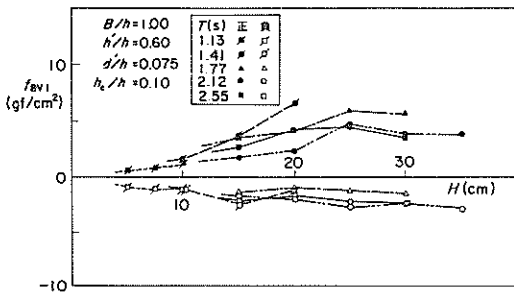


図-33  $f_{BV1}$  のピーク値

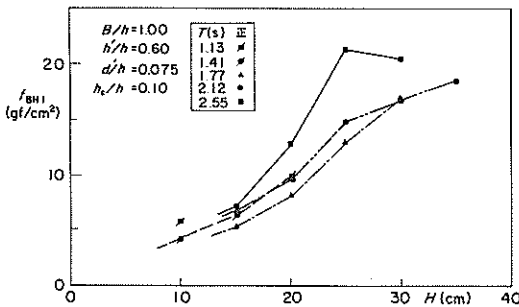


図-34  $f_{BH1}$  のピーク値

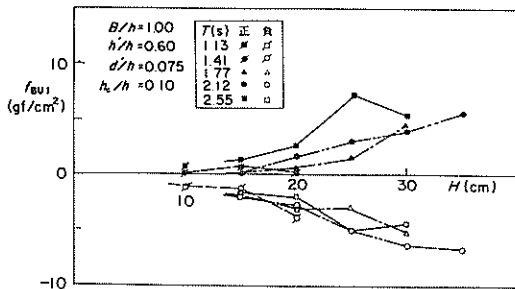


図-35  $f_{BU1}$  のピーク値

の増大とともに比較的急激に増加していることがわかる。特に長周期の波ほどピーク値は大きくなっている。最大波力は  $0.86 w_0 H$  である。この  $f_{BH1}$  のピーク値は  $f_{FH1}$  より全般的に大きい、これは、水平板上に打ち込んで進行する流れと水平板上を逆行する流れの衝突地点が水平板後端より若干前方であり、衝突した水塊が勢いよく最後列の水平部材に打ちあたるためである。前出の写真-4(3)がこの状態に対応する。水平部材 BU1 に作用する鉛直波力  $f_{BU1}$  は図-35 に示すように周期によって若干異なる変化を示しており、正、負のピーク値の最大はそれぞれ  $0.29 w_0 H$ ,  $-0.21 w_0 H$  程度である。 $f_{BU1}$  も  $f_{FU1}$  と同様に波が打ちあたる瞬間には正、すなわち部材を持ち上げる波力が作用し、その直後に負すなわち部材を押し下げる波力に変化する。

以上、立体骨組部材のうち作用する波力が大きい部材についてその作用波力のピーク値を示したが、他の波圧測定用部材の結果を以下にまとめて示す。これらの値は実験データをはば包絡する負および正のピーク値であり、全般に作用波力は小さい。

$$f_{FV2} = -0.12 \sim 0.07 w_0 H$$

$$f_{FV3} = -0.10 \sim 0.05 w_0 H$$

$$f_{FH2} = -0.11 \sim 0.04 w_0 H$$

$$f_{FU2} = -0.03 \sim 0.10 w_0 H$$

$$f_{BV2} = -0.03 \sim 0.08 w_0 H$$

$$f_{BV3} = -0.17 \sim 0.14 w_0 H$$

$$f_{BH2} = -0.12 \sim 0.06 w_0 H$$

$$f_{BU2} = -0.02 \sim 0.07 w_0 H$$

#### (7) 同時波力分布

図-36(1)~(4)は  $T = 2.12$  s,  $H = 30$  cm の波が当構造に作用したときの水平板上面、同下面および基部ケーソン前面、後面の同時波力分布を示すものである。基部ケーソンの上面および底面、立体骨組部材に作用する波力は示していない。これらは前出の図-24 に示す波力波形の MAX で表示した位相に対応する。

図-36(1)は  $f_{F2T}$  の正のピーク時に対応するものであり、水平板上での水位が全体に低下し、一様な負圧分布が生じている。水平板下面では前端で正、後端で負の圧力分布を示している。このことより、このときは堤前で水位が上昇しはじめたときであることがわかる。

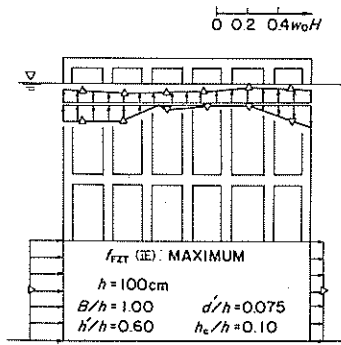


図-36(1) 同時波力分布 ( $f_{FZT}$  (正) ピーク時)

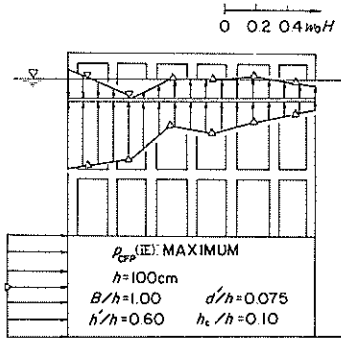


図-36(2) 同時波力分布 ( $p_{CFP}$  (正) ピーク時)

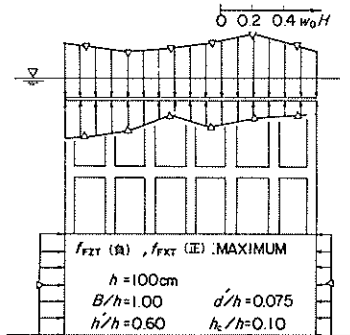


図-36(3) 同時波力分布 ( $f_{FZT}$  (負) ピーク時)

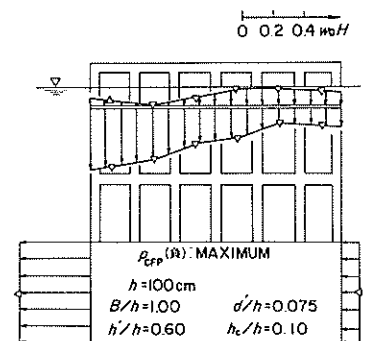


図-36(4) 同時波力分布 ( $p_{CFP}$  (負) ピーク時)

図-36(2)は $p_{CFP}$ の正のピーク時におけるものであり、水平板の平均鉛直波力 $f_{HBT}$ の正のピーク時と一致する。水平板上面の前端では水塊が板上に乗りあげるため正の波圧となっているが、後端では水位が低下したままであり負圧となっている。水平板下面では全面にわたり正の波圧となり、前端で大きく後端で小さい台形分布を示している。基部ケーソン後面の波圧は0であり、堤体の後端での水位はほぼ静水位であることがわかる。

図-36(3)は $f_{FZT}$ の負のピーク時に対応し、 $f_{FXT}$ の正のピーク時とはほぼ一致している。水平板上面では全面にわたり水位が静水面より上昇し、水平板上面にはほぼ一様に正の波圧が作用している。堤体直前では水位が低下し始めるため基部ケーソン前面波圧、水平板下面前端における波圧も小さくなっているが、堤体直後では水位が上昇するため基部ケーソン後面では正の波圧が作用している。

図-36(4)は $p_{CFP}$ の負のピーク時に対応するものであり、堤体前面での水位が大きく低下し、水平板上および水平板下の水塊が前方へ流出するときである。水平板下面では前端で大きく後端で小さい負の圧力分布を示している。基部ケーソン後面の波圧は正であり、堤体後端では水位が静水位より高いことがわかる。

### 4.3 上部半円形断面構造

#### (1) 波の作用状況

写真-5は本構造への波の作用状況を示すものである。このときの入射波は $T = 2.12$  s,  $H = 30$  cmである。

写真-5(2)および(3)は天端上を越波する状況であり、堤体直前で大きく水位が上昇したのち、越波水は勢よく曲面壁を伝って落ち込んでいることがわかる。引き波時には堤体前面では大きく水位が低下しているが、後面ではそれほど大きな水位の低下は生じていない。このため通水部を通過して前方に向かう流れが生じている。

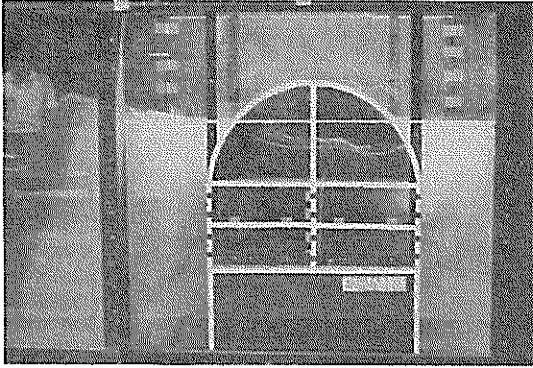
#### (2) 波力波形の時間変化

当構造に作用する波力波形の時間変化を図-37に示す。同図は $T = 2.12$  s,  $H = 30$  cmの波が作用したときのものである。

押し波時には堤体直前での水位が上昇するため、基部ケーソン前面の波圧 $p_{CFP}$ が正のピークに達し、続いて水塊が越波を開始したときに上部構造平均水平波力 $f_{FXT}$ が最大となる。その後、水塊が上部半円形部の曲面壁を押し付けるとして越波するため平均鉛直波力 $f_{FZT}$ が負のピークに達する。続いて、越波水により堤体背後の水位が上昇するため基部ケーソン後面の波圧 $p_{CBP}$ が正のピークとなっている。引き波時には、 $p_{CFP}$ の負のピーク値が正のピーク値よりも大きくなり、このピーク時



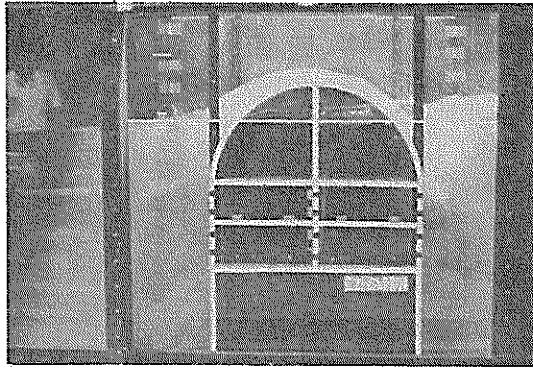
(1)



(2)



(3)



(4)

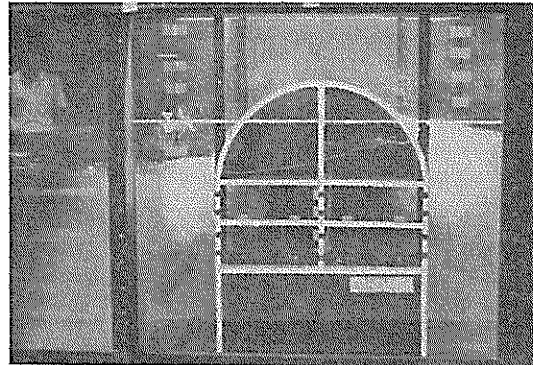


写真-5 上部半円形断面構造の透過状況

とはほぼ同時に  $f_{FXT}$  も負のピーク値をとっている。このとき  $f_{FZT}$  はほぼ 0 である。

$f_{CRZ}$  および  $f_{CRX}$  は半円型上部構造の曲面壁に設けた 7 個の波圧計が測定する波圧の鉛直方向および水平方向成分の和より求めた、上部半円形部のそれぞれの投影面積に作用する平均鉛直波力および平均水平波力である。 $f_{CRZ}$  は鉛直上向、 $f_{CRX}$  は波の進行方向を正としている。 $f_{CRZ}$  については通水部に面する上部半円形部の底面に作用する波力は考えておらず、これと  $f_{FZT}$  を比較すると、両者はほぼ同じ波形変化を示していることがわかる。このことは、上部半円形部の曲面壁に作用する波圧の鉛直方向波力がそのまま上部構造全体の鉛直方向波力になり、通水部内において発生する鉛直方向波力は互いに打ち消しあい、全体の波力には寄与していないことを意味する。これは水平板構造や水平板付立体骨組構造においても見られた現象であり、上面を拘束された通水部を有する構造の特徴と言える。 $f_{CRX}$  の正のピーク時は  $f_{FXT}$  の正のピーク時と一致し、かつそのときの波力も大きく、 $f_{FXT}$  に対して  $f_{CRX}$  が支配的であることがわかる。引き波時には  $f_{CRX}$  は  $f_{FXT}$  より小さく、通水部における鉛直透過壁に作用する水平波力が大きいことが推測される。

通水部の上面（上部半円形部底面）および下面（基部ケーソン上面）に作用する波圧  $p_{SPU}$  および  $p_{SPD}$  はほぼ同じ波形変化を示しており、前述したことを証明している。 $p_{SPU}$ 、 $p_{SPD}$  とも作用時間的には正の波圧が卓越しているが、その大きさでは負の波圧が卓越している。

### (3) 上部構造に作用する全波力

図-38(1)、(2)は当構造の上部構造に作用する平均鉛直波力  $f_{FZT}$  とそのピーク時における平均水平波力  $f_{FXT}$  を示したものである。 $f_{FZT}$  の正のピーク値は前出の波形図において示したように、非常に小さく、最大でも  $0.06w_0H$  程度である。しかし、負のピーク値は高波とともにほぼ直線的に増加している。周期の違いによるピーク値の違いは小さく、最大で  $-0.30w_0H$  である。 $f_{FZT}$  の正のピーク値は非常に小さいため、図-38(2)には  $f_{FZT}$  が負のピーク時における  $f_{FXT}$  のみを示している。この  $f_{FXT}$  は周期によって異っており、周期の長い波ほど大きく、最大で約  $0.42w_0H$  である。

図-39(1)、(2)は  $f_{FXT}$  のピーク値と、 $f_{FZT}$  のピーク時における  $f_{FZT}$  を示したものである。 $f_{FXT}$  の正のピーク値は周期の違いによる差が顕著であり、周期の長い波ほど大きい。波高の増大に対しては線形的に大きくなっており、最も周期の長い波に対しては  $0.49w_0H$  程度の平均水平波力が作用している。負のピーク値に対しては周期の影響はほとんどなく、波高に対してのみ線形的に変化

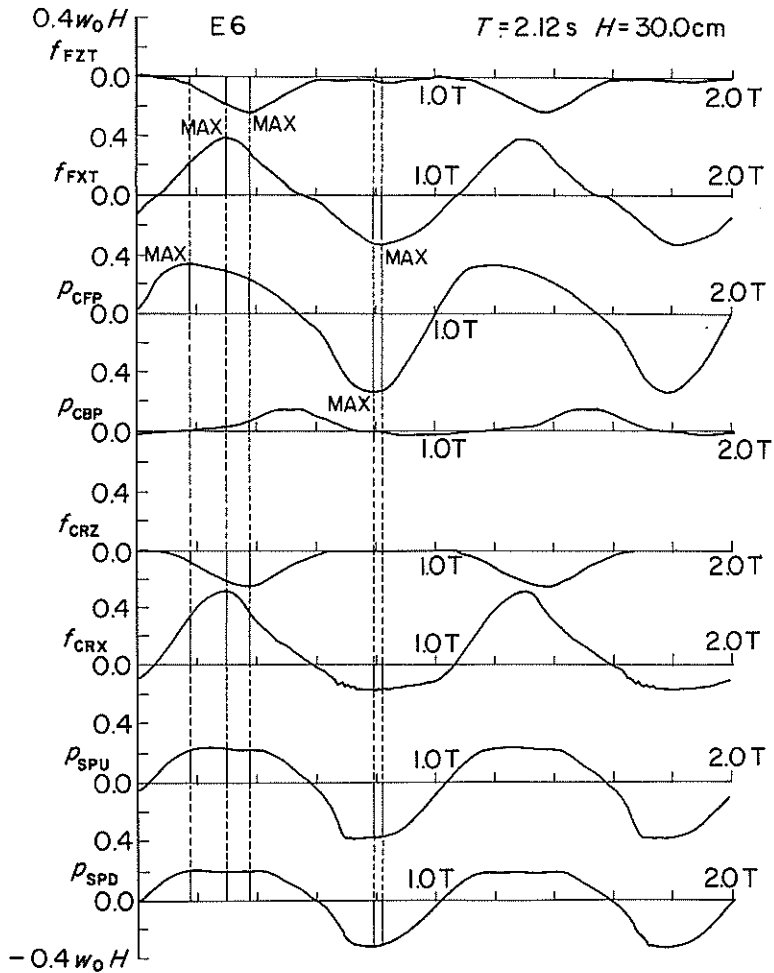


図-37 上部半円形断面構造の波力波形

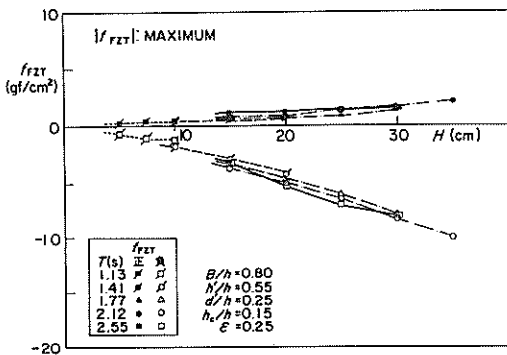


図-38(1)  $f_{FZT}$  のピーク値

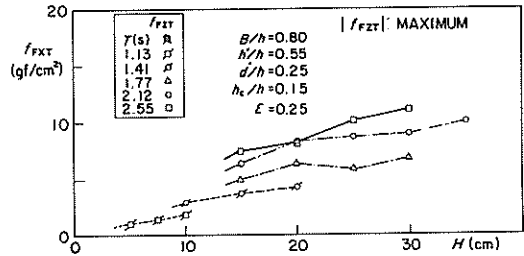


図-38(2)  $f_{FXT}$  ( $f_{FZT}$  の負のピーク時)

しており、 $-0.37w_0H$ 程度である。

図-39(2)に示す $f_{FXT}$ が正のピーク時における $f_{FZT}$ はすべて負の値となり、上部構造に最大の水平力が作用したときに堤体を押さえつける波力が作用することがわかる。これは滑動安定性に対して好都合な特徴である。こ

のときの  $f_{FZT}$  は周期の影響は小さく、 $-0.21w_0 H$  程度である。 $f_{FXT}$  の負のピーク時には  $f_{FZT}$  は小さい。

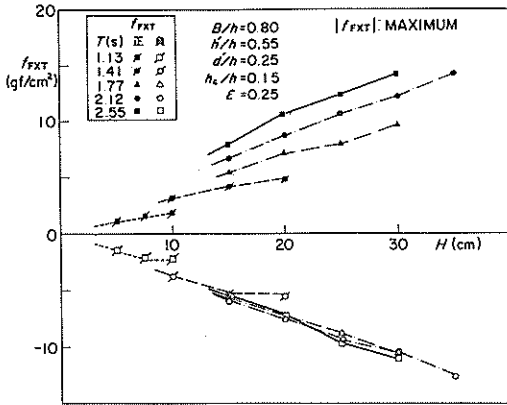


図-39(1)  $f_{FXT}$  のピーク値

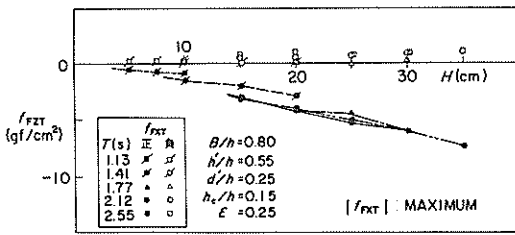


図-39(2)  $f_{FZT}$  ( $f_{FXT}$  のピーク時)

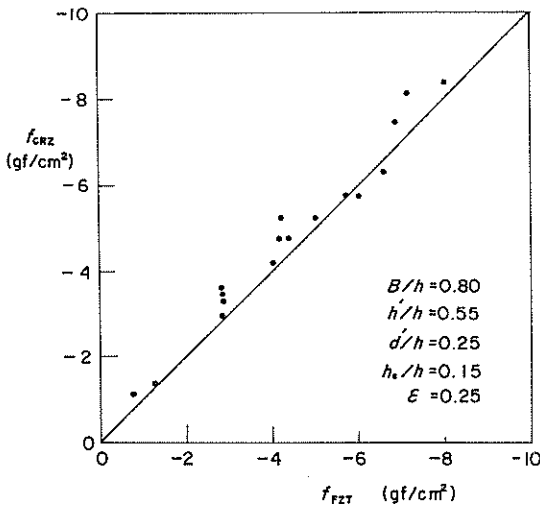


図-40  $f_{FZT}$  と  $f_{CRZ}$  の相関

図-40は  $f_{FZT}$  と  $f_{CRZ}$  の負のピーク値の相関を示したものである。前出の図-37に示した波形図で  $f_{FZT}$  と  $f_{CRZ}$  の波形がほぼ一致することを示したが、他の波浪条件についてもその負のピーク値を比較してみる。同図に示すように両者はほぼ一致しており、上部構造に作用する鉛直波力は一般的に上半円形部の曲面壁に作用する波力に起因していることがわかる。また、 $f_{FZT}$  の負のピーク値が周期に大きく影響されないことは前述したが、これより  $f_{CRZ}$  の負のピーク値も周期の違いによる影響は小さいと言える。

図-41は上半円形部に作用する平均水平波力  $f_{CRX}$  のピーク値を示すものである。押し波時に発生する正のピーク値は周期の長い波ほど大きくなる傾向にあり、2.12 s の波に対して  $0.50w_0 H$  程度の波力が作用している。波高が大きくなるとその増加率は小さくなっている。これは波高が大きい波ほど水位は上半円形部の頂部まで上昇し越波を生じやすくなるが、頂部に作用する水平方向の波力はほとんど0に近くなるため波高の増加ほど水平波力は増加しないことによる。 $f_{CRX}$  を通水部の透過壁に作用する水平波力を含めた平均水平波力である  $f_{FXT}$  (図-39(1))と比較すると  $f_{CRX}$  のほうが全般に大きく、 $f_{FXT}$  に対しては  $f_{CRX}$  が支配的であることがわかる。一方、引き波時に発生する負のピーク値については周期の影響は小さく、波高の増大とともに一定値に近づく傾向にある。引き波時では堤体後面での水位の低下は小さく、堤体前面での水位の低下によって生じる静圧的な波力がほとんどである。このため、半円形上部構造が受ける平均水平波力は最大でも  $-d'^2 w_0 / (2R)$  (当構造では  $-7.8 \text{ gf/cm}^2$ ) となり、ほぼこの値に漸

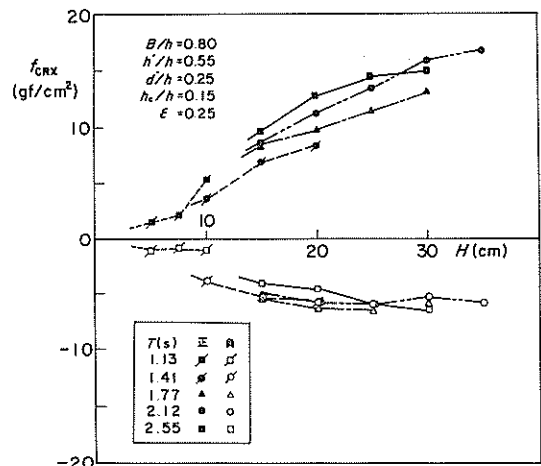


図-41  $f_{CRX}$  のピーク値

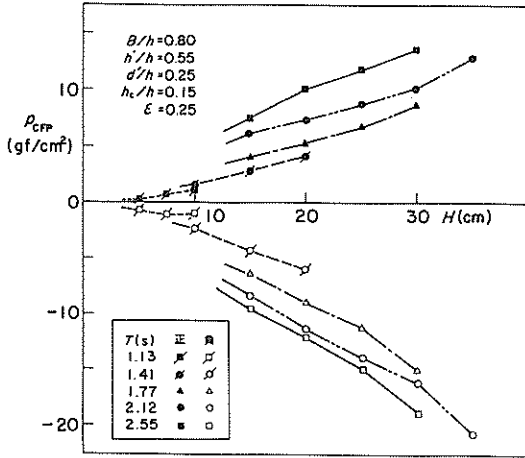


図-42 基部ケーソン前面に作用する波圧

近している。 $f_{FXT}$ の負のピーク値と比べると、正の場合とは逆に全般に $f_{FXT}$ より小さい。したがって引き波時における $f_{FXT}$ に対しては通水部の透過壁に作用する水平波力が支配的であり $f_{CRX}$ は支配的でないことがわかる。

(4) 基部ケーソンに作用する波圧

図-42は基部ケーソン前面の波圧 $p_{CFP}$ のピーク値を示したものである。正、負のピーク値ともほぼ波高に比例して増大しており、周期の違いによる影響も顕著であり、周期の長い波ほど大きい傾向にある。 $T=2.55s$ の波に対する正、負のピーク値は、それぞれ $0.48w_0H$ 、 $-0.62w_0H$ 程度であり、負のピーク値がはるかに大きい。他の周期においてもこの傾向がみられる。

一方、基部ケーソン後面に作用する波圧 $p_{CBP}$ の正のピーク値は、周期が長く波高の大きい波に対しては越波を生じるため若干大きい、波高の小さい波あるいは周期の短い波に対しては小さい。 $T=2.55s$ 、 $H=30cm$ の波に対して $0.19w_0H$ である。負のピーク値についてはすべての波の条件に対して小さく、 $-0.10w_0H$ 以下である。

(5) 通水部に作用する波力

通水部は上部半円形部の底面および基部ケーソンの上面で拘束され、しかもその中央に1枚の水平板を挿入しており、上下二段の中空部となっている。このような中空部では、前述したように上面および下面に作用する波圧がほぼ同位相、同振幅で変化し全体の安定に関しては互いに打ち消しあう。しかし、部材設計にとってはこうした波圧も必要でありその大きさを知ることが重要である。そこで、上部半円形部の底面に作用する平均波圧 $p_{SPU}$ および基部ケーソン上面に作用する平均波圧 $p_{SPD}$

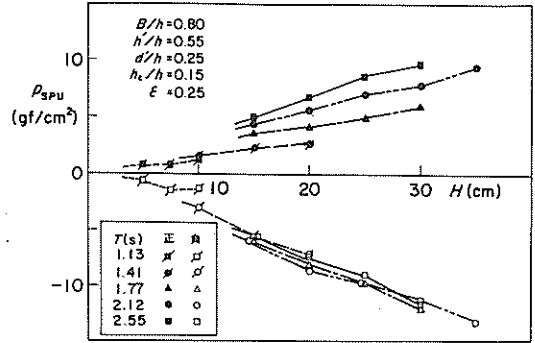


図-43  $p_{SPU}$ のピーク値

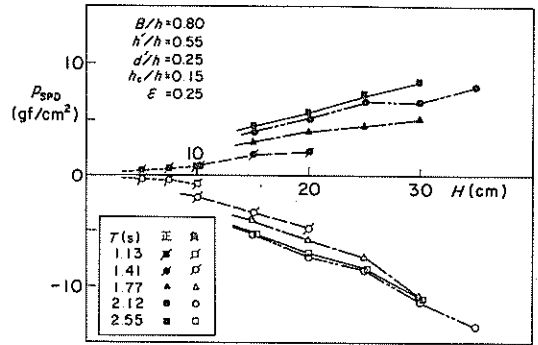


図-44  $p_{SPD}$ のピーク値

のピーク値をそれぞれ図-43、44に示す。 $p_{SPU}$ および $p_{SPD}$ の正、負のピーク値とも波高の増大とともにほぼ線形的に増大している。正のピーク値については周期の違いによる差も顕著であり長周期の波ほど大きい、負のピーク値については周期の影響はない。データをほぼ包絡する正および負のピーク値は $p_{SPU}$ で $0.33w_0H$ 、 $-0.42w_0H$ 、 $p_{SPD}$ で $0.23w_0H$ 、 $-0.31w_0H$ であり、 $p_{SPD}$ のほうが若干小さい。

通水部中央の水平板については、上面および下面に働く波圧がほぼ同位相で変動していると考えられるため、両者の差である波力は小さく、 $\pm 0.1w_0H$ の範囲内である。

次に、通水部の鉛直透過壁に作用する平均波力を示す。図-45、46は、それぞれ6枚の鉛直透過壁のなかで比較的大きい波力をうける部材HS1およびHS5(図-11参照)に作用する波力のピーク値を示しており、両者とも波の進行方向に作用する波力を正としている。 $f_{HS1}$ 、 $f_{HS5}$ とも $p_{SPU}$ や $p_{SPD}$ と同様に正のピーク値では長周期の波ほど大きくなり、最大で $f_{HS1}$ が $0.18w_0H$ 、 $f_{HS5}$ が $0.11w_0H$

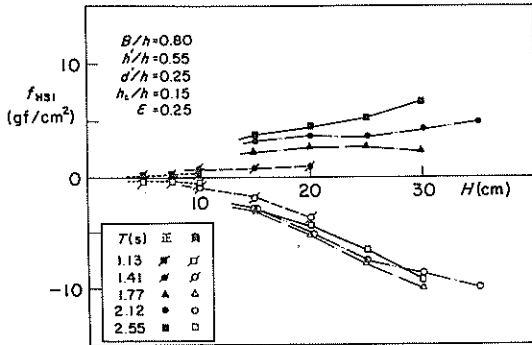


図-45  $f_{HS1}$  のピーク値

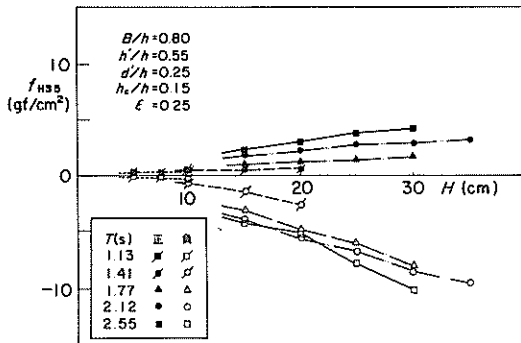


図-46  $f_{HS5}$  のピーク値

程度である。 $f_{HS1}$  すなわち堤体前面における透過壁が受ける波力のほうが大きい。一方、負のピーク値については、周期の違いによる影響は小さいが、波高の増大とともに比較的急激に増大している。これは堤体背後へ越波した水塊が通水部を通り前方へ流れるために押し波時より大きい流速が発生し、透過壁部材に波高の2乗に比例する抗力が作用するためである。このときの流速は堤体前側の透過壁および後側の透過壁でほぼ同じであり、波力のピーク値もほぼ同じとなる。

(6) 同時波力分布

同時波力分布の例として、 $T = 2.12$  s,  $H = 30$  cmの波が作用したときの分布を図-47(1)~(4)に示す。これらは順に図-37の波力波形図においてMAXで表示した $p_{CFP}$ の正のピーク時、 $f_{FXT}$ の正のピーク時、 $f_{FZT}$ の負のピーク時、および $f_{FXT}$ の負のピーク時に対応する。 $f_{FXT}$ の負のピーク時は $p_{CFP}$ の負のピーク時と一致している。なお、図中には通水部水平板に作用する波圧、基

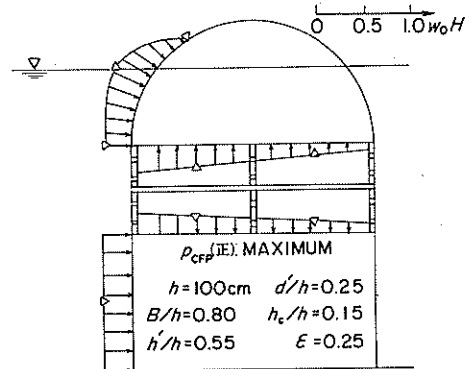


図-47(1) 同時波力分布 ( $p_{CFP}$  (正) ピーク時)

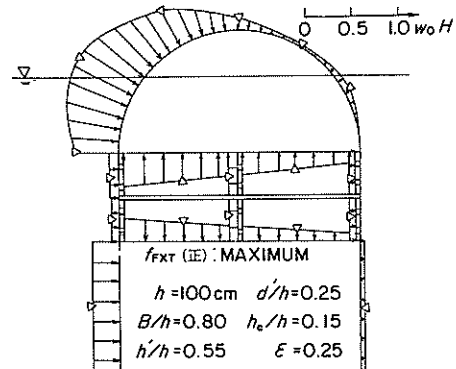


図-47(2) 同時波力分布 ( $f_{FXT}$  (正) ピーク時)

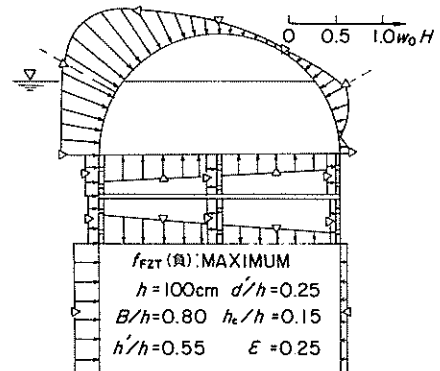


図-47(3) 同時波力分布 ( $f_{FZT}$  (負) ピーク時)

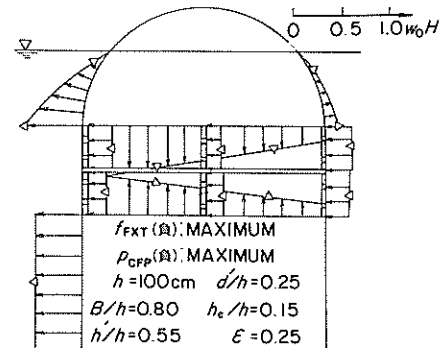


図-47(4) 同時波力分布 ( $f_{FXT}$  (負),  $p_{CFP}$  (負) ピーク時)

図-47(1)に示す $p_{CFP}$ の正のピーク時は堤体前面の水位が静水位より上にあるが越波は生じていない状態である。通水部内では上部半円形部の底面や基部ケーソン上面に正の波圧が作用しているが、このときの透過壁に働く波力は0である。

続いて、水位が上昇し図-47(2)に示す $f_{FXT}$ の正のピーク時となる。このときは上部半円形部に作用する平均水平波力 $f_{CRX}$ のピーク時とも一致し、越波を生じている。上部半円形部の曲面壁上の波圧は水平方向分力が大きい分布を示している。また、このときには通水部の透過壁にも正の水平波力が作用している。

さらに越波が進むにつれ、図-47(3)に示す $f_{FZT}$ の負のピーク時に達する。このときは上部半円形部の後面側の曲面壁に作用する波圧が大きくなっており、また堤体背後における水位が若干高くなるため、基部ケーソン後面にも正の波圧が作用している。

図-47(4)に示す $f_{FXT}$ の負のピーク時は引き波時に対応し、堤体直前での水位が大きく低下している状態である。通水部内では上部半円形部底面および基部ケーソン上面とも前端で大きく後端で小さい台形状の負圧分布となっており、鉛直透過壁にも比較的大きな負の波力が生じている。

#### 4.4 透過壁式二重セル構造

##### (1) 波の作用状況

写真-6は $T=2.37s$ ,  $H=30cm$ の波の作用状況を示すものである。

引き波時に堤体前面で滑を生じて乱れているところに波が来襲し、水位が低下している遊水室内へ気泡もろとも流入している(写真-6(1), (2))。流入した水塊は左右にわかれ内部の不透過セルのまわりを進行し、後側の透過セルより堤体背後へ流出している(写真-6(3))。引き波時(写真-6(4))には堤体後端での水位はほぼ静水面付近であるのに対し、堤体前端では大きく低下し遊水室内より勢いよく流出している。このときは遊水室内の水位も前端部で大きく低下している。

##### (2) 波力波形の時間変化

図-48は当構造に作用する波力波形の例を示すものである。このときの入射波の条件は写真-6に作用状況を示した波と同じである。

波の来襲時に堤体前面での水位が上昇し、基部ケーソン前面での波圧 $p_{CFP}$ が正のピーク値をとったのち、上部構造に作用する平均水平波力 $f_{FXT}$ が正のピークとなる。その後、遊水室内に多量の水塊が流入するため平均鉛直波力 $f_{FZT}$ が負のピークとなる。引き波時には、堤体前面での水位が低下するため $p_{CFP}$ が負のピークとなり、ほぼ同時に

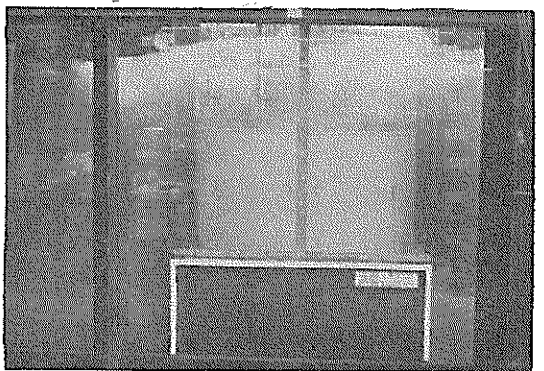
(1)



(2)



(3)



(4)

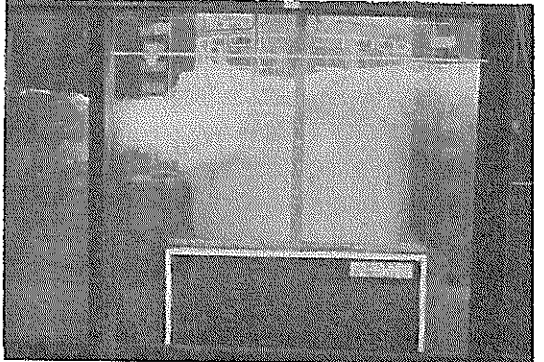


写真-6 透過壁式二重セル構造の透過状況

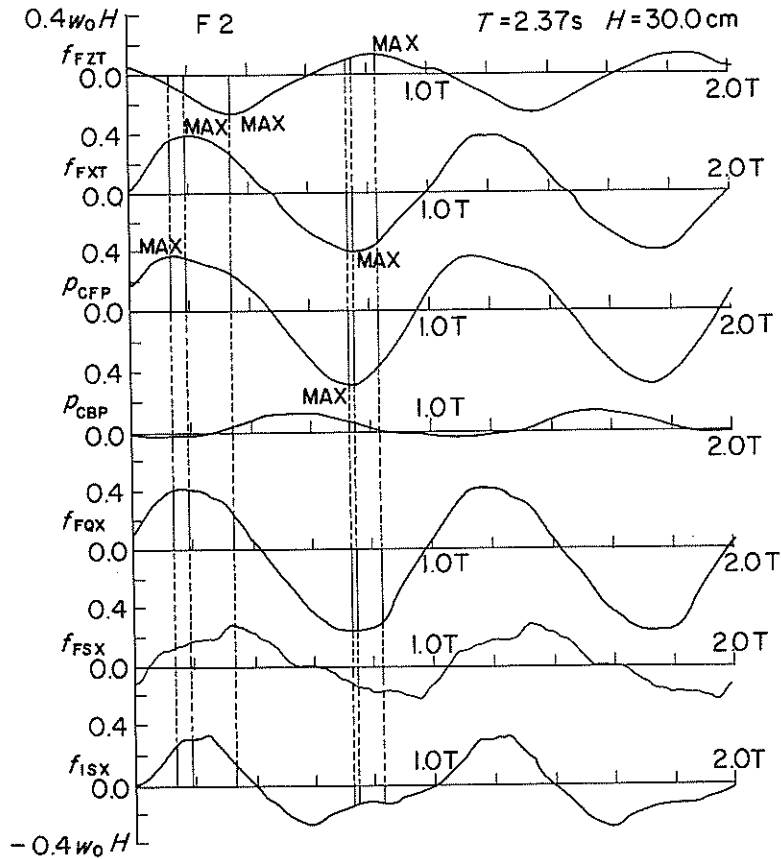


図-48 透過壁式二重セル構造の波力波形

$f_{FXT}$  も負のピークとなっている。その後、遊水室内の水位が最も低下したときに  $f_{FZT}$  の正のピークとなる。 $f_{FXT}$  については正、負のピーク値はほぼ同じ大きさであるが、 $p_{CFP}$  については負のほうが大きい。基部ケーソン後面での波圧  $p_{CBP}$  は  $p_{CFP}$  の正のピーク時から約  $0.45T$  経過後に正のピークとなっている。 $p_{CBP}$  の負のピーク値は小さく、堤体背後では大きな水位の低下は生じていない。

同図には下部不透過セル、上部透過セルおよび上部不透過セルの全周面に作用する波力の水平方向成分から求めた平均水平波力（それぞれ  $f_{FQX}$ ,  $f_{FSX}$ , および  $f_{ISX}$ ）の時間変化も併せて示している。 $f_{FQX}$  は  $f_{FXT}$  と同じ位相で変化しており両者の正のピーク値はほぼ等しい。 $f_{FSX}$  は若干乱れた波力波形を示しており、正のピーク時は  $f_{FZT}$  の負のピーク時と一致している。このときは遊水室内に最も多くの水塊が流入しているときであり、これが後側の透過セルから堤体背後へ流出しようとするため後側の透過セルに大きな正の水平波力が作用している。上

部透過セルには前側の透過セルから遊水室内に水塊が流入しようとするときにも正の水平波力が作用するが、短周期の波ではこのときに  $f_{FSX}$  が正のピークになっている。 $f_{ISX}$  も  $f_{FSX}$  と同様、乱れた波力波形を示している。正のピーク時は  $f_{FXT}$  の正のピーク時と  $f_{FZT}$  の負のピーク時のあいだに発生している。このときは前側の透過セルから流入した水塊が遊水室内を伝播し、後側の透過セルにあたるまでのあいだに相当する。また、負のピーク時は  $p_{CBP}$  の正のピーク時および  $f_{FZT}$ ,  $f_{FSX}$  が 0 のときとほぼ一致している。

### (3) 上部構造に作用する全波力

図-49 (1), (2)は当構造の上部構造に作用する平均鉛直波力  $f_{FZT}$  とこれのピーク時における平均水平波力  $f_{FXT}$  を示している。 $f_{FZT}$  は遊水室内の底面に作用する波圧と基部ケーソン上面のセル外周より外側の4隅に作用する波圧によって生じるものである。このうち、前者の作用面積は両者の作用面積の和の約  $3/4$  を占め、前者の

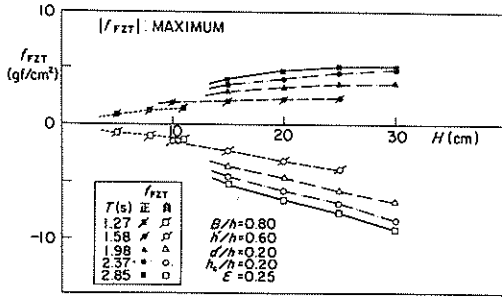


図-49(1)  $f_{FZT}$  のピーク値

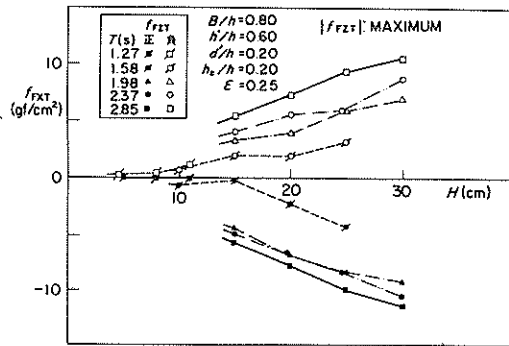


図-49(2)  $f_{FXT}$  ( $f_{FZT}$  のピーク時)

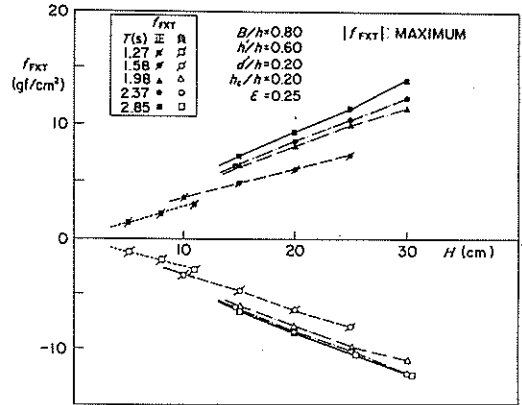


図-50(1)  $f_{FXT}$  のピーク値

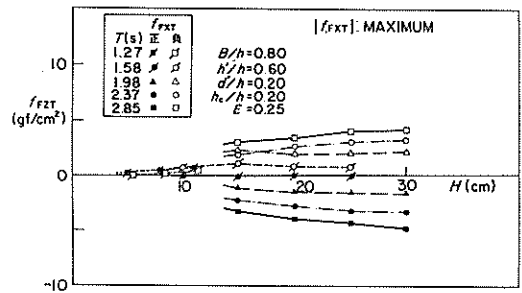


図-50(2)  $f_{FZT}$  ( $f_{FXT}$  のピーク時)

波圧が  $f_{FZT}$  に対して支配的である。もちろん、遊水室の上床版下面に打ちあたる場合、あるいは越波により上床版の上面に波圧が作用する場合には、これらによる波力も全体の鉛直波力に寄与するが、今回の実験ではこのような条件はほとんど含まれていない。遊水室内での圧力はおもに遊水室内の水位、言い換えるならば水量によってきまり、遊水室内に最も多くの水塊があるときに  $f_{FZT}$  は負のピークとなる。逆に、最も少ないときに正のピークとなる。図-49(1)に示すように  $f_{FZT}$  の正のピーク値は周期の違いによる影響があり、周期の長い波ほど大きくなる傾向にある。また、波高に対しては波高が大きくなるにつれ一定値に近づく傾向にあるが、これは次のような理由によると考えられる。波高が比較的大きい条件では、負のピークが生じる引き波時に堤体直前での水位が遊水室の底版の深さあるいはそれ以上の深さまで低下するため、遊水室内から流出する水量は遊水室底版からの水位と透過壁の形状によって決まる。堤体背後から流入する水塊の量も遊水室内の水位と堤体背後での水位の差と透過壁の形状によって決まる。しかし、堤体背後での水位の変化は、 $p_{CBP}$  の変化にみられるように小さく、ほぼ静水位程度であると考えことができ、これに

より遊水室内と堤体背後での水位差も入射波高に大きく影響されないと考えることができる。このため、波高の大きい条件では遊水室内への水塊の流入、流出量の収支は波高に大きく依存していないと考えることができる。

一方、負のピーク値は正のピーク値と同様に周期の長い波ほど大きくなる傾向にあるが、波高に対しては線形的に増大している。周期 2.85 s の波の場合  $-0.31w_0 H$  程度である。

$f_{FZT}$  の正のピーク時における  $f_{FXT}$  は図-49(2)に示すように長周期の波に対して比較的大きいが、周期の短い波に対しては非常に小さい。 $f_{FZT}$  の負のピーク時には  $f_{FXT}$  は正の値であり、周期の長い波ほど  $f_{FZT}$  は大きくなる傾向にあり、短周期の波では小さい。

一方、図-50(1)に示す  $f_{FXT}$  のピーク値は正、負とも波高にほぼ比例して増大している。周期の違いによる影響もあり、周期の長い波ほど大きく、 $T=2.85$  s の波に対して正、負のピーク値はそれぞれ  $0.46w_0 H$ 、 $-0.42w_0 H$  である。図-50(2)に示す  $f_{FZT}$  がピーク時の  $f_{FZT}$  は正、負とも周期の影響が顕著であり、長周期の波ほど



大きくなる傾向を示している。波高に対しては波高が大きくなるにつれて一定値に近づく傾向にある。

図-49(1), 50(1)に示したように $f_{FZT}$ の正, 負のピーク値,  $f_{FXT}$ の正のピーク値は周期の違いによって異なり, 周期の長い波ほど大きくなる。この理由は以下のとおりである。

$f_{FZT}$ の場合, ピーク値の大小はどれだけ多くの水塊が遊水室内へ流入するか, あるいは遊水室外へ流出するかによって決まることは既に述べた。このとき流入量や流出量はもちろん, 遊水室内外の水位差によって決まるが, この状態の継続時間すなわちどれだけ長い時間水位差がついているかによっても異なる。長周期の波ほどこの継続時間は長くなり, 遊水室内の水位変動の量が大きくなるため, 結果として $f_{FZT}$ の正, 負のピーク値は大きなものとなるものと考えられる。

一方,  $f_{FXT}$ については周期の長い波ほど深いところにおける圧力変動が大きく, 当構造のように深いところには不透過部材がある構造ではこの傾向が顕著に現れることによる。

#### (4) 基部ケーソンに作用する波力

図-51は基部ケーソン前面の波圧 $p_{CFP}$ のピーク値を示したものである。正, 負のピーク値とも波高の増加に比例して大きくなっている。周期の違いによる影響も影響著であり, 長周期の波ほど大きくなっている。 $T=2.85s$ の波に対して正, 負のピーク値はそれぞれ $0.49w_0H$ ,  $-0.56w_0H$ であり負のピーク値のほうが大きい。この傾向は $T=1.27s$ を除く他の周期についてもあてはまっている。一方, 基部ケーソン後面に作用する波圧 $p_{CBP}$ の正のピーク値は波高に比例しているが,  $p_{CFP}$ に比べて小さく,  $T=2.37s$ の波に対して約 $0.14w_0H$ である。負のピー

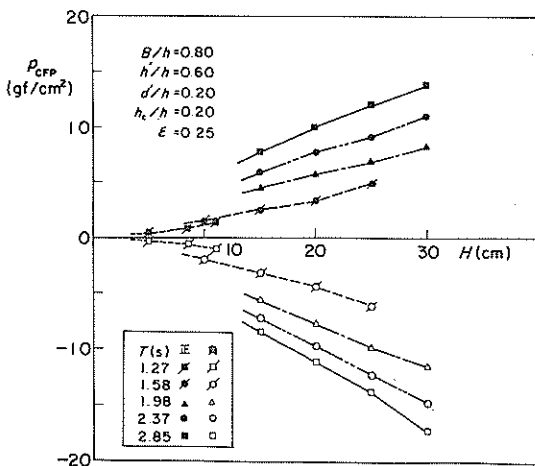


図-51 基部ケーソン前面に作用する波圧

ク値は波高の増大とともに一定値(約 $-1.5gf/cm^2$ )に近づく傾向にある。このことは堤体背後における水位の低下がきわめて小さいことを意味している。

#### (5) セルに作用する波力

透過壁式二重セル構造を構成する3個のセル部材に作用する波力を以下に示す。図-52~54は個々のセル部材全体に作用する平均水平波力強度である。このうち, 図-52に示す $f_{FQX}$ は下部不透過セルに作用する波力であり静水面下 $0.5h$ の深さで円周に働く波圧の水平方向合力を直径で割って求めたものである。図-53に示す $f_{FSX}$ は上部透過セルに作用する波力であり, 静水面位置でのひずみゲージによる測定値から同様に求めたものである。なお, この $f_{FSX}$ はセル開口部の面積を考慮しておらず, 実際に作用する水平波力はこれを $(1-\epsilon)$ 倍しなければならない。また, 図-54に示す $f_{ISX}$ は上部不透過セルの静水面下 $0.1h$ の深さでの波圧の水平方向合力を上部不透過セルの直径で割って求めた平均波力強度である。これらはともに波の進行方向に作用する波力を正としている。

$f_{FQX}$ は正および負のピーク値とも周期の長い波ほど大きく, かつ波高にほぼ比例して大きくなっている。データをほぼ包含する正, 負の最大値はそれぞれ $0.56w_0H$ ,  $-0.60w_0H$ である。

$f_{FSX}$ の正のピーク値は周期の長い波ほど大きく, かつ波高にほぼ比例して大きくなっている。最大で $0.39w_0H$ 程度である。負のピーク値は波高が増すにつれ一定値になる傾向がある。これは $f_{FZT}$ の負の値について述べたのと同じ理由によるものと考えられる。周期の長い波ほど若干大きくなっており, 周期 $2.85s$ , 波高 $30cm$ の波に対して $-0.24w_0H$ である。

$f_{ISX}$ の正のピーク値は周期の違いによる影響はなく, 波高とともに増大しているが, 波高が大きい条件ではその増大の割合は若干低下している。波高 $30cm$ では約 $0.33w_0H$ の値となっている。負のピーク値も波高に対する変化の傾向は正と同様であるが, 周期については周期の影響を受ける他の波力と異なり, 周期の長い波ほど小さくなっている。これは, 周期の長い波ほどセル周辺の波圧分布が一様になる傾向があり, 互いに打ち消し合うことにより小さくなるためである。

続いて, 上部透過セルについてこれを構成するスリット部材に作用する波力を示す。ここに示す波力は遊水室内に向かう波力を正, 遊水室内から外へ向う波力を負と定義している。図-55, 56はそれぞれ前側の透過壁で最前端に位置するスリット部材FS1, FS4, および側方に位置する部材FS3, FS6(図-13参照)に作用する

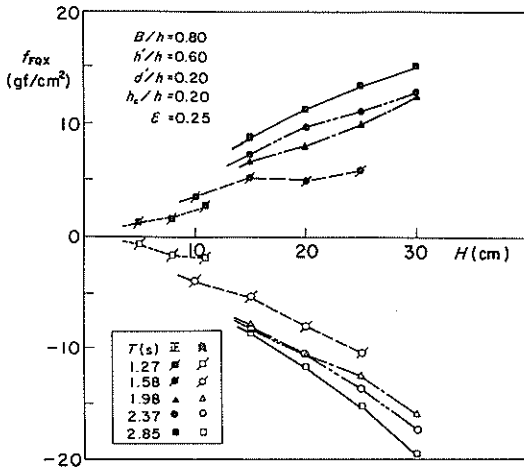


図-52  $f_{FQX}$  のピーク値

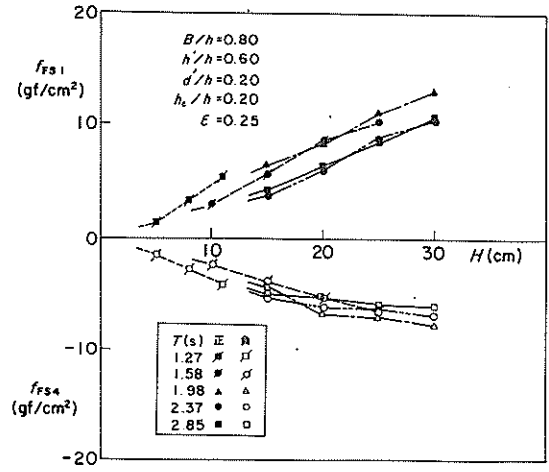


図-55  $f_{FS1}$  および  $f_{FS4}$  のピーク値

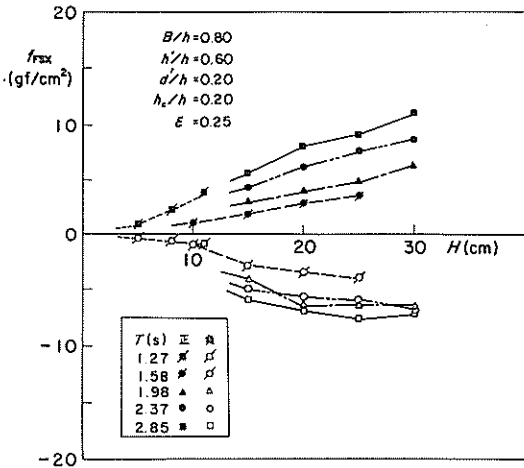


図-53  $f_{FSX}$  のピーク値

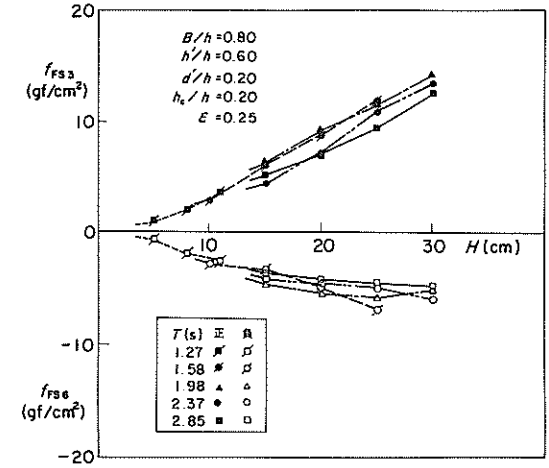


図-56  $f_{FS3}$  および  $f_{FS6}$  のピーク値

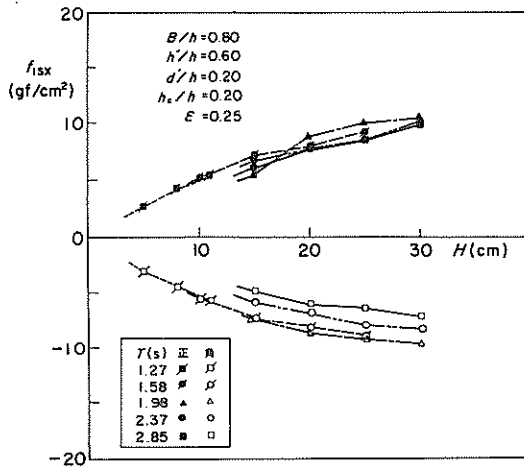


図-54  $f_{ISX}$  のピーク値

波力を示すものである。ただし、正の波力については作用波圧が大きい部材  $FS1$ 、および  $FS3$  について示しており、負の波力については同様に部材  $FS4$ 、 $FS6$  について示している。

押し波時に発生する正の部材波力  $f_{FS1}$  および  $f_{FS3}$  は波高の増大とともに線形的に増大している。周期については短周期の波に対して大きくなる傾向を示している。データをほぼ包含するピーク値は  $f_{FS1}$  で  $0.43w_0H$ 、 $f_{FS3}$  で  $0.48w_0H$  であり、部材  $FS3$  に作用する波力が若干大きくなっている。これは隣接面（実験では側方に平板をとり付けている。）との接点に波が集中し、これが遊水室内へ流入しようとするためである。一方、引き波時に発生する部材波力  $f_{FS4}$ 、 $f_{FS6}$  の負のピーク値は  $f_{FS1}$ 、 $f_{FS3}$  の正のピーク値より小さく、波高の増大とともに一定値に近づく傾向にある。周期の影響はそれほど顕著

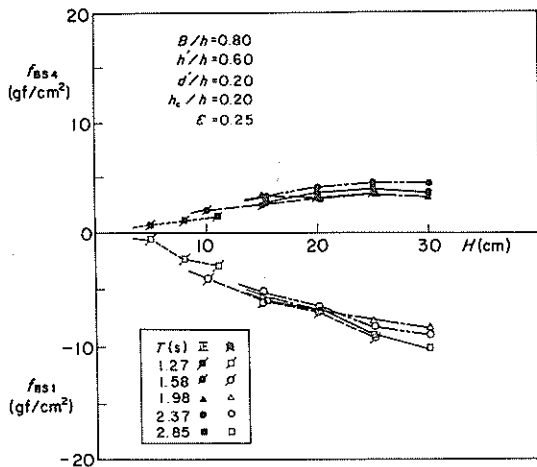


図-57  $f_{BS4}$  および  $f_{BS1}$  のピーク値

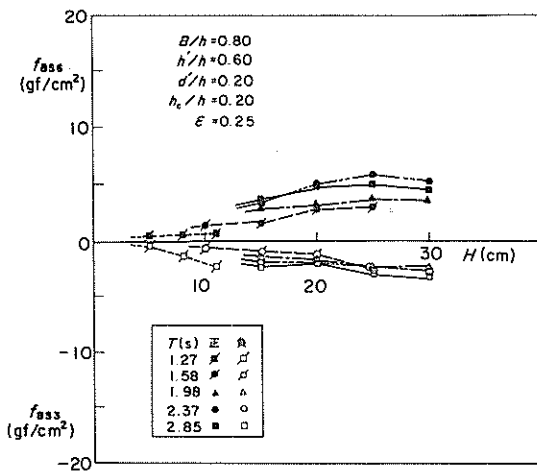


図-58  $f_{BS6}$  および  $f_{BS3}$  のピーク値

でない。波高 30cm の波に対しては  $f_{FS4}$  で  $-0.23w_0H$ 、 $f_{FS6}$  で  $-0.20w_0H$  である。

一方、透過セル後側の透過壁で最後端に位置するスリット部材 BS1、BS4 および側方に位置する部材 BS3、BS6 (図-13 参照) に作用する波力をそれぞれ図-57、58 に示す。遊水室内から堤体背後へ水塊が流出するときに生じる負のピーク値については作用波力の大きい部材 BS1 と、作用波力は大きくないが側方に位置する BS3 について示している。逆に、堤体背後から遊水室内へ水塊が流入するときに生じる正のピーク値については部材 BS4、BS6 について示している。負のピーク値は後側の透過セルの中央に位置する部材 BS1 では比較的大きい。周期の違いによる差は小さく波高の増大にはほぼ比例して増加しており、最大で  $-0.35w_0H$  程度の波圧が作用している。透過セ

ルの後側に位置する部材 BS3 では負のピーク値は小さい。正のピーク値は部材 BS4、BS6 とも波高の増大とともに一定値に近づく傾向を示し、周期の影響は小さい。波高が 25cm より小さい条件では  $f_{BS6}$  および  $f_{BS4}$  のピーク値はそれぞれ  $0.25w_0H$ 、 $0.21w_0H$  程度である。

#### (6) 同時波力分布

当構造に作用する同時波力分布の例を図-59 (1)~(3) 示す。これらは、図-48 に波力波形の時間変化を示した  $T=2.37s$ 、 $H=30cm$  の入射波に対するものであり、順に  $f_{FXT}$  の正のピーク時、 $f_{FZT}$  の負のピーク時、および  $f_{FXT}$  の負のピーク時における同時波力分布である。なお、図中には今回波力の測定をしていない基部ケーソン底板および上面に作用する波圧、遊水室底板および上床版上面および下面に作用する波圧は表示していない。

図-59 (1) に示す  $f_{FXT}$  の正のピーク時は遊水室内に水塊が流入しようとするときであり、当構造の前面部全体および上部不透過セルの前面部に大きな波圧が作用している。これに対し後側の透過セル、基部ケーソン後面、上部不透過セル後面部には若干の波圧および波力が作用しているが、その大きさは非常に小さい。下部不透過セルおよび上部透過セルの前面部に作用する波力は、堤体の側方部が若干大きい分布を示している。

図-59 (2) に示す  $f_{FZT}$  の負のピーク時は遊水室内に最も多くの水塊が流入し、後壁の透過セルから堤体背後へ流出しようとするときであり、上部不透過セルおよび後側の透過セルに大きな波圧および波力が作用している。このときには堤体の前面でも水位が高い状態のままであり、下部不透過セル、基部ケーソン前面での波圧は比較的大きい。堤体背後でも若干水位が上昇しており、下部不透過セル後面および基部ケーソン後面壁に小さい正の波圧が作用している。

図-59 (3) は  $f_{FXT}$  の負のピーク時であり、堤体前面での水位が大きく低下し下部不透過セル前面および基部ケーソン前面は大きな負圧となっている。堤体背後では正圧が作用しているが小さく、水位も静水位程度であると考えられる。遊水室内から水塊が前面へ流出しており、遊水室内での水位は全体に低下しており、特に前側では大きく低下していると考えられる。下部不透過セルおよび上部透過セルに作用する波圧の平面分布はほぼ円周方向に一樣である。この傾向は図-59 (1)、(2) においてもあてはまり、一般的な傾向であると言える。

#### 4.5 各種構造に働く全波力の比較

本節では基部ケーソンに働く波力をも含めた全水平波力 ( $F_P$ )、全鉛直波力 ( $F_V$ )、 $F_P$  と  $F_V$  を合成して得られる合成滑動波力 ( $F_C$ )、および基部ケーソン後端、

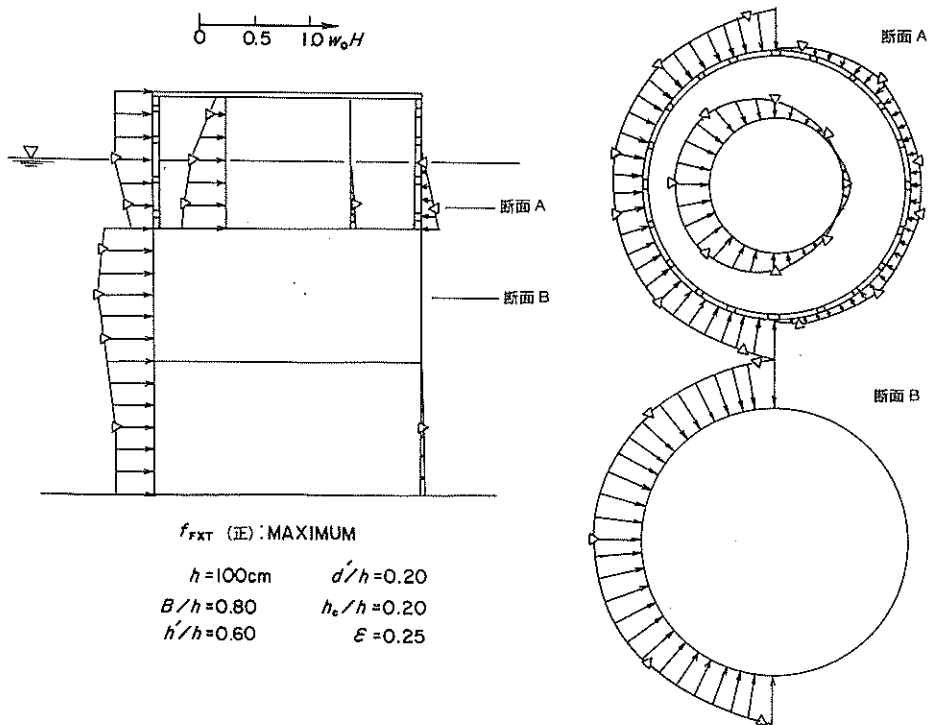


図-59(1) 同時波力分布 ( $f_{FXT}$  (正) のピーク時)

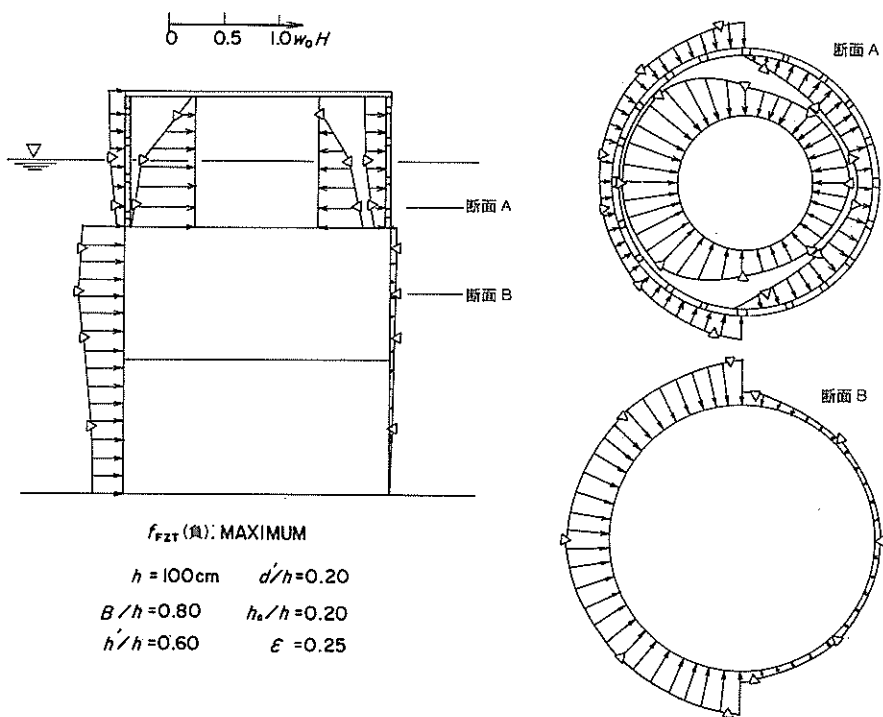


図-59(2) 同時波力分布 ( $f_{FZT}$  (負) のピーク時)

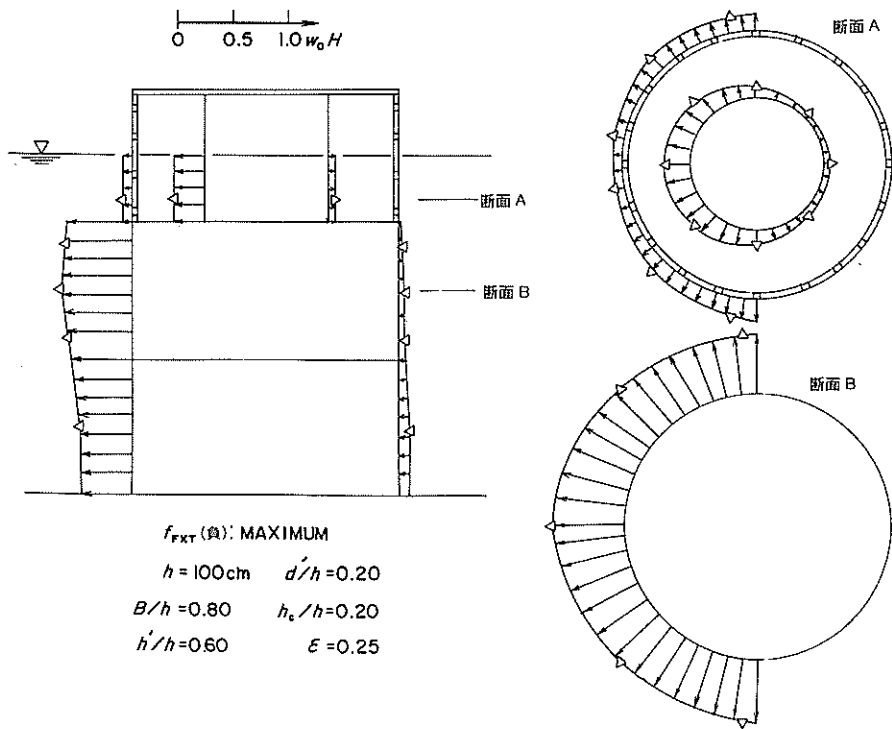


図-59(3) 同時波力分布 ( $f_{EXT}$  (負) のピーク時)

前端における転倒モーメント(それぞれ $M_B$ ,  $M_F$ )を求め、各種構造の全体に作用する波力の比較検討を行う。 $F_P$ ,  $F_U$ ,  $M_B$ ,  $M_F$ の算出法は付録に示すとおりである。このうち、 $M_B$ ,  $M_F$ はともに波の進行方向に転倒させるモーメントを正としているため、 $M_B$ では正が、 $M_F$ では負が堤体をそれぞれ後方、前方へ転倒させようとするときのモーメントに対応する。また、 $F_C$ は滑動に対する水平波力と鉛直波力の効果を合成した滑動波力で、 $|F_C|$ が $\mu W$ より大きいときには滑動を生じるということを表し、式(3)で与えられる。(  $\mu$  : 摩擦係数,  $W$  : 堤体の水中重量 )。

$$F_C = \pm \{ |F_P| + \mu F_U \} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、符号の±は $F_C$ の作用方向を示し、 $F_P$ が正のとき+、負のときに-を用いる。すなわち、堤体を後方へ滑動させようとするときに $F_C$ は正、逆の場合負で定義している。ただし、下向きの波力が水平波力より卓越する場合、すなわち $F_P$ が正で $F_C$ が負となると、 $F_P$ が負で $F_C$ が正となるときは $F_C$ を0とする。これらの算定に用いる基部ケーソン底面に作用する場圧力は、前端

で基部ケーソン前面に作用する波圧 $p_{CBP}$ 、後端で基部ケーソン後面に作用する波圧 $p_{CBP}$ に等しい強度を持ち、前端から後端にかけて直線的に変化する分布を仮定している。

図-60~63は実験にて測定した $F_P$ ,  $F_U$ ,  $F_C$ ,  $M_B$ (正)および $M_F$ (負)のピーク値を現地量に換算して示したものである。ここで対象とした入射波の周期は15sである。 $F_P$ ,  $F_U$ はそれぞれ投影面積の $(h_c + h)D$ ,  $BD$ で除した平均波力強度で示し、 $F_C$ についても $F_P$ と同様に $(h_c + h)D$ で除した平均波力強度で示している。 $M_B$ ,  $M_F$ は法線方向長さ $D$ で除した単位延長あたりの値としてある。

全水平波力 $F_P$ は水平板付立体骨組構造が正および負の値とも最も小さく、波高にはほぼ比例して増大しており、押し波時 $0.23w_0H$ 、引き波時 $-0.26w_0H$ 程度である。上部半円形断面構造および透過壁式二重セル構造に働く正の波力は同じ程度であるが、引き波時には波高の大きいときに透過壁式二重セル構造が若干大きい。また、両構造では透過壁式二重セル構造の引き波時を除いて、波高の増大とともにその増加率が若干小さくなる傾向を示しており、

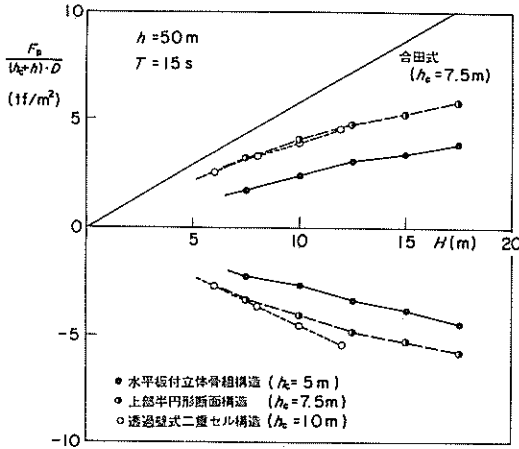


図-60 全水平波力の比較

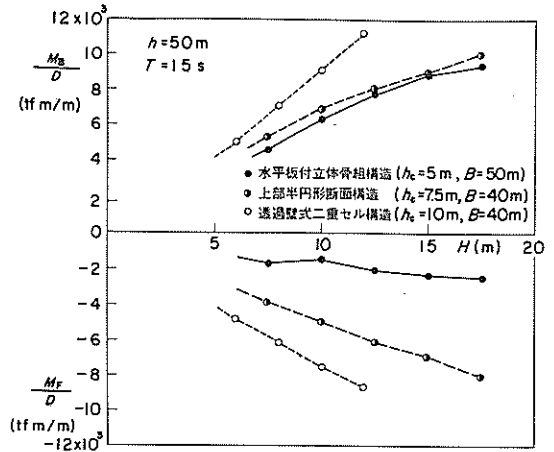


図-63 後端および前端における転倒モーメントの比較

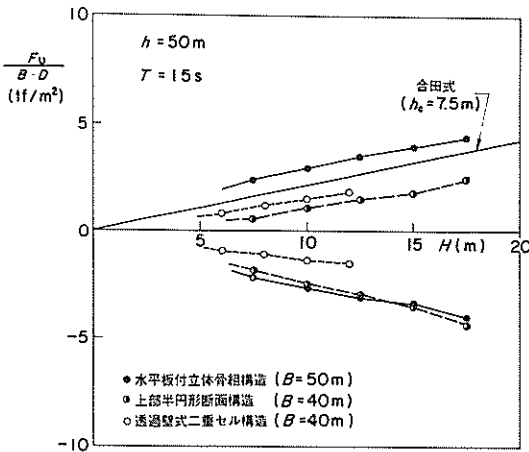


図-61 全鉛直波力の比較

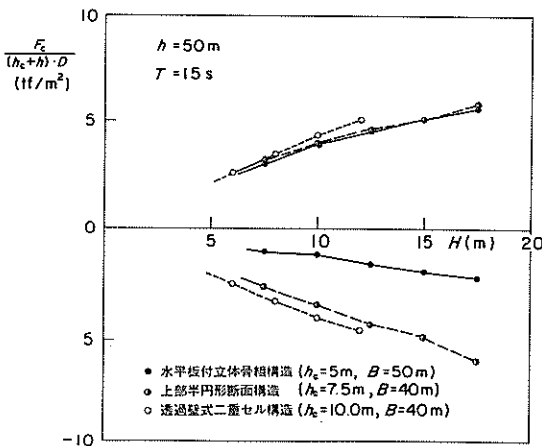


図-62 合成滑動波力の比較

上部半円形断面構造では入射波高15m に対して $0.35w_0H$  (押し波時),  $-0.42w_0H$  (引き波時), 透過壁式二重セル構造では入射波高12m に対して $0.38w_0H$  (押し波時),  $-0.45w_0H$  (引き波時)程度である。押し波時と引き波時の値を比較すると、基部ケーソン前面における波圧においてみられたように、この場合も引き波時のほうがやや大きい傾向が認められる。同図には同じ入射波の条件にて、通常の直立壁に対する合田式より求まる波圧の平均波力強度を実線で示している。合田波圧はほぼ波高に比例して増大しており、約 $0.57w_0H$ である。これと比較すると各構造とも波力は小さく、特に水平板付立体骨組構造の場合、波高15m の条件で合田波圧の約39%、また、上部半円形断面構造でも61%である。

一方、全鉛直波力 $F_y$ は各構造とも入射波高の増大にほぼ比例して増大しているが、水平板付立体骨組構造の場合やや鈍化傾向が認められる。正の値すなわち堤体を持ち上げようとする力は水平板付立体骨組構造が $0.28w_0H$ 程度と最も大きく、透過壁式二重セル構造、上部半円形断面構造はそれぞれ、 $0.15w_0H$ ,  $0.11w_0H$ と小さい。負の値すなわち堤体を押え付けようとする波力は水平板付立体骨組構造、上部半円形断面構造がともに $-0.25w_0H$ 程度であるが、透過壁式二重セル構造は $-0.14w_0H$ と小さい。同図には全水平波力の場合と同様に合田式より求まる揚圧力も示している。この揚圧力はケーソン底面に作用する三角形分布の揚圧力の平均値であり、 $0.21w_0H$ の値になる。透過壁式二重セル構造、上部半円形断面構造の上向き波力はそれぞれ合田式による揚圧力の60%、52%と小さい。水平板付立体骨組構造では133%となり大きい。これは基部ケーソン底面に働く揚圧力のほかに

水平板に働く揚圧力が付加されるためである。

図-62は合成滑動波力 $F_C$ を示したものである。これを全水平波力 $F_P$ (図-60)と比較すると、正、負のピーク値とも水平板付立体骨組構造の違いが大きいの。すなわち、正のピーク値は $F_P$ より大きく、波高15mに対して $0.34w_0H$ であり、他の2構造と同程度の大きさであるが、負のピーク値は $-0.13w_0H$ と $F_P$ より小さい。これは $F_P$ と $F_U$ のピーク値の位相がほぼ一致し、 $F_P$ の正のピーク時に $F_U$ の正の値が、負のピーク時に $F_U$ の負の値が比較的大きいためである。一方、上部半円形断面構造、透過壁式二重セル構造では、正、負のピーク値とも $F_P$ とはほぼ同程度か、若干小さい程度であり、ケーソン底面に働く揚圧力がほぼ打ち消されて全鉛直波力は小さいことが知られる。

図-63は堤体法線方向の単位長さあたりに作用する後端の回りの転倒モーメント( $M_B$ :正)および前端の回りの転倒モーメント( $M_F$ :負)のピーク値を示している。 $M_B$ は透過壁式二重セル構造が他の二構造より大きく、かつ入射波高の増大に比例して増加している。上部半円形断面構造は水平板付立体骨組構造より若干大きい程度であり、両構造とも入射波高が増大するにつれて $M_B$ の増加率はわずかながら小さくなっている。上部半円形断面構造と透過壁式二重セル構造は同じ堤体幅( $B=40$ m)であるが、波高の大きい波ほど両者の差は大きくなっている。これは天端高が上部半円形断面構造のほうが若干低いことも理由であるが、それ以外に天端が半円形状であることによるところが大きいと推測される。すなわち、波高の増大とともに上部半円形部の頂部付近に作用する波力が大きくなるけれども、波力は半円の中心に作用するため転倒モーメントはそれほど増加しないためと考えられる。

一方、 $M_F$ は水平板付立体骨組構造が最も小さく、入射波高が大きくなるにつれ、一定値に近づく傾向にある。続いて、上部半円形断面構造、透過壁式二重セル構造の順で $M_F$ は大きくなり、その大きさは入射波高にほぼ比例している。

各構造とも前述の全水平波力と異なり堤体を前方へ転倒させるモーメントは波の進行方向に転倒させるモーメントより小さい。

## 5. 試設計の例

### 5.1 基本設計

以上、3種の波浪制御構造物に働く波力の実験結果について述べたが、本章ではその結果に基づき実海域を想定して試設計を行って、これらの構造物を実際に建設し

た場合にどの程度の規模、安全率となるかを示す。

対象とした条件は以下のとおりである。

- ① 水深:  $-5.0$  m
- ② 潮位: H. W. L.  $+1.5$  m  
L. W. L.  $\pm 0.0$  m
- ③ 設計波浪:  $T_{1/3} = 14.0$  s  
 $H_{1/3} = 9.0$  m,  $H_{\max} = 16.2$  m  
波向き 構造物法線に直角
- ④ 地盤: 良好な砂質地盤
- ⑤ 許容安全率: 滑動 1.2, 転倒 1.2

伝達率は設計波浪条件に対し、0.4以下とし、これに関連する構造の基本的諸元を先の実験結果<sup>4)</sup>に基づき与えているが、これについては結果と併せて述べる。ただし、各構造について同じ伝達率となるようにしたものではなく、同じ性能で比較するためには構造物をその延長方向に間隔を置いて設置するなどの調整が必要となる。<sup>5)</sup>

### 5.2 波力条件

試設計に用いる波力条件は設計波浪条件に対する実験結果に基づいて与えている。ただし、実験は周期14sの条件では行っていないので、15sの結果を用いる。また、波高も $H_{\max} = 16.2$ mまで行っていない構造もあるが、その場合には実験条件のうちで最も近い波高条件での結果を $w_0H$ で割って、その無次元値を $H = 16.2$ mにあてはめることによって与える。

波力条件は構造物にとって最も厳しくなる位相に対し与える必要がある。しかし、これらの位相は構造の諸元によっても変化する。そのため、ここでは各構造の一般的波力特性を考慮して、最も危険となりそうな位相を適宜選定して与えた。これらの選定が妥当であるかどうかは、構造諸元が決定したのち、合成滑動波力や波力モーメント等の1周期にわたる時間変化を調べて確認する。

以下、与えた波力条件を構造別に示す。

#### ① 水平板付立体骨組構造

当構造の安定性の検討に用いる波力は図-64~66に示した3位相時の分布である。このうち、図-64、65は全水平波力が押し方向、引き方向にそれぞれほぼ最大となるときの波力分布として、基部ケーソン前面の波圧強度 $p_{CFP}$ の正および負のピーク時(それぞれケース名:H1-A,H1-B)を、図-66は鉛直上向きの波力が卓越するときの分布として、上部構造に働く鉛直波力 $f_{FZT}$ の正のピーク時(H1-C)を選定したものである。ただし、これらの分布において、上部構造(基部ケーソン上面を含む)に働く波力は上部構造の見掛けの投影面積に作用する平均波力強度で表示してあり、構造部材の実質部に働く波力でないことに注意を要する。また、基部ケーソン底面に作

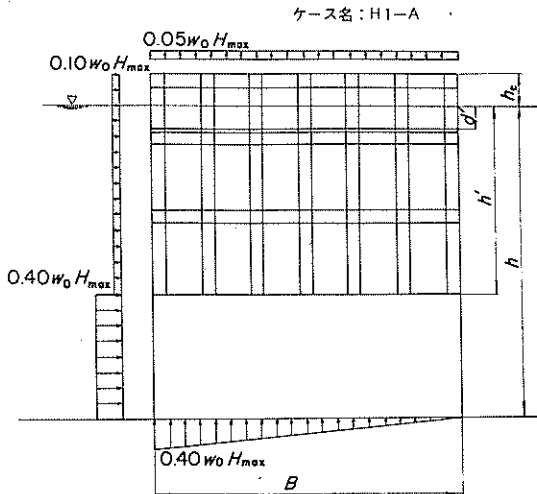


図-64 基本設計波力(ケース名:H1-A)

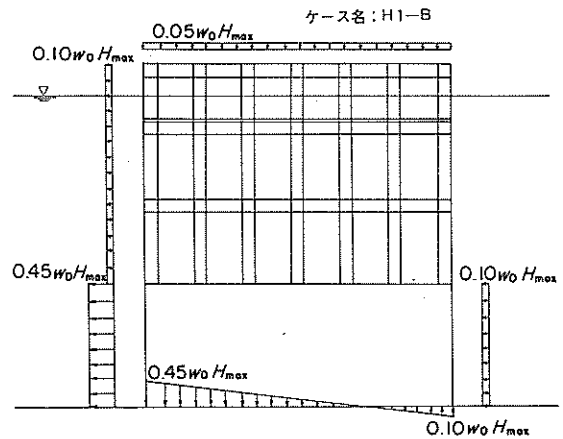


図-65 基本設計波力(ケース名:H1-B)

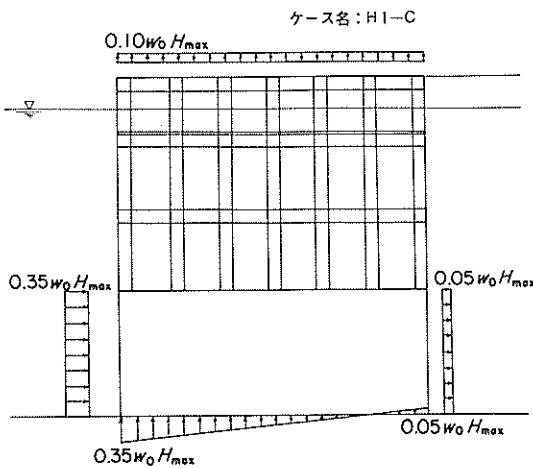


図-66 基本設計波力(ケース名:H1-C)

用する揚圧力は、前端でケーソン前面に働く波圧強度( $P_{CFP}$ )、後端で後面に働く波圧強度( $P_{CBP}$ )に等しく、その間は直線的に変化する分布を仮定して与えたものである。これは後述する2構造でも同じである。実際にはケーソン底面にはスカートを設けるので、揚圧力はこれより若干小さくなるものと思われる。このほか、ここでは結果を述べないけれども、水平板の部材設計に用いる波力としては、図-64~66のほかには水平板のみに $\pm 0.5 w_0 H_{max}$ の波力が一様に働く分布も与えている。

なお、図中に示した数値は実験結果を適宜丸めて0.05単位で表示したものである。

### ② 上部半円形断面構造

当構造は水平板付立体骨組構造と異なり、上部構造に

作用する水平波力 $f_{FXT}$ が大きく、かつ基部ケーソン前面の波圧 $P_{CFP}$ もこれとほぼ同位相で変化するため、 $f_{FXT}$ の正、負のピーク時における検討が必要である。上部構造に作用する正の鉛直力 $f_{FZT}$ はほぼ0であるので、この位相時を考慮する必要はない。図-67、68はそれぞれ $f_{FXT}$ の正のピーク時(ケース名:E6-A)、負のピーク時(E6-B)に対応する波力分布である。同図に示す通水部の鉛直透過壁に作用する波力は、水平板付立体骨組構造の $f_{FXT}$ 、 $f_{FZT}$ の定義と異なり、スリット部材の投影実面積のみに作用するものと定義している。通水部中央の水平板に作用する波力は水平板上面および下面に作用する波圧の差であり、水平板上面波圧は上部半円形部底面に、水平板下面波圧は基部ケーソン上面に作用する波圧と等しいと仮定して求めたものである。

### ③ 透過壁式二重セル構造

当構造も上部構造に作用する水平波力 $f_{FXT}$ が比較的大きく、かつこれの正、負のピーク時は基部ケーソン前面の波圧 $P_{CFP}$ のピーク時とほぼ一致している。したがって、これらの位相時における安定性の検討が必要となる。また、遊水室内に水塊が流入し上部透過セルの背後へ流出しようとするときには上部透過セル全体に作用する水平波力 $f_{FSX}$ が最大となるため、 $f_{FSX}$ の正のピーク時についても検討する。図-69~71はそれぞれ $f_{FXT}$ の正のピーク時(ケース名:F2-A)、負のピーク時(F2-B)、および $f_{FSX}$ の正のピーク時(F2-C)に対応する波力分布である。同図に示すセル円周方向の波圧分布、遊水室底板および上床版下面に作用する波圧、基部ケーソン上面の4隅に作用する波圧は、それぞれの方向の合力が実験結果と一致するように測定値を適宜修正して与えている。



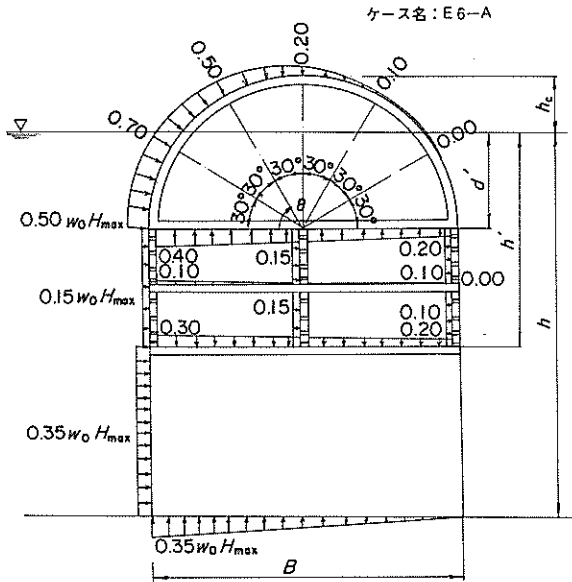


図-67 基本設計波力(ケース名：E6-A)

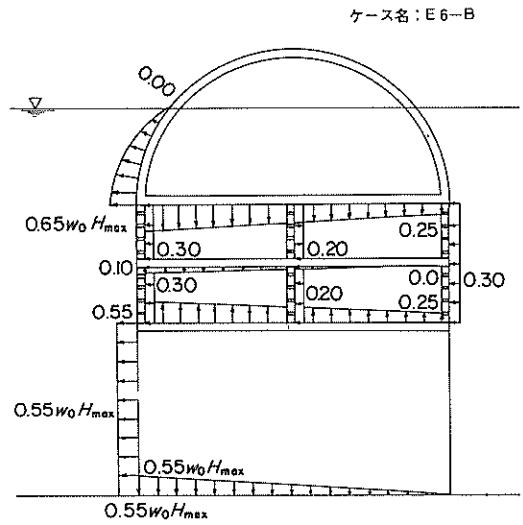


図-68 基本設計波力(ケース名：E6-B)

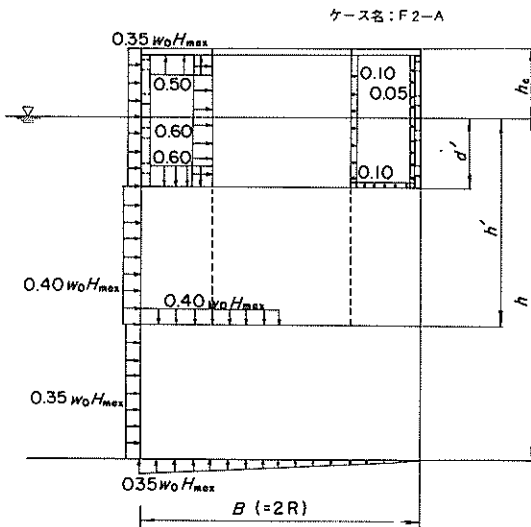
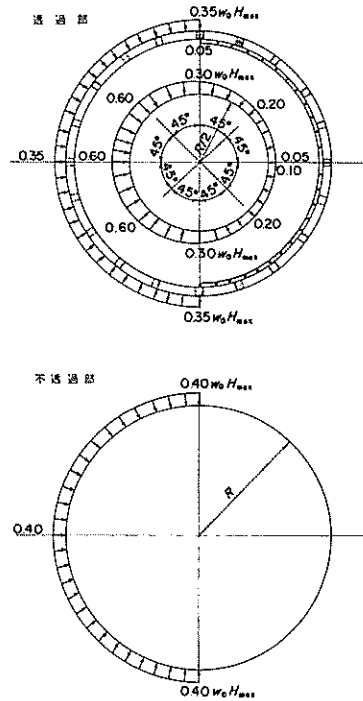


図-69 基本設計波力(ケース名：F2-A)



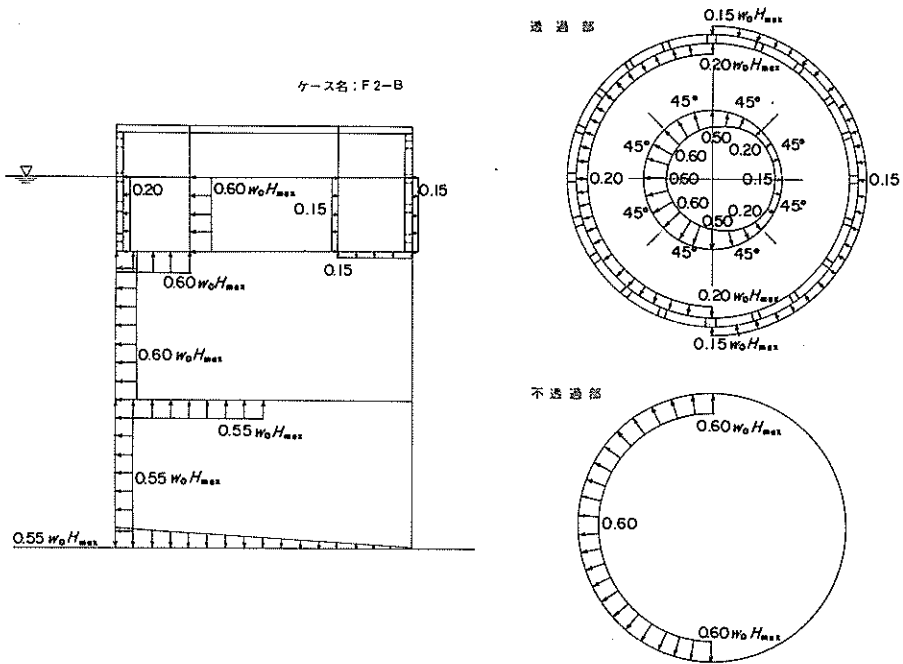


図-70 基本設計波力(ケース名：F2-B)

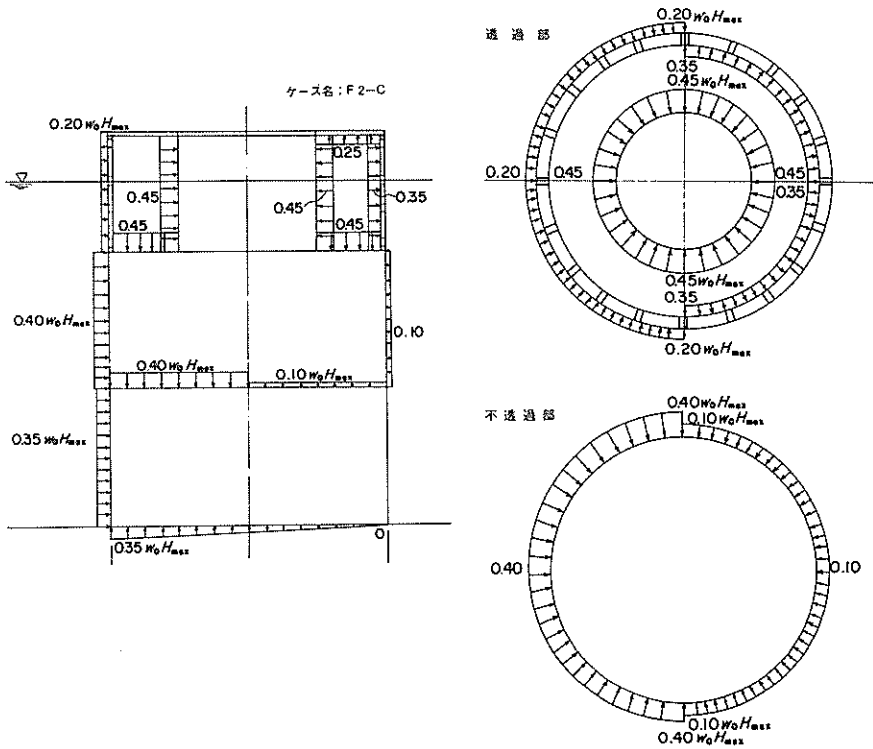


図-71 基本設計波力(ケース名：F2-C)

### 5.3 構造諸元と安定計算結果

図-72～74に試設計に基づいて得られた各構造の一般図を示す。また、表-4は基本的構造諸元および安定計算結果の一覧である。以下に各構造ごとの結果について述べる。

#### ① 水平板付立体骨組構造

伝達特性に影響する構造諸元である水平板の設置水深 $d'$ と幅 $B$ については、設計波に対する伝達率が0.4程度となることを目標とし、実験結果をもとにそれぞれ-3.0m、5.0mとした。このうち、設置水深はL.W.L.(±0.0m)とH.W.L.(+1.5m)の平均水位から水平板上面の深さが3.75m( $d'/h \doteq 0.075$ )に対する値である。また、法線方向の堤体長 $D$ は幅 $B$ と等しい5.0mと

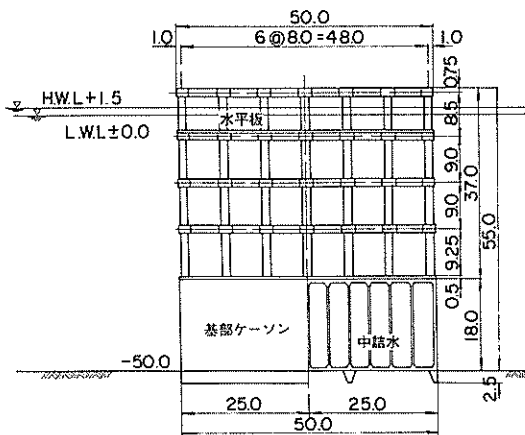


図-72 水平板付立体骨組構造の一般図

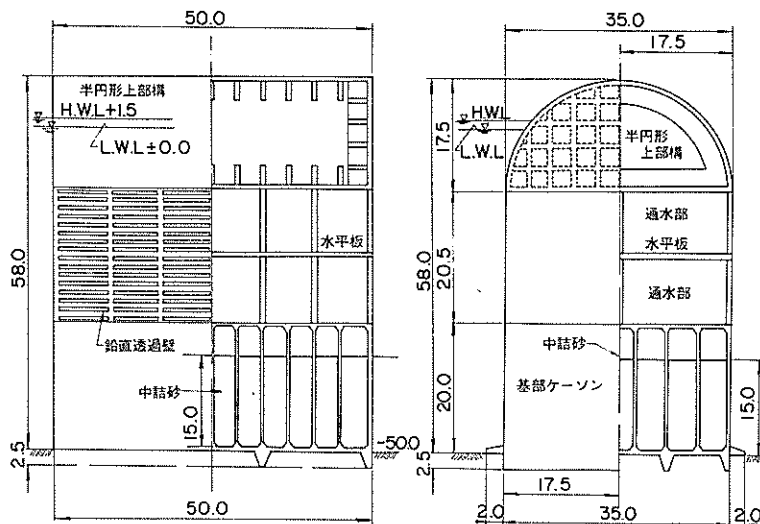


図-73 上部半円形断面構造の一般図

した。

当構造の堤体全高は5.5mとなり、このうち上部構造部が3.7m、基部ケーソン部が1.8mである。空中時の法線方向単位長さあたりのコンクリート重量は1,009tf/m(50,463tf/函)となり、水中時では592tf/m(29,606tf/函、中詰め砂不要)である。当構造は上部構造に作用する水平波力が小さいために基部ケーソンを中詰めなしの水張りのままとしても安定である。滑動、転倒に対する安全率はともに図-64に示す設計波力(H1-A)の作用時、すなわち基部ケーソン前面の波圧が正の最大となるときに最小となり、それぞれ1.27、2.46である。また、端し圧は一般に小さいが、対象とした3種の設計波力条件のもとでは(H1-B)のとき、すなわち基部ケーソン前面の波圧が負のピークとなるときに前端で最大(29tf/m<sup>2</sup>)となる。

以上のように、当構造は全体の安定性の面では充分であるが水平板を支える立体骨組部材の部材強度の確保が問題であり、本試設計では4層構造を採用した。鉛直柱は直径と厚さがそれぞれ、上の3層については1.5m、0.32m、最下層については1.7m、0.5mの円筒とし、水平梁は辺長1.5m、厚さ0.3mの角筒である。このうち鉛直柱はプレストレストコンクリート部材である。水平板は板厚が0.5mで、基部ケーソンとともに鉄筋コンクリート製である。

#### ② 上部半円形断面構造

当構造では天端高 $h_c$ と通水部の開口率 $\epsilon$ が伝達特性に支配的要素であり、伝達率が0.3程度となるようにそ

表-4 安定計算結果

構造の種類	構造諸元	堤体重量(1m当たり)		安定計算結果									
		空中時 (コンクリート重量)	水中時 (中詰め砂重を含む)	滑動	転倒	端し圧	滑動	転倒	端し圧	滑動	転倒	端し圧	
水平板付 立体骨組構造 (H1)	堤法線体幅 堤法線体幅 基部ケーソン	50m 50m 55m 18m	1009tf/m	592tf/m 中詰め砂不要	ケース名: H1-A			ケース名: H1-B			ケース名: H1-C		
					1.27	2.46	20tf/m <sup>2</sup>	2.06	4.70	29tf/m <sup>2</sup>	1.92	7.58	14tf/m <sup>2</sup>
上半円形 断面構造 (E6)	堤法線体幅 堤法線体幅 基部ケーソン	35m 50m 58m 20m	955tf/m	1011tf/m	ケース名: E6-A			ケース名: E6-B					
					1.69	1.74	81tf/m <sup>2</sup>	1.60	2.12	79tf/m <sup>2</sup>			
透過壁式 二重セル構造 (F2)	堤法線体幅 堤法線体幅 基部ケーソン	40m 40m 57m 20m	864tf/m	945tf/m	ケース名: F2-A			ケース名: F2-B			ケース名: F2-C		
					1.38	1.62	72tf/m	1.24	1.81	65tf/m <sup>2</sup>	1.79	2.23	54tf/m

れぞれ+8.0m, 0.25とあらかじめ決定した。また、法線方向の堤体長さDも50mとした。

堤体の全高は58mとなるのに対して、堤体幅は35mで安定であるが、端し圧軽減のため幅2mのフーチングを設けている。上半円形部の曲率外半径は17.5mとなり、基部ケーソン高および通水部の高さはそれぞれ20m, 20.5mである。空中時のコンクリート重量は法線方向の単位長さあたり955tf/m(47,741tf/函)であり、中詰め砂も含めた水中重量は1,011tf/m(50,570tf/函)である。基部ケーソン内は80%の中詰めをしているが、滑動、転倒に対して充分安定であり、それぞれの最小安全率は1.60, 1.74である。このうち滑動の最小安全率は設計波力(E6-B)すなわち引き波時に対応する波力作用時に生じている。端し圧は前述したようにフーチングを設け、また中詰め砂量を調節して軽減し

ているが、それでも押し波時(E6-A)81tf/m<sup>2</sup>, 引き波時(E6-B)79tf/m<sup>2</sup>と大きい。今回は地盤支持力を検討していないが、不足する場合には基部ケーソンを台形にする等の構造的改良が必要である。当構造では上半円形部の曲面壁および同側壁リブはプレストレストコンクリート製であるが、その他の部分は鉄筋コンクリート製である。

③ 透過壁式二重セル構造

当構造では伝達率が0.35程度となるように上部透過セルの外径R(堤体幅Bと同じ)と開口率εをそれぞれ40m, 0.25とあらかじめ決定した。また、法線方向の堤体長さDもセル外径Rと等しい40mとした。堤体の全高は57mとなり、このうち、上部透過セル部の高さが17m, 下部不透過セル部が20m, 基部ケーソン部が20mである。基部ケーソンには上半円形断面構造と同様に端し圧軽減のため幅2mのフーチングを設けている。空中時のコンクリート重量は法線方向の単位長さあたり864tf/m(34,568tf/函)と3構造中で最も軽量である。中詰め砂も含めた水中重量では945tf/m(37,782tf/函)である。基部ケーソン内は70%の中詰め状態で滑動、転倒に対する最小安全率はそれぞれ1.24, 1.62となっている。このうち滑動の最小安全率は上半円形断面構造と同様に引き波時(F2-B)に生じており、このときの滑動安定性が構造諸元決定に支配的である。端し圧は押し波時(F2-A)に72tf/m<sup>2</sup>と比較的大きい。当構造の部材は、下部不透過セルおよび上部透過セルがプレストレストコンクリート部材であるが、他は鉄筋コンクリート製である。

以上の3構造の安定性の検討より次のことが言える。透過性構造物では引き波時における安定性が支配的となることがあり、引き波時も押し波時と同様に検討を行う

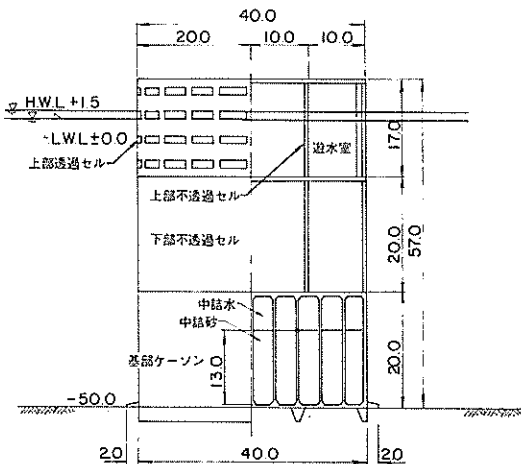


図-74 透過壁式二重セル構造の一般図

必要がある。上部半円形断面構造や透過壁式二重セル構造では端し圧が大きくなり、構造の改良等による端し圧の低減法や地盤支持力の検討が必要となる。上部半円形断面構造では端し圧は大きくなるものの、他の2構造と比較して堤体幅を小さくすることが可能である。

#### 5.4 合成滑動波力、波力モーメントおよび端し圧の時間変化

前節において、適宜選定した位相での設計波力に対する安定計算結果を示したが、本節ではその試設計構造諸元に対する合成滑動波力、波力モーメント、端し圧等の1周期の波の作用における時間変化を示す。ただし、作用波力は前節の場合と同じく、設計波の条件に最も近い実験条件で得られたデータを設計波諸元(周期14s, 波高16.2m)にあてはめて用いる。すなわち、水平板付立体骨組構造および上部半円形断面構造に対しては $T=2.12$ s,  $H=30$ cm, 透過壁式二重セル構造に対しては $T=2.37$ s,  $H=30$ cmの条件での全水平波力( $F_P$ ), 全鉛直波力( $F_V$ ), 後端および前端の回りの転倒モーメント( $M_B$ および $M_F$ )の無次元化した測定波形をそのまま設計波諸元に適用するものである。その際、試設計結果の構造諸元に対するこれらの算定は、付録中の式(8)~(11)に従った。

後端における端し圧 $p_B$ , 前端における端し圧 $p_F$ は地盤反力を台形あるいは三角形分布と仮定して、次式によって算定する。

$$\begin{aligned} \frac{1}{6} &\leq \frac{t_e}{B} \leq \frac{1}{2} \\ p_B &= \frac{4W_e}{3(B-2t_e)}, \quad p_F = 0 \\ -\frac{1}{6} &\leq \frac{t_e}{B} < \frac{1}{6} \\ p_B &= \frac{2W_e}{B} \left( \frac{1}{2} + \frac{3t_e}{B} \right) \\ p_F &= \frac{2W_e}{B} \left( \frac{1}{2} - \frac{3t_e}{B} \right) \\ -\frac{1}{2} &\leq \frac{t_e}{B} < -\frac{1}{6} \\ P_B &= 0, \quad p_F = \frac{4W_e}{3(B+2t_e)} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、

$$t_e = \frac{B}{2} - \frac{M_e}{W_e} \quad (5)$$

$$M_e = W \frac{B}{2} - M_B \quad (6)$$

$$W_e = W - F_V \quad (7)$$

であり、 $W$ は構造物の静水中重量、 $B$ は幅である。

図-75~77は各構造についての結果を示したもので

ある。図中上の四つの波形は $F_P, F_V, M_B, M_F$ の測定波形で、いずれも適当な構造諸元で割って、 $w_0 H$ の単位で示してある。それより下の波形が合成滑動波力等を示すもので、 $F_C$ は $\mu W$ ,  $M_B, M_F$ は $0.5 BW$ で割って無次元表示してある。 $W$ は堤体の水中重量であり、これらの値が1.0を超すと滑動あるいは転倒の安全率が1.0以下となることを表す。 $F_C$ は前出の式(3)により計算した合成滑動波力で、後方へ滑動させようとするときに正と定義し、堤体を押えつける波力が卓越する場合には0としている。また、堤体を持ち上げる力が作用しているときに水平波力の作用方向がかわるときには、 $F_C$ の定義により $F_C$ は不連続的に正から負あるいは負から正へ変化する。なお、摩擦係数 $\mu$ は0.6である。波力モーメントに対する $M_B/(0.5BW)$ ,  $M_F/(0.5BW)$ の値は前者に対しては $M_B$ が正、後者に対しては $M_F$ が負の場合についてのみ定義し、同一時間軸上に示してある。

端し圧 $p_B, p_F$ は適当な基準値 $p_a$ で割って、堤体中央からの地盤反力合力の作用点の距離 $t_e$ (後半部にあるときを正と定義)は $B$ で割ってそれぞれ無次元表示してある。ここに、 $p_a$ は試設計における最大端し圧に近い値として $80 \text{ tf/m}^2$ を与えている。また、図中の点線で結んだ縦線は前出の図-64~71に示した設計波力に対する位相時を表しており、以下、各構造別にこれらの位相時との関連を述べる。

#### ① 水平板付立体骨組構造(図-75)

本構造については波力が押し方向に働く状態を基部ケーソン前面に作用する波圧 $p_{CFP}$ が最大となる位相で代表させている(前出の図-64)。このときの位相を図中H1-Aで表示してあるが、全水平波力 $F_P$ のピーク値とは若干ずれが認められる。しかし、この位相は全鉛直波力のピーク時にも近く、これらの合成結果である $F_C/\mu W$ や $M_B/(0.5BW)$ のピーク値に一致している。すなわち、滑動および転倒に最も危険な位相に対応していることが確認できる。しかしながら、後端での端し圧 $p_B$ はこの位相よりもやや遅れてピークとなっており、適切な位相となっていない。これは $F_V$ や $M_F$ の変化から知られるように主として構造の後半部で全体を鉛直下向きに押える力が発生することによるが、この場合、端し圧にピーク値をとってもそれほど大きくないので実際上は問題ない。

一方、引き波時は基部ケーソン前面での波圧が負のピークとなる位相で代表されており(図-65)、図中これをH1-Bで表示してある。この場合、 $F_C/\mu W$ や $p_F/p_a$ のピークとややずれが認められるが、その差は小さい。

このほか、本構造では上部構造に働く上向きの波力が

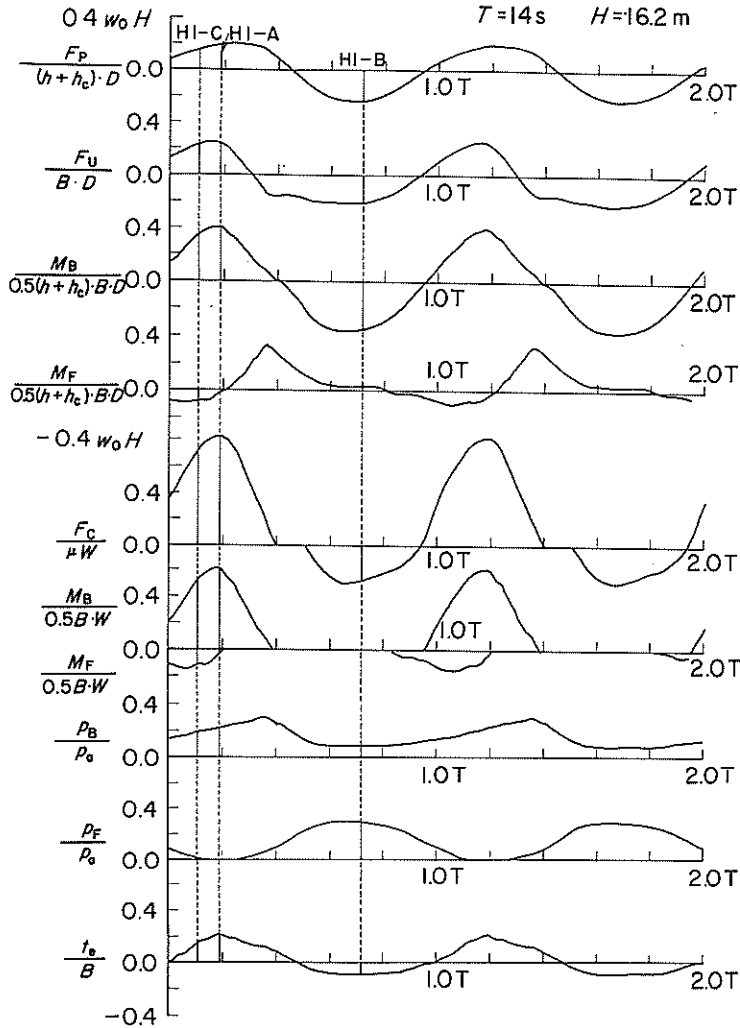


図-75 安定性の時間変化 (水平板付立体骨組構造)

最大となるときの波力分布 (図-66) を与えており、この位相時をH1-Cで表示してある。このとき、合成滑動波力や波力モーメントは後方へ作用しているときであるが、いずれもH1-Aの位相時に比較してやや小さく、省略してよいことが知られる。

以上、水平板付立体骨組構造の滑動合成波力等の時間的変化と試設計で用いた波力の位相関係を見たが、当構造では滑動、転倒とも押し方向が卓越しており、このときの波力は前出の図-64の分布(H1-A)に対し検討すれば十分であることが確認された。端し圧については必ずしもピーク時を与えていないけれども、この場合、それほど大きくないので問題はない。

② 上半円形断面構造 (図-76)

当構造では設計波力として上部構造に働く平均水平波力  $f_{EXT}$  の正のピーク値 (前出図-67) および負のピーク時 (前出図-68) の位相における分布を与えた。これらの位相を図中にE6-A、E6-Bで表示してあるが、これらは全水平波力  $F_p$ 、後端および前端における転倒モーメント  $M_B, M_F$  の正および負の時とはほぼ一致している。全鉛直波力  $F_U$  は1周期の間に2度の正 (負) の増加率を示す変化をしており、この負のピーク時がE6-Bの位相と一致している。 $F_U$  のE6-Aの位相直後における負のピークは越波による下向きの波力によるものであり、その後の増加部は越波水によって堤体背後の水位が上昇するために生じるケーソン底面の揚圧力の増加によるものである。これと  $F_p$  の合成波力である合成

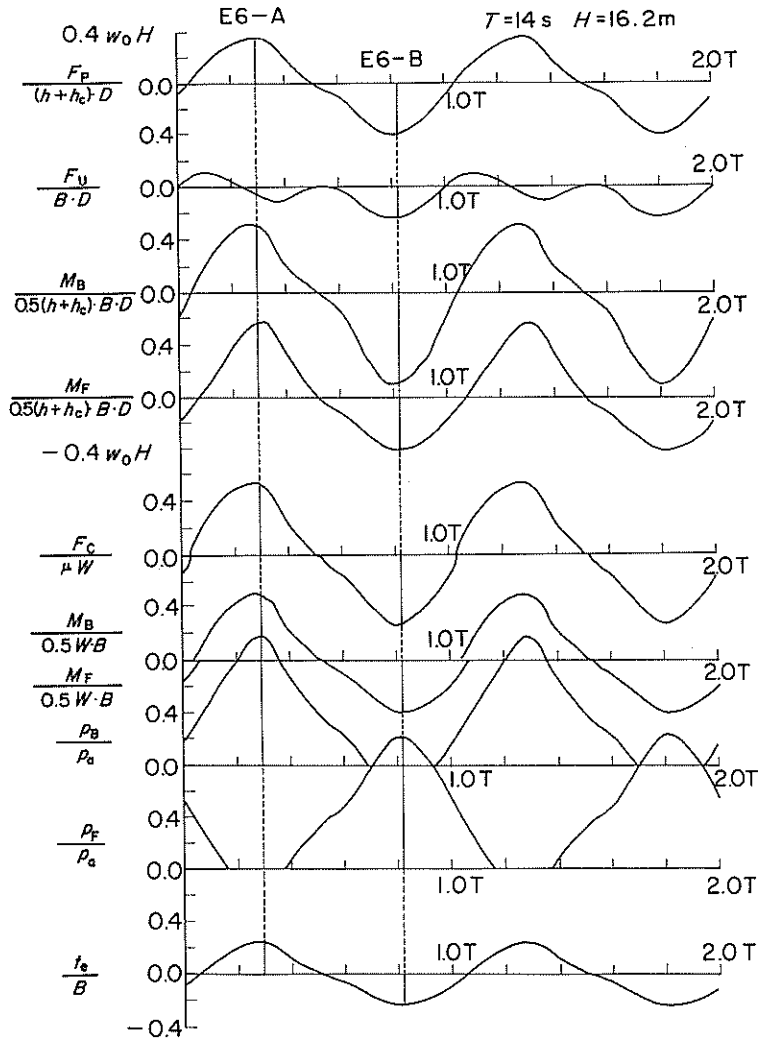


図-76 安定性の時間変化(上部半円形断面構造)

滑動波力を表す  $F_C / \mu W$  は  $F_P$  とほぼ同位相で変化している。押し波および引き波におけるピーク時はそれぞれ E6-A, E6-B の位相とほぼ一致しており、その大きさもほぼ等しい。転倒モーメントは堤体を後方へ転倒させるモーメントが卓越しているが、引き波時に前方へ転倒させるモーメントも比較的大きい。後端および前端における端し圧のピーク時もそれぞれ E6-A, E6-B の位相に一致しており、約  $80 \text{ tf/m}^2$  の端し圧が生じている。

地盤反力の合力の作用位置を示す  $t_e / B$  は正および負のピーク時でそれぞれ  $1/6$ ,  $-1/6$  を越えており、その変化は比較的大きいが、正、負に関してほぼ対称であり、 $P_B$ ,  $P_F$  のピーク値がほぼ同程度の大きさであることを

考慮すると、地盤に対して前後に対称な応力履歴を与えらるると言える。

以上示したように、当構造では合成滑動波力や波力モーメントおよび端し圧のピーク時が前出の図-67, 68 に示した波力分布の位相(E6-A, E6-B)とほぼ一致しており、これらの位相における検討が必要であることがわかる。

### ③ 透過壁式二重セル構造(図-77)

当構造では設計波力として上部構造に働く平均水平波力  $f_{EXT}$  の正のピーク時(前出図-69)および負のピーク時(前出図-70)と、上部透過セルに働く平均水平波力  $f_{SX}$  の正のピーク時(前出図-71)の3位相における分布を与えた。これらの位相を図中に F2-A, F2-B, F2-C で表示してある。全水平波力  $F_P$  の押し波および

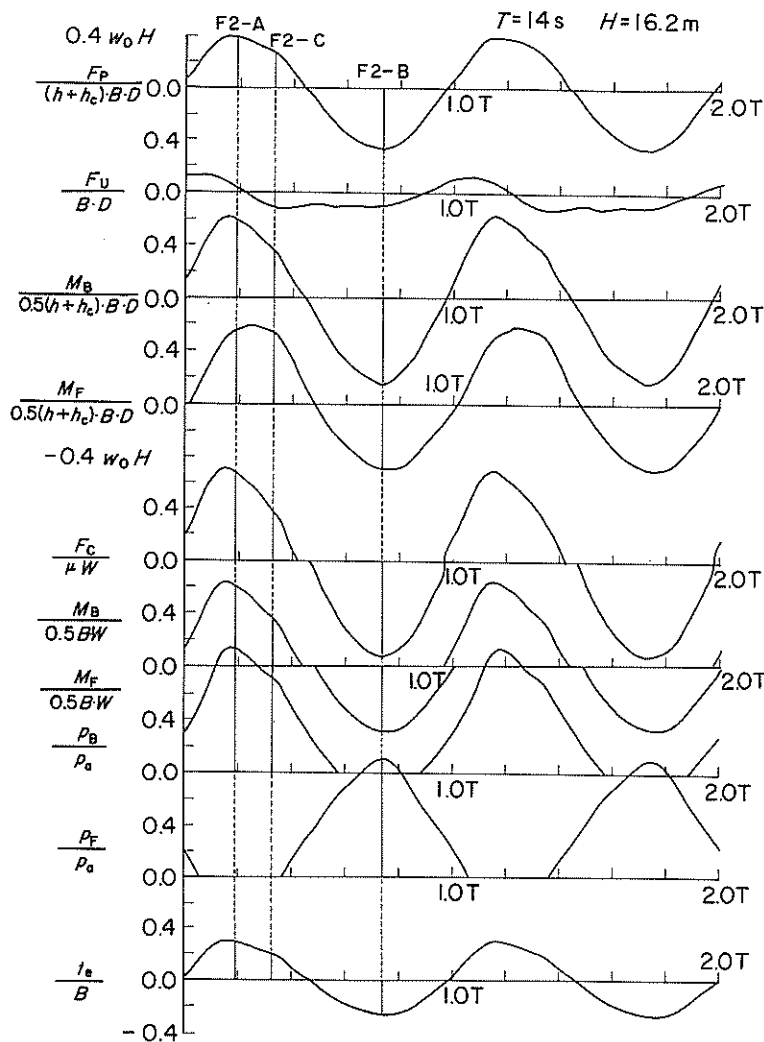


図-77 安定性の時間変化 (透過壁式二重セル構造)

び引き波のピーク時はそれぞれF2-A, F2-Bの位相とはほぼ一致しており、引き波時のほうが若干大きい。全鉛直波力 $F_v$ は負すなわち堤体を押しつける力の作用時間のほうが長く、F2-Aの位相ではほぼ0、F2-Bの位相では負である。このため、合成滑動波力を表す $F_c / \mu W$ のピーク値は押し波時と引き波時がほぼ等しくなっている。押し波時の滑動および転倒に対してはF2-Aの位相より若干早く最も危険な状態が生じているが、このときの $F_c / \mu W$ 、および $M_B / (0.5BW)$ の値はF2-Aの位相におけるこれらの値と大きく異なっておらず、F2-Aの位相における波力分布を用いて充分であると言える。引き波時では滑動、転倒ともF2-Bの位相にて最も危険な状態が生じており、合成滑動波力 $F_c$

は押し波時と同程度である。端し圧のピークは後端でF2-A、前端でF2-Bの位相で生じており、その大きさは両者ほぼ等しくかつ大きい。上部半円形断面構造よりは若干小さい。地盤反力合力の作用位置を表す $te/B$ は $1/6$ 、 $-1/6$ を越えており、押し波時には $p_F$ が、引き波時には $p_B$ が0となっている。 $te/B$ の変化は上部半円形断面構造と同様に正、負がほぼ対象的に変化しており、地盤の前後方向に対してはほぼ対称な応力履歴を及ぼすと言える。

F2-Cの位相は遊水室内に最も水塊が流入しているときであるため、 $F_v$ の負すなわち堤体を押しつける力が最大となる位相とはほぼ一致しているが、滑動、転倒、端し圧とも最も危険な状態ではなく、全体の安定に関して



は特に考慮する必要がないと言える。

以上、全水平波力  $F_P$ 、全鉛直波力  $F_U$ 、波力モーメント  $M_B$  および  $M_F$ 、合成滑動波力  $F_C$ 、端し圧  $p_B$  および  $p_F$  等の時間変化について述べたが、最後に試設計条件における各構造ごとの  $F_P$ 、 $F_U$ 、 $F_C$  のピーク値を以下にまとめて示す。なお、 $F_C$  については  $F_P$  と同様に水平方向の見掛けの投影面積に作用する平均波力強度に換算して示す。

水平板付立体骨組構造：

$$F_P = (0.21 \sim -0.23) w_0 H (h+hc) D$$

$$F_U = (0.26 \sim -0.23) w_0 H B D$$

$$F_C = (0.33 \sim -0.21) w_0 H (h+hc) D$$

上部半円形断面構造：

$$F_P = (0.36 \sim -0.41) w_0 H (h+hc) D$$

$$F_U = (0.12 \sim -0.23) w_0 H B D$$

$$F_C = (0.34 \sim -0.32) w_0 H (h+hc) D$$

透過壁式二重セル構造：

$$F_P = (0.39 \sim -0.46) w_0 H (h+hc) D$$

$$F_U = (0.14 \sim -0.13) w_0 H B D$$

$$F_C = (0.42 \sim -0.41) w_0 H (h+hc) D$$

ここに示すように、全水平波力では負（引き波時）のピーク値が正（押し波時）より大きい、合成滑動波力では正（押し波時）のピーク値が大きい。試設計条件における合田式による平均水平波力と平均揚圧力はそれぞれ  $0.54 w_0 H$ 、 $0.19 w_0 H$  であり、これらに対する比では、水平板付立体骨組構造が 0.39、1.37、上部半円形断面構造が 0.67、0.63、透過壁式二重セル構造が 0.72、0.74 である。これより、4.5でも述べたように各構造とも水平波力は小さい構造であることがわかる。

## 6. あとがき

本研究の結果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 水平板構造では、水平板下面と基部ケーソン上面に作用する平均波圧は振幅および位相が同じである。この特徴は水平板付立体骨組構造や上部半円形断面構造の通水部においても同様である。水平板に働く鉛直波力は平均波力強度にして、上向きで  $0.50 w_0 H$ 、下向きで  $0.25 w_0 H$

程度である。

② 水平板付立体骨組構造の骨組部に働く水平波力は小さく、構造全体に作用する水平波力は基部ケーソン前面に作用する波圧が支配的である。水平板に働く鉛直波力は上向き、下向きとも  $0.30 w_0 H$  程度であり、骨組部材の影響により水平板構造（骨組部材なし）より上向き波力は減少、下向き波力は増大する。

③ 上部半円形断面構造の上部構造に作用する平均水平波力の押し方向最大値は周期の長い波ほど大きく、 $T = 2.55$  s の波に対して  $0.49 w_0 H$  程度である。引き方向最大値は周期の影響はなく、 $0.37 w_0 H$  程度である。上部構造に作用する鉛直波力は上部半円形部の曲面壁に作用する波力に起因しており、下向きに平均波力強度で  $0.30 w_0 H$  程度の波力が作用する。また、上部半円形部のみに作用する水平波力は投影方向の作用面積に対する平均波力強度に換算して  $0.50 w_0 H$  程度であり、作用面積の違いを考慮すれば鉛直下向きの成分がやや卓越している。

④ 透過壁式二重セル構造の上部構造に作用する平均水平波力の押し方向最大値は周期の長い波ほど大きく、 $T = 2.85$  s の波に対して  $0.46 w_0 H$  程度である。引き方向最大値は  $0.42 w_0 H$  程度である。当構造では、基部ケーソン上面およびセル内部の遊水室底面に波圧が働くため、押し波時には、基部ケーソン底面に働く揚圧力を打ち消す方向の鉛直波力が生じ、上部構造に働く下向きの最大値は  $0.31 w_0 H$  程度である。このときは、遊水室内に最も多くの水塊が入ったときに対応し、この水塊が後側の上部透過セルを透過して堤体背後へ流出するため、上部透過セル全体に作用する水平波力は最大となる。

⑤ 基部ケーソンを含めた各構造に働く全水平波力は、不透過な直立壁に対する合田式による波力に比べていずれも小さく、試設計条件 ( $T_{1/3} = 14$  s,  $H_{1/3} = 9$  m,  $H_{\max} = 16.2$  m) では水平板付立体骨組構造が 0.39、上部半円形断面構造が 0.67、透過壁式二重セル構造が 0.72 倍に減じる。ただし、いずれの構造においても引き波時の波力のほうが、押し波時の波力よりもやや大きく、これは大水深における透過性構造物に働く波力の一つの特徴のようである。

⑥ 全鉛直波力の上向きの最大値は、同じ底幅に対する合田式による全揚圧力に比べて、水平板付立体骨組構造で 1.37 倍に増加し、上部半円形断面構造、透過壁式二重セル構造ではそれぞれ 0.63 倍、0.74 倍に減じる。また、各構造には位相によって下向きの波力、すなわち構造物全体を押える力が働き、特に上部半円形断面構造では上向き波力の 1.9 倍にもなって、下向きの波力が卓越する。

⑦ 構造全体に働く全水平波力と全鉛直波力は一般に位相

が異なり、上部半円形断面や透過壁式二重セル構造では、水平波力最大時に鉛直波力は0か、やや下向きの波力が働く。水平板付立体骨組構造の場合は位相差は小さいが、このときには水平波力小さい。滑動に対して全水平波力と全鉛直波力の合成効果を考慮した合成滑動波力は、水平方向の投影面積に換算した平均波力強度で、押波時に水平板付立体骨組構造  $0.33 w_0 H$ 、上部半円形断面構造  $0.34 w_0 H$ 、透過壁式二重セル構造  $0.42 w_0 H$  である。引き波時には水平板付立体骨組構造では小さいが、他の2構造では押し波時と同程度である。

⑧ 試設計の結果では、水平板付立体骨組構造はL.W.L. 下3mに水平板を設け、1箇所あたり幅50m、延長50m、全高55mで基部ケーソンの高さを18mとして(コンクリート空中重量1009 tf/m)，ケーソンを水張りのままとしても十分に安定であり、端し圧は29 tf/m<sup>2</sup>と小さい。全体の安定性の面からは問題ないが、構造上コンクリート重量が大となり、現在の技術では工費が安くならないという難点がある。

⑨ 上部半円形断面構造は幅35m、延長50m、全高58mで、基部ケーソンの高さを20mとして(コンクリート空中重量955 tf/m)，80%を中詰めした状態でも滑動安全率1.60、転倒安全率1.74で充分安定である。ただし、底面に幅2mのフーチングを設けても端し圧は81 tf/m<sup>2</sup>となり、地盤支持力によっては基部ケーソンを台形にする等の改良が必要である。

⑩ 透過壁式二重セル構造は幅40m、延長40m、全高57mで、基部ケーソンの高さを20mとし(コンクリート空中重量864 tf/m)，70%を中詰めした状態で、滑動安全率1.24、転倒安全率1.61と安定である。端し圧は72 tf/m<sup>2</sup>と比較的大きい。

本研究は3種の波浪制御構造物について可能性を検討するための波力特性を明らかにすることを目的とし、実施したものである。これまでの成果に基づき、透過壁式二重セル構造を現時点での最適構造として選定しているが、これの実用化に対しては不規則波力の解明、洗掘対策の検討、構造設計法、基礎地盤支持力等の設計上の問題、さらには施工法など多くの課題が残されている。

本実験の遂行、データ整理等については昭和59年度研修員道下勲氏(五洋建設株式会社)の協力を得た。ここに記して感謝する次第である。

なお、本研究は科学技術振興調整費による「海洋構造物による海洋空間等の有効利用に関する研究」の一環として実施したものである。

(1985年9月30日受付)

## 参考文献

- 1) 谷本勝利・吉本靖俊・高橋重雄：大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その1) - 透過性構造(海底設置型)の反射および伝達特性に関する不規則波実験一, 港湾技研資料, No. 516, 1985年, 39p.
- 2) 谷本勝利・吉本靖俊・道下 勲：大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その2) - 断続的に構造物を設置する場合の伝達率一, 港湾技研資料, No. 526, 1985年, 42p.
- 3) 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年, pp. 3~53
- 4) 前出1)に同じ
- 5) 前出2)に同じ

## 主要記号一覧

$B$	: 堤体幅
$D$	: 法線方向の堤体幅
$d'$	: 水平板上面の深さ(水平板付立体骨組構造), 上部半円形部下端の深さ(上部半円形断面構造), 遊水室内水深(透過壁式二重セル構造)
$F_C$	: 合成滑動波力
$F_{FXT}$	: 上部構造水平波力
$F_{FZT}$	: 上部構造鉛直波力
$F_P$	: 全水平波力またはそのピーク値
$F_V$	: 全鉛直波力またはそのピーク値
$f_{FXT}$	: 上部構造平均水平波力またはそのピーク値
$f_{FZT}$	: 上部構造平均鉛直波力またはそのピーク値
$f$	: 部材に作用する平均波力またはそのピーク値(添字で部材名を示す)
$L$	: 波長
$M_B$	: 堤体後端における全転倒モーメントまたはそのピーク値
$M_F$	: 堤体前端における全転倒モーメントまたはそのピーク値
$M_T$	: 上部構造後端における上部構造転倒モーメント
$p$	: 部材に作用する波圧またはそのピーク値(添字で測点名を示す)
$p_B$	: 後端における端し圧
$p_F$	: 前端における端し圧
$R$	: 上部半円形断面構造の上部半円形部の曲率半径あるいは透過壁式二重セル構造の上部透過セ

ルの曲率外半径  
 $T$  : 周期  
 $t_e$  : 地盤反力合力の作用点  
 $W$  : 堤体 1 函あたりの水中重量  
 $\epsilon$  : 透過壁の開口比  
 $\mu$  : 摩擦係数

## 付 録

### A. 全波力の測定法

#### A. 1. 全波力測定装置の概要

模型堤体に作用する全波力の測定法の一つとして、従来から模型を多分力検出器に直接固定する方法がとられてきた。この方法では主として1台の多分力検出器が用いられており、模型は受圧面に直接固定（1点支持）されるため模型に衝撃的な波力が作用するときには多分力検出器を含めた測定系の動的応答が問題となることがあった。

本実験で使用する模型は比較的大きいため、模型自体の重量が大きくなり固有振動数の低下が予想される。また、模型に作用する波力も大きくなるため従来の方法ではモーメントに対するうでの長さが大きくなり、模型の回転運動が生じる恐れがある。そこで、これらを防ぐ方法として複数個の多分力検出器で構成される全波力測定装置を採用した。

全波力測定装置の外観については本文中の図-7、写真-1に示した。当装置は基部ケーソン内に設置する形式であり、方形に配置した4台の二分力検出器の受圧面上に模型の上部構造を固定（4点支持）して上部構造に作用する水平波力、鉛直波力を測定するものである。鉛直波力については、水平板付立体骨組構造や上部半円形断面構造のように基部ケーソン上面にも波力を受ける構造ではこれも含めて測定される。基部ケーソンの前後面や底面に作用する波力については別途測定する必要がある。

当装置は4台の二分力検出器と、これを模型に連絡する荷重伝達用ジグ、および二分力検出器を固定する水平板から構成される。二分力検出器は波の進向方向（X軸）および鉛直方向（Z軸）に作用する力を検出するものであり、荷重伝達用ジグはヒンジ構造となっており模型に作用する水平力および鉛直力のみを検出器の受圧面に伝達するものである。また、水平板は4台の二分力検出器受圧面（荷重伝達用ジグ上面）を同一平面内に保持するために使用されるものである。これらの仕様は以下のとおりである。

#### (i) 二分力検出器

型 式	: LMC-2505-150-W (日章電気株式会社)
定格負荷	: $F_x$ 150kg $F_z$ 150kg
定格出力	: 各分力とも約 $1000 \times 10^6$
非直線性	: " $\pm 0.5\%$ / FS
ヒステリシス	: " $\pm 0.5\%$ / FS

許容過負荷: 各分力とも  $\pm 150\%$  / FS

干 渉 度 : 計測分力間の干渉度

各分力とも  $\pm 2\%$  FS / FS

$F_y = 150$  kg による干渉度

各分力とも  $\pm 2\%$  FS

$M_y, M_x = 25$  kgm による干渉度

各分力とも  $\pm 3\%$  / FS

構 造 : 防水密閉構造

形 状 : 全高 200 mm

直径 170 mm (本体部)

140 mm (受圧面)

ばね定数 :  $k_{FX}$  5000 kg/mm

$k_{FY}$   $5.0 \times 10^4$  kg/mm

$k_{FZ}$  6000 kg/mm

$k_{MX}$   $1.4 \times 10^5$  kgm/rad

$k_{MY}$   $1.6 \times 10^6$  kgm/rad

$k_{MZ}$   $7.5 \times 10^5$  kgm/rad

較正值 : 50 kg

#### (ii) 荷重伝達用ジグ

材 質 : ステンレス

構 造 : スフェリカル (ヒンジ部)

形 状 : 全高 60 mm 直径 145 mm

#### (iii) 水平板

材 質 : ステンレス

形 状 : 940mm × 700mm × 30mm

### A. 2. 全波力の算定法

#### ① 上部構造のみに作用する全波力

上部構造に作用する水平波力、鉛直波力および上部構造の後端まわりの転倒モーメントの算定法を示す。

水平波力 ( $F_{EXT}$ ) は式 (1) に示すように個々の二分力検出器が検出する水平波力の和をとれば良い。鉛直波力 ( $F_{FZT}$ ) も同様に考えれば良いが、当装置のように水中の基部ケーソン内に設置される場合には基部ケーソン内に生じる圧力変動を考慮しなければならない。基部ケーソン内の圧力変動を事前に調べた結果によると、基部ケーソン内はパスカルの原理が成り立ち、基部ケーソン内のどの地点にても同じ大きさ、同じ位相で圧力は変化していた。したがって、基部ケーソン内の1か所にて圧力変動を測定しておけば充分である。本実験では基部ケーソン中央に被圧計を1台入れ、これにて測定した圧力  $p_{CIF}$  を用いて式 (2) より鉛直波力を算定した。ここで、 $B$ 、 $D$  はそれぞれ堤体幅、法線方向堤体幅である。上部構造の後端まわりの転倒モーメント ( $M_T$ ) も二分力検出器が検出する波力および基部ケーソン内の圧

力を用いて式(3)に示すように求めることができる。

$$F_{FXT} = F_{FX} + F_{BX} \quad (1)$$

$$F_{FZT} = F_{FZ} + F_{BZ} - p_{CIP} B D \quad (2)$$

$$M_T = F_{FZ} l_{FX} + F_{BZ} l_{BX} - (F_{FX} + F_{BX}) l_Z - \frac{1}{2} p_{CIP} D B^2 \quad (3)$$

ここに、

$$F_{FRX} = F_{FRX} + F_{FLX} \quad (4)$$

$$F_{BRX} = F_{BRX} + F_{BLX} \quad (5)$$

$$F_{FRZ} = F_{FRZ} + F_{FLZ} \quad (6)$$

$$F_{BRZ} = F_{BRZ} + F_{BLZ} \quad (7)$$

また、 $F_{FRX} \sim F_{BLX}$  および  $F_{FRZ} \sim F_{BLZ}$  は本文中の図-7 および付表-1中に示すように各二分力検出器が測定する波力成分であり、水平波力に関しては波の進行方向、鉛直波力については鉛直上向きを正とする。また、転倒モーメントは波の進行方向に転倒させるモーメントを正とする。基部ケーソン内の変動圧力  $p_{CIP}$  は上部構造を押しあげる力が作用するときが正である。 $l_{FX}$ 、 $l_{BX}$ 、

$l_Z$  は 付図-1に示すように上部構造後端(O点)から荷重伝達用ジクのヒンジまでの水平距離、鉛直距離である。

### ② 堤体全体に作用する全波力

基部ケーソン(ケーソン高  $h_B$ ) も含めた構造全体に対する全波力の算定は基部ケーソン前面波圧  $p_{CFP}$ 、および後面波圧  $p_{CBP}$  を用いて以下のように行う。なお、基部ケーソン底面に作用する揚圧力としては前端で  $p_{CFP}$ 、後端で  $p_{CBP}$  の圧力強度を持ち、前端から後端にかけて直線的に変化する圧力分布を与えた。このとき全水平波力( $F_P$ )、全鉛直波力( $F_U$ )、堤体後端  $O_B$  まわりの全転倒モーメント( $M_B$ )、および堤体前端  $O_F$  まわりの全転倒モーメント( $M_F$ )はそれぞれ式(8)~(11)で与えられる。

$$F_P = F_{FXT} + (p_{CFP} - p_{CBP}) h_B D \quad (8)$$

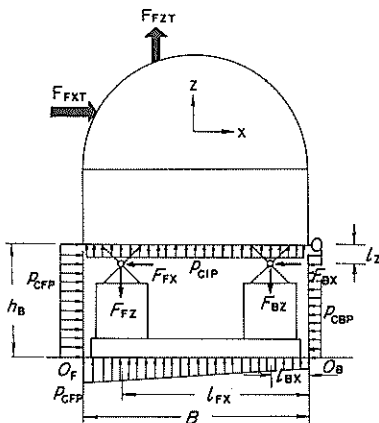
$$F_U = F_{FZT} + \frac{1}{2} (p_{CFP} + p_{CBP}) B D \quad (9)$$

$$M_B = M_T + F_{FXT} h_B + (p_{CFP} - p_{CBP}) \frac{h_B^2}{2} D + \frac{1}{6} (2p_{CFP} + p_{CBP}) B^2 D \quad (10)$$

$$M_F = M_T + F_{FXT} h_B + (p_{CFP} - p_{CBP}) \frac{h_B^2}{2} D - \frac{1}{6} (p_{CFP} + 2p_{CBP}) B^2 D - F_{FZT} B \quad (11)$$

付表-1 全波力測定装置の構成

測定項目	測点位置		測点名
全波力測定装置 分力	基部ケーソン内 前 左	水平方向	FLX
		鉛直方向	FLZ
	前 右	水平方向	FRX
		鉛直方向	FRZ
	後 左	水平方向	BLX
		鉛直方向	BLZ
	後 右	水平方向	BRX
		鉛直方向	BRZ
基部ケーソン内圧	基部ケーソン内中央	CIP	

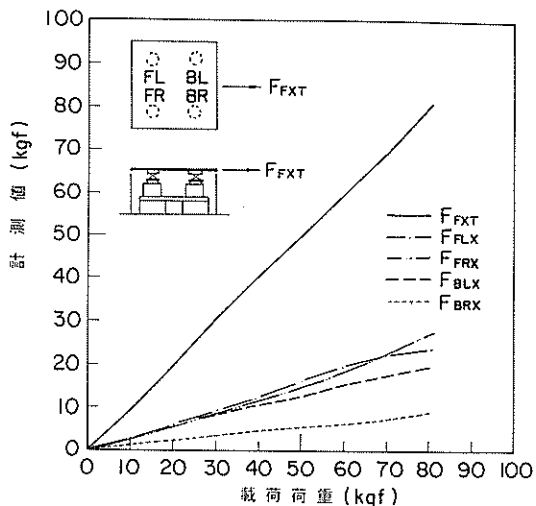


付図-1 全波力測定装置への作用波力

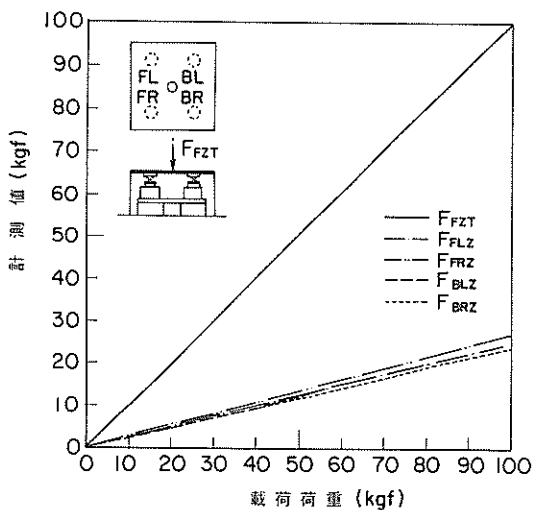
### A. 3. 全波力測定装置の特性

全波力測定装置の特性について検討した結果を以下に示す。付図-2,3はそれぞれ空中で全波力測定装置の上に1枚の鋼板(100cm×100cm×0.8cm, 約80kg)を載せて強固に固定し、これに水平力、鉛直力をそれぞれ板中央、板前端中央に作用させたときの各二分力検出器の計測値を示したものである。実線はそれぞれ式(1),(2)で求まる全水平力、全鉛直力である。空中ゆえ  $p_{CIP}$  は0とする。両者とも全水平力、全鉛直力の計測値は非常に良く載荷荷重と一致していることがわかる。ただ、水平力の分力成分については二分力検出器によりその測定値の若干の差があるが、これは鋼板の受圧面への固定法(ボルトの締め付け順序、締め付け強度等)の違いや、載荷方向の若干の差異による影響と考えられる。

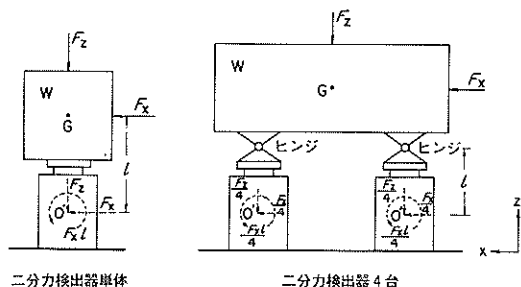
次に、全波力測定装置の固有振動数の算定法を示す。付図-4左は単一の二分力検出器に固定された模型の重心Gに水平力  $F_x$  (X方向) が作用したときである。このときの外力は二分力検出器のモーメントセンターO'に作用する等価な外力すなわち水平力  $F_x$ 、およびモーメント  $F_x l$  に置き換えることができ、これらによる模型重心Gの水平変位  $X_G$  は式(12)で表される。



付図-2 水平力の検定



付図-3 鉛直力の検定



付図-4 二分力検出器への作用外力

$$X_G = X_F + X_M \quad (12)$$

$$X_F = F_X / k_{FX} \quad (13)$$

$$X_M = F_X l^2 / k_{MY} \quad (14)$$

ここで、 $X_F$ 、 $X_M$ はそれぞれ水平力 $F_X$ による $X$ 方向変位、モーメント $F_X l$ による回転によって生じる $X$ 方向変位である。また、 $k_{FX}$ 、 $k_{MY}$ はそれぞれ二分力検出器の水平方向( $X$ 方向)のばね定数、および $Y$ 軸まわりのばね定数である。このとき測定系全体の $X$ 軸方向ばね定数 $k_X$ は次式で与えられ、測定系の固有振動数 $F_{NX}$ は式(16)で求まる。

$$k_X = F_X / X_G = 1 / \left( \frac{1}{k_{FX}} + \frac{l^2}{k_{MY}} \right) \quad (15)$$

$$F_{NX} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_X g}{W}} \quad (16)$$

ここで、 $W$ は模型の重量および付加質量に相当する重量をまとめて示したものであり、 $g$ は重力加速度である。また、鉛直方向( $Z$ 軸方向)の固有振動数 $F_{NZ}$ は、この方向の変位が鉛直力のみによって生じるため鉛直方向のばね定数 $k_{FZ}$ ( $=k_Z$ )を用いて式(17)で与えられる。

$$F_{NZ} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_Z g}{W}} \quad (17)$$

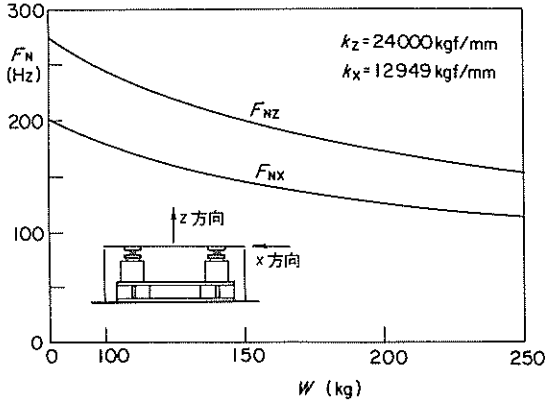
全波力測定装置のように4台の二分検出器でヒンジを介して模型を固定する場合(同図右)には、鉛直方向外力に対するばね定数は単体時の4倍を考えてやればよい。また、水平方向外力に対しては各ヒンジに均等かつ同位相で外力が伝達されると考えるならば模型自体の回転は生じないため鉛直方向外力に対するのと同様に水平方向のばね定数を単体時の4倍とすれば良い。また、このとき各二分力検出器に作用するモーメントを求めるとき必要となるのはヒンジからモーメントセンター $O'$ までの距離を用いる。なお、水平力作用時には、偶力モーメントによる鉛直方向力も発生し、これによる鉛直方向の連成振動を生じるがここではこれは考慮していない。

以上のように考えることにより、全波力測定装置の水平方向( $X$ 軸方向)および鉛直方向( $Z$ 軸方向)の固有振動数 $F_{NX}$ および $F_{NZ}$ はそれぞれ式(18)、(19)で求めることができる。

$$F_{NX} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4k_X g}{W}} \quad (18)$$

$$F_{NZ} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4k_Z g}{W}} \quad (19)$$

付図-5は式(18)、(19)から求める全波力測定装置の水平方向固有振動数、鉛直方向固有振動数を示したもの



付図-5 全波力測定装置の固有振動数

である。このときのばね定数等は前出の次の値を用いた。

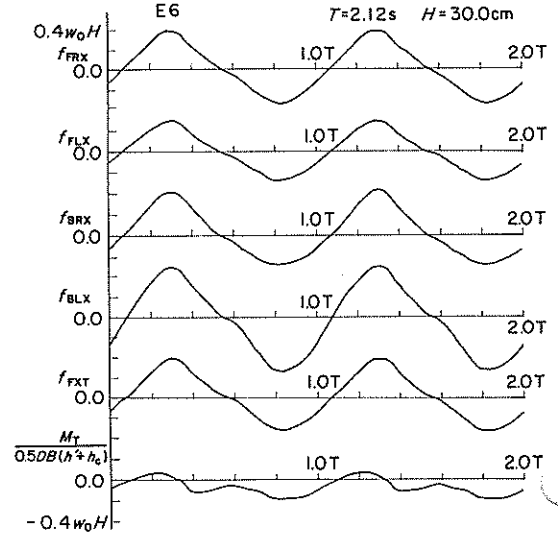
$$\begin{aligned}
 k_{FX} &= 5000 \text{ kg/mm} \\
 k_{FZ} &= 6000 \text{ kg/mm} \\
 k_{MY} &= 1.6 \times 10^6 \text{ kgm/rad} \\
 l &= 132 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

同図から、鉛直方向の固有振動が水平方向より大きく、かつ $W$ が増すにつれ減少していることがわかる。特に、 $W = 200 \text{ kg}$ 程度では水平方向の固有振動数は約125 Hz、鉛直方向の固有振動数は約170 Hzである。

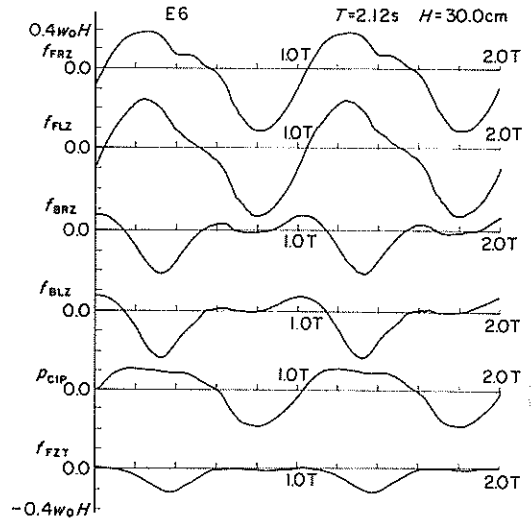
#### A.4 全波力測定例

全波力測定装置を用いて全波力を測定した例を付図-6(1)、(2)に示す。同図は上部半円形断面構造(E6)に周期2.12 s、波高30 cmの波が入射したときのものである。 $f_{FRX} \sim f_{BLX}$ および $f_{FRZ} \sim f_{BLZ}$ は個々の二分力検出器が検出する水平力および鉛直力であり、ともに水平力および鉛直力の作用方向投影面積の1/4の面積あたりに作用する平均波力強度で表示している。 $p_{CIP}$ は基部ケーソン内の変動圧力である。 $f_{FXT}$ 、 $f_{FZT}$ は前出の式(1)、(2)および本文中の式(1)、(2)に従って求めた投影面積あたりの平均水平波力強度および平均鉛直波力強度である。 $M_T$ は前出の式(3)より求めた上部構造後端における転倒モーメントであり、 $0.5DB(h'+h_c)$ で除した値を示している。

水平波力に関しては $f_{FRX}$ 、 $f_{FLX}$ 、 $f_{BRX}$ 、 $f_{BLX}$ がほぼ同じ大きさで、かつ同位相で変化していることがわかる。しかし、鉛直波力については水平波力による偶力モーメントの影響により、波の入射側の二分力検出器による鉛直波力 $f_{FRZ}$ 、 $f_{FLZ}$ と、反射側の二分力検出器による鉛直波力 $f_{BRZ}$ 、 $f_{BLZ}$ は位相が約 $180^\circ$ 異なっている。



付図-6(1) 全波力の測定例(1)



付図-6(2) 全波力の測定例(2)

基部ケーソン内の圧力 $p_{CIP}$ は約 $-0.35 \sim 0.20 w_0H$ の圧力変動が生じている。

#### B. 部材波力の測定法

部材に作用する波力の測定には、部材に波圧計を埋めこみ受圧面に作用する波圧を直接測定する方法と、部材にひずみゲージを貼り付け、部材表面に生じるひずみ量から波力を推定する方法の2方法を採用した。

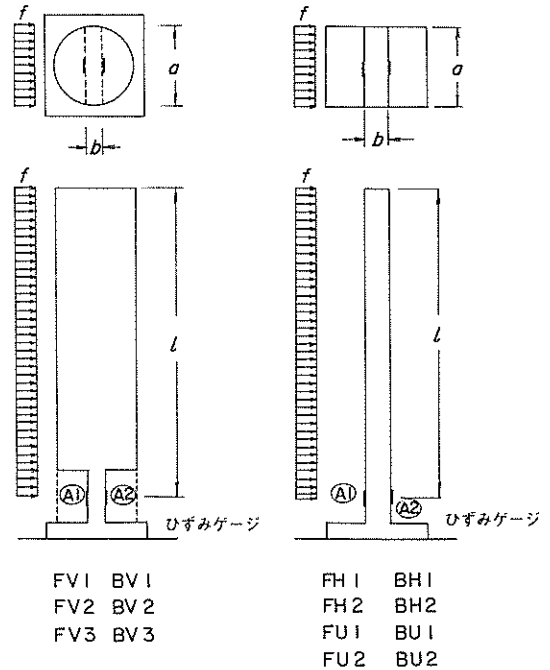
前者の方法で使用した波圧計は容量が100または200  $\text{gf}/\text{cm}^2$ 、受圧面の直径28mmの小型波圧計と容量100または200  $\text{gf}/\text{cm}^2$ 、受圧面直径10mmの超小型半導体波圧計である。小型波圧計は固有振動数が約800 Hz、減衰定数が0.01程度であるため衝撃的な波圧が作用するときにはその動的応答特性により真の値より大きめ、あるいは小さめの値を計測することがある。本実験では小型波圧計を静的な力が作用する基部ケーソン部のみに用いており、このような現象は生じていない。超小型半導体波圧計は固有振動数が約3000 Hz程度であり、衝撃的な波力も十分測定可能である。

一方、ひずみゲージを用いて部材ひずみから作用波力を推定する方法について各構造ごとに示す。

①水平板付立体骨組構造：当構造を構成する立体骨組部材に作用する波力を測定するため、立体骨組部材最前列および最後列の合計14部材について部材ひずみを測定した。付図-7および付表-2はこのときの部材形状および部材諸元を示すものである。同図に示すように、各部材は1端が固定され、他端が自由の片持梁形式であるが、固定端で計測しうる程度の曲げひずみを生じさせるため、円形断面の鉛直材（FV1～FV3、BV1～BV3）では固定部の部材厚を薄くしており、また円形断面の水平部材（FH1、FH2、FU1、FU2、BH1、BH2、BU1、BU2）も固定部から自由端までの全長にわたって部材厚を薄くしている。これらの部材の水中での固有振動数は鉛直部

材では48～110 Hzとやや低いが、水平部材では203～278 Hzと比較的大きい。

これらの部材に作用する波力としては付図-7に示すように、投影面積に一律に分布する波力分布を仮定し、



付図-7 水平板付立体骨組構造の波力測定部材

付表-2 水平板付立体骨組構造の波力測定部材

部材名	部材厚 $b$ (cm)	部材幅 $a$ (cm)	部材長* $l$ (cm)	$I$ ( $\text{cm}^4$ )	$E$ ( $\times 10^7 \text{gf}/\text{cm}^2$ )	固有振動数 (水中) $f_N$ (Hz)	減衰定数 $\beta$
FV1	1.18	4.00	9.85	0.5477	3.56	109.9	0.072
FV2	1.22	3.99	17.10	0.5964	3.46	52.0	0.046
FV3	1.23	4.00	17.80	0.6128	3.59	47.9	0.052
FU1	1.21	4.01	8.23	0.5847	3.61	208.7	0.061
FU2	1.23	4.01	8.23	0.6211	3.39	202.7	0.049
FH1	1.23	4.00	8.19	0.6128	3.30	222.6	0.059
FH2	1.21	4.00	8.20	0.5832	3.58	224.5	0.051
BV1	1.22	3.99	9.75	0.5956	3.35	108.6	0.047
BV2	1.22	3.99	16.93	0.5964	3.53	52.6	0.063
BV3	1.23	4.01	18.10	0.6218	3.50	48.0	0.051
BU1	1.21	4.02	8.16	0.5862	3.56	221.2	0.084
BU2	1.23	4.01	8.15	0.6218	3.53	219.6	0.052
BH1	1.23	4.00	8.20	0.6203	3.50	278.1	0.045
BH2	1.23	4.01	8.10	0.6218	3.46	224.7	0.066

\* 測定位置から部材端までの長さ



以下のように算定した。2ゲージ法（ゲージ①および②）で計測される部材ひずみ $\epsilon'$ （ $=2\epsilon$ ： $\epsilon$ はゲージ貼付点におけるひずみ）とそこでの曲げモーメント $M$ 、および一様分布波力強度 $f$ との間には式(16)～(18)の関係がある。

$$M = \frac{1}{2} f l^2 a \quad (20)$$

$$\sigma = \frac{M}{I} \frac{b}{2} \quad (21)$$

$$\sigma = E \frac{\epsilon'}{2} \quad (22)$$

ここで、 $l$ はひずみゲージ位置から自由端までの距離、 $a$ 、 $b$ はそれぞれひずみゲージ位置における部材幅、部材厚、 $I$ は断面二次モーメント、 $E$ は弾性係数（ヤング率）である。これらより等分布波力強度 $f$ は式(23)で求めることができる。

$$f = \frac{2EI}{l^2 ba} \epsilon' \quad (23)$$

式中の弾性係数 $E$ については事前に既知外力に対するひずみ量の関係から求めておくことが必要であり、付表-2に示すように $3.3 \times 10^7 \sim 3.6 \times 10^7 \text{ gf/cm}^2$ の範囲であった。

②上部半円形断面構造：当構造では通水部における6枚の鉛直透過壁に作用する波力強度をひずみゲージを用いて計測した。鉛直透過壁は付図-8に示すように2本の開口部があり、これらにはさまれるスリット部材を対象とした。この鉛直透過壁は両端のL型アングルにより固定枠に取り付けられており、スリット部材両端は固定端であると考えられる。この場合、スリット部材に等分布

波力（波力強度 $f$ ）が作用したときの部材固定端および部材中央での曲げモーメントは付図-8に示すようにそれぞれ $-\frac{1}{12} f a l^2$ 、 $\frac{1}{24} f a l^2$ （ $a$ 、 $l$ はそれぞれスリット部材幅および部材長）となる。しかし、取り付けの不完全によりスリット部材の両端に若干のたわみ角 $\theta$ が生じる場合にはスリット部材両端および中央での曲げモーメントは上記の値に $2EI\theta/l$ を加えたものとなる。ちなみに、スリット部材の両端が完全に自由の場合には、曲げモーメントは部材両端で0、中央で $\frac{1}{8} f a l^2$ となる。本実験ではスリット部材の両端に若干のたわみ角が生じた場合にも正確に作用波力を推定できる方法を用いた。以下にその方法を示す。

付図-8に示すように、スリット部材に等分布波圧（波圧強度 $f$ ）が作用し、両端でたわみ角 $\theta$ が生じたときのモーメント分布 $M(X)$ は式(24)で与えられる。 $x$ 軸の原点はスリット部材端である。

$$M(X) = \frac{2EI}{l} \theta - \frac{1}{12} f a l^2 \left\{ 6\left(\frac{x}{l}\right)^2 - 6\left(\frac{x}{l}\right) + 1 \right\} \quad (24)$$

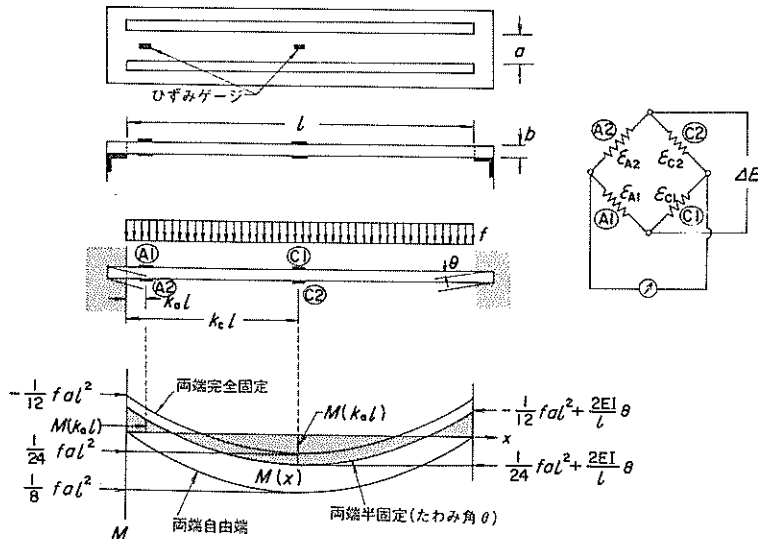
いま、 $x = k_a l$ 、 $x = k_c l$ に相当する位置のスリット部材表裏に4枚のひずみゲージ（付図-8中の①、②、③、④）を貼り、それぞれの計測するひずみ量を $\epsilon_{A1}$ 、 $\epsilon_{A2}$ 、 $\epsilon_{C1}$ 、 $\epsilon_{C2}$ とすると、式(24)を用いて次の4式が得られる。

$$\frac{2EI}{b} \epsilon_{A1} = \frac{2EI\theta}{l} - \frac{1}{12} f a l^2 (6k_a^2 - 6k_a + 1) \quad (25)$$

$$-\frac{2EI}{b} \epsilon_{A2} = \frac{2EI\theta}{l} - \frac{1}{12} f a l^2 (6k_a^2 - 6k_a + 1) \quad (26)$$

$$\frac{2EI}{b} \epsilon_{C1} = \frac{2EI\theta}{l} - \frac{1}{12} f a l^2 (6k_c^2 - 6k_c + 1) \quad (27)$$

$$-\frac{2EI}{b} \epsilon_{C2} = \frac{2EI\theta}{l} - \frac{1}{12} f a l^2 (6k_c^2 - 6k_c + 1) \quad (28)$$



付図-8 上部半円形断面構造の波力測定部材と測定法

ここで、 $b$  はスリット部材厚、 $I$  は断面二次モーメント、 $E$  は弾性定数（ヤング率）である。また、 $\epsilon_{A1}$  と  $\epsilon_{A2}$  および  $\epsilon_{C1}$  と  $\epsilon_{C2}$  はそれぞれ部材表裏の曲げひずみであるため式 (29)、(30) の関係がある。

$$\epsilon_{A1} = -\epsilon_{A2} \quad (29)$$

$$\epsilon_{C1} = -\epsilon_{C2} \quad (30)$$

そこで、 $\epsilon_{A2} - \epsilon_{A1} + \epsilon_{C1} - \epsilon_{C2}$  ( $= \epsilon'$ ) なるひずみ量をブリッジボックスにて作成すると、この  $\epsilon'$  は次式で与えられる。

$$\frac{2EI}{b} \epsilon' = f a l^2 (k_a - k_c)(k_a + k_c - 1) \quad (31)$$

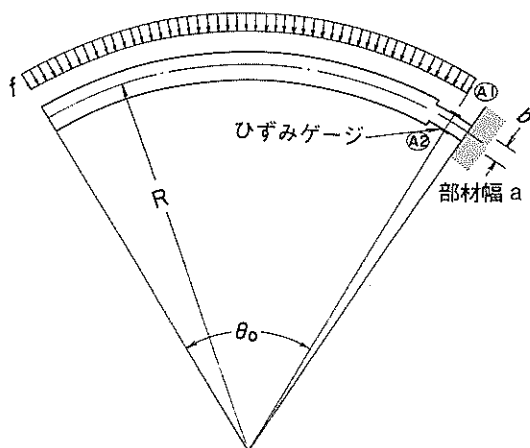
これより、等分布波力強度  $f$  は 4 ゲージ法による部材ひずみ  $\epsilon'$  を用いて式 (32) で与えられる。また、このときのひずみゲージの組み方は付図-8の右に示すとおりである。

$$f = \frac{2EI}{a b l^2 (k_a - k_c)(k_a + k_c - 1)} \epsilon' \quad (32)$$

付表-3には各スリット部材の諸元と、ひずみゲージ貼付点を示す  $k_a$ 、 $k_c$  を示している。スリット部材の水中固有振動数は 15~19 Hz と小さいが、ここに作用する波圧は静的であるため、この程度の固有振動数でも十分供用可能である。部材の弾性係数については立体骨組構造のひずみ測定部材と同様にあらかじめ求めており、各部材とも  $2.8 \sim 3.2 \times 10^7 \text{ gf/cm}^2$  であった。

③透過壁式二重セル構造：上部透過セルに作用する波

圧をひずみゲージにより測定した。透過セルは円筒面に横長く形状の空けき部を有しており、2つの空けき部に挟まれたスリット部材の一端を解放し、他端でこれを支持する片持梁形式とした。透過セルの板厚は 15 mm であるが、立体骨組構造のひずみ測定部材と同様にひずみ量が多く出るようにその固定端の板厚を約 8 mm 程度と薄くした。付図-9に示すようにこの片持部材に作用する波力としては曲率面に一様に作用する等分布波力を仮定した。その波力強度を  $f$  とするとひずみゲージ貼付点におけるモーメント  $M$ 、2ゲージ法によって出力されるひずみ量  $\epsilon'$  ( $= 2\epsilon$ ； $\epsilon$  はゲージ貼付点におけるひずみ) の間には式 (33)~(35) の関係が存在する。



付図-9 透過壁式二重セル構造の波力測定部材

付表-3 上部半円形断面構造の波力測定部材

部材名	部材厚 $b$ (cm)	部材幅 $a$ (cm)	部材長 $l$ (cm)	$I$ ( $\text{cm}^4$ )	$E$ ( $\times 10^7 \text{ gf/cm}^2$ )	検定 状態	固有振動数 $f_N$ (Hz)	減衰定数 $\beta$	$k_a$	$k_c$
HS1	2.07	4.82	90.01	3.5498	3.19	空中	26.3	0.067	0.033	0.50
						水中	16.2	0.081		
HS2	2.04	4.85	90.15	3.4172	2.93	空中	29.5	0.063	0.033	0.50
						水中	17.2	0.097		
HS3	2.03	4.82	90.10	3.3743	2.82	空中	30.3	0.050	0.033	0.50
						水中	15.0	0.073		
HS4	2.01	4.82	90.09	3.2496	2.98	空中	30.8	0.039	0.033	0.50
						水中	16.8	0.063		
HS5	2.04	4.82	90.05	3.4226	2.93	空中	28.2	0.053	0.033	0.50
						水中	16.2	0.057		
HS6	2.06	4.84	90.10	3.5270	2.84	空中	32.3	0.049	0.033	0.50
						水中	18.9	0.071		

$$M = R^2 a f (1 - \cos \theta_0) \quad (33)$$

$$a = \frac{M}{I} \frac{b}{2} \quad (34)$$

$$\sigma = E \frac{\varepsilon'}{2} \quad (35)$$

における部材先端とひずみゲージの中心の間の角度である。式(33)～(35)より部材ひずみ $\varepsilon'$ が測定されたときの波力強度 $f$ は式(36)で求めることができる。

$$f = \frac{EI}{R^2 ab(1 - \cos \theta_0)} \varepsilon' \quad (36)$$

付表-4には各部材の諸元および弾性定数 $E$ を示している。弾性定数 $E$ は $3.1 \sim 3.5 \times 10^7 \text{gf/cm}^2$ である。また、部材の水中固有振動数は $40 \sim 57 \text{Hz}$ である。

付表-4 透過壁式二重セル構造の波力測定部材

部材名	部材厚 $b$ (cm)	部材幅 $a$ (cm)	曲率半径 $R$ (cm)	$\theta_0$ (rad)	$I$ ( $\text{cm}^4$ )	$E$ ( $\times 10^7 \text{gf/cm}^2$ )	検定 状態	固有振動数 $f_N$ (Hz)	減衰定数 $\beta$
FS1	0.81	8.70	48.0	0.2188	0.3853	3.289	空中	131.6	0.023
							水中	40.1	0.078
FS2	0.80	8.67	48.0	0.2156	0.3699	3.297	空中	134.1	0.027
							水中	40.4	0.073
FS3	0.76	8.62	48.0	0.2145	0.3153	3.198	空中	122.7	0.041
							水中	57.2	0.051
FS4	0.82	8.65	48.0	0.2188	0.3974	3.368	空中	122.7	0.062
							水中	44.2	0.064
FS5	0.81	8.64	48.0	0.2166	0.3826	3.535	空中	129.6	0.052
							水中	41.6	0.068
FS6	0.76	8.67	48.0	0.2166	0.3172	3.297	空中	122.3	0.043
							水中	57.0	0.049
BS1	0.82	8.69	48.0	0.2145	0.3993	3.152	空中	128.2	0.050
							水中	39.7	0.083
BS2	0.86	8.65	48.0	0.2134	0.3691	3.224	空中	129.7	0.042
							水中	40.1	0.072
BS3	0.70	8.67	48.0	0.2101	0.2478	3.176	空中	88.0	0.048
							水中	39.0	0.029
BS4	0.84	8.68	48.0	0.2145	0.4287	3.155	空中	126.4	0.031
							水中	39.9	0.062
BS5	0.82	8.67	48.0	0.2145	0.3984	3.179	空中	128.2	0.049
							水中	40.4	0.073
BS6	0.70	8.66	48.0	0.2145	0.2475	3.418	空中	115.7	0.043
							水中	55.8	0.030

### C. 解析法

波力データの解析には当研究室所有の不規則波実験解析装置(DS-600)を用いた。その際、局所的に衝撃的な波圧が発生する測点についてはデータレコーダーからの出力を直接DS-600のA/D変換器に入力し、そうでない静的な波力が作用する測点については適度なカットオフ周波数に設定したローパスフィルターを通して入力した。

波力データの処理は当研究室で開発した波力解析プログラムを用いて行った。以下に当プログラムのフローについて述べる。

付図-10(1)~(3)はプログラムのフローを示すものである。ここに示すように波力解析プログラムは次の5個のプログラムから構成されている。

#### ① 波圧解析パラメーター設定プログラム

解析に必要な解析パラメーターをあらかじめファイルに書き込むプログラムであり、実験ケースごとに変更の必要となるパラメーターのみを変更する。

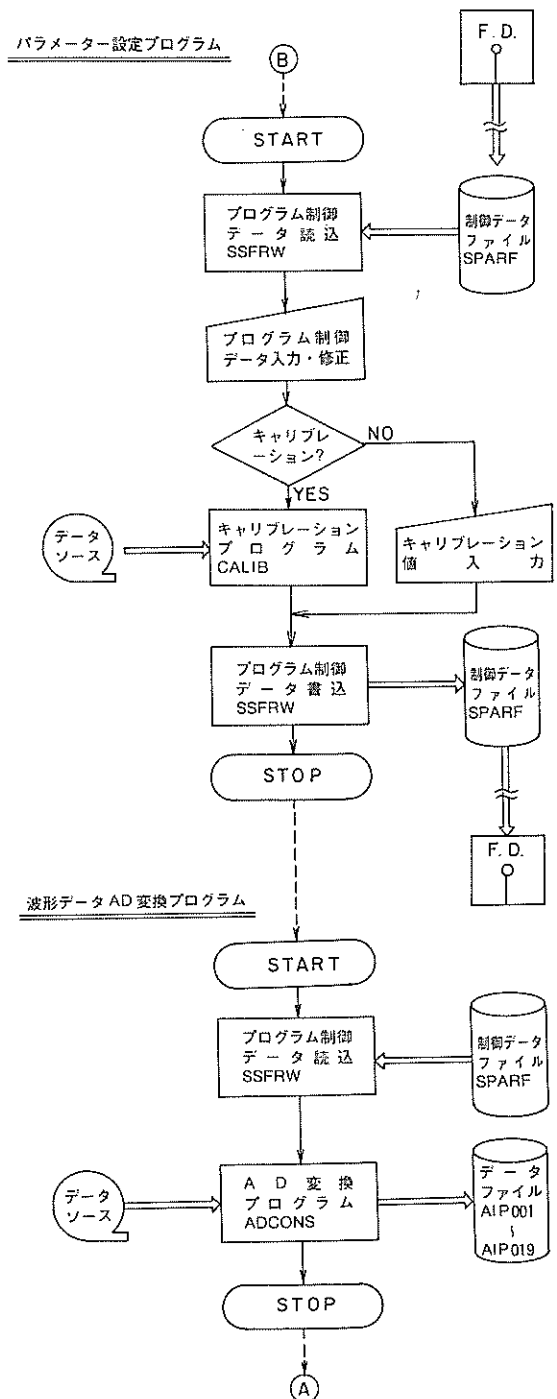
#### ② 波形データA/D変換プログラム

アナログデータをデジタルデータに変換してデータファイルに書き込むプログラムである。

#### ③ 波別解析プログラム

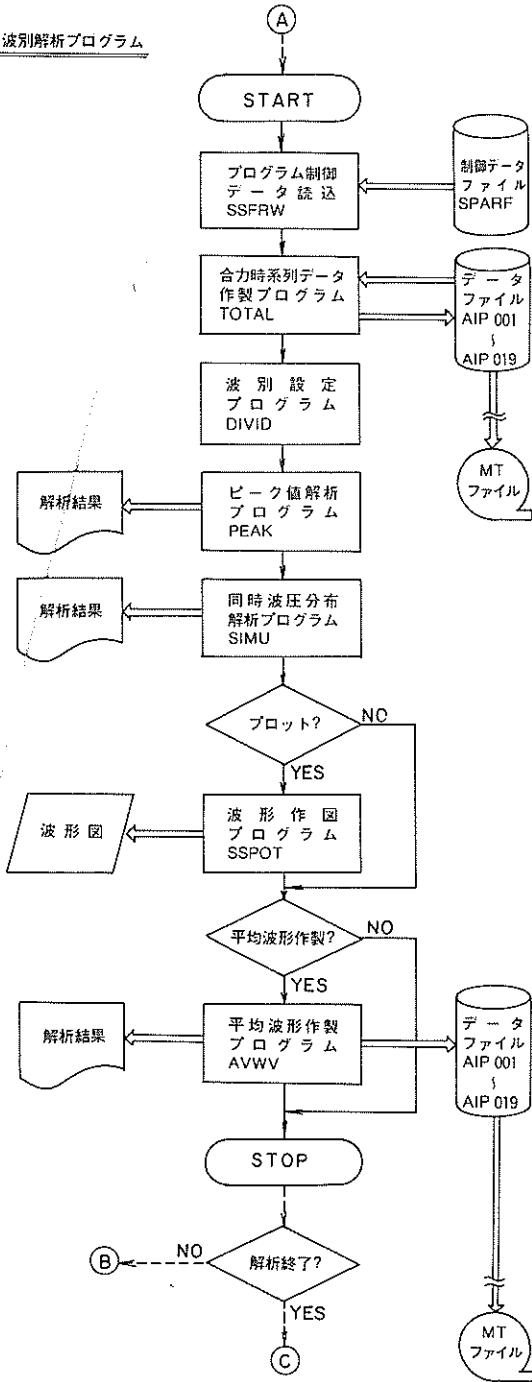
解析の中心となるプログラムである。データファイルから読み込んだ波形のデジタルデータを用いて、新たに合力波形を作製したのち、基準チャンネルのデータを基に1波ごとの波別に分割し、各チャンネルの1波ごとのピーク値およびピーク値の平均値を求める。さらに、あるチャンネルのピーク時における他チャンネルの波力(同時波力)の算定を各波別ごとに行う。

次に、平均波形の作製を行いこれをデータファイルに書き込む。平均波形とは、規則波実験で得られる波力波形を構成する1波ごとの波形の平均的な波形を言い、時系列データを1周期ごとの波別データに分割して重ね合わせを行い、各時間ごとに標本平均をとることにより求めることができる。規則波実験と言えども1波ごとに波形の若干の変動があるためこれにより代表的な波形を与えることができる。比較的静的な圧力変化を示す測点や全波力、部材波力の合力については、平均波形のピーク値は1波ごとのピーク値の平均値とほぼ同じ値を与えていた。しかし、衝撃的な波圧波形の場合には、衝撃波圧の発生時間の若干の差異があることにより平均波形のピーク値が実際の波圧波形のピーク値より小さくなる危険性があり、局所的に衝撃波圧が発生する測点については好ましくない。そのような測点での波圧としては1波ごとのピーク値の平均値を使用した。



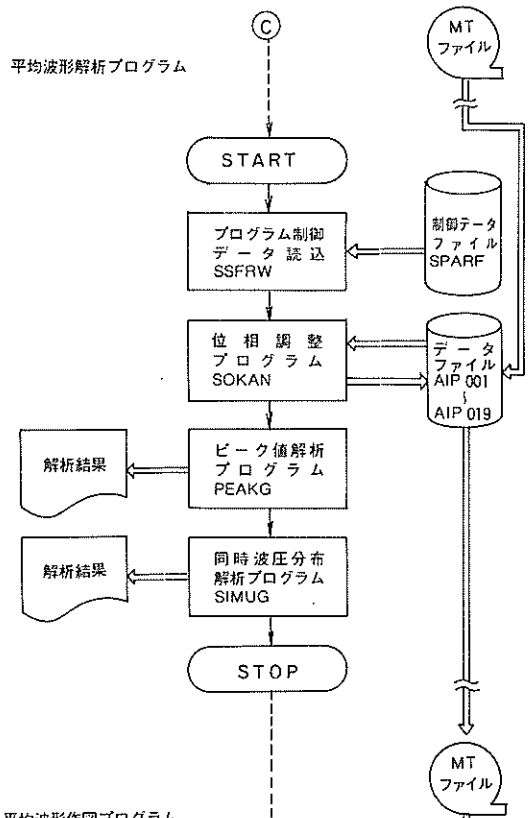
付図-10(1) 波力解析プログラムフロー(1)

波別解析プログラム

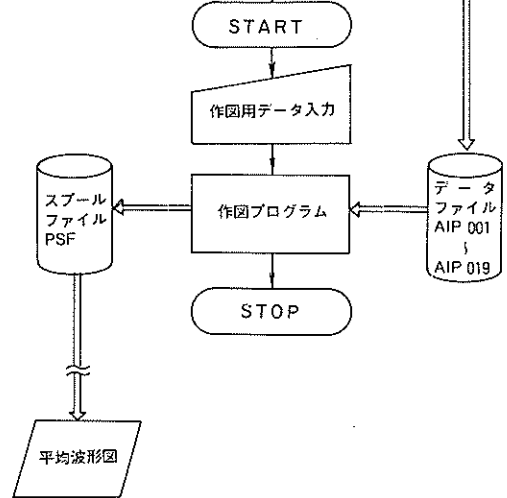


付図-10(2) 波力解析プログラムフロー(2)

平均波形解析プログラム



平均波形作図プログラム



付図-10(3) 波力解析プログラムフロー(3)

#### ④ 平均波形解析プログラム

当プログラムは前記プログラムで作製した平均波形を用いて解析を行うプログラムである。今回の実験ケースでは測点数が多く、一度にデータレコーダー（14 ch）に記録することはできず、測点を数回に分割して記録せざるを得ない。そこで、異なる測定回同志の同時性を保持するため、共通の測点における波力データを重複して測定し、両者の相互相関が最大となる時間差を求めて、その時間差だけ一方のデータを移動する。こうすることにより同時性を保持することができる。本プログラムでは、はじめにこの作業を平均波形について行った後、平均

波形のピーク値および同時波力を求めるものである。

#### ⑤ 平均波形作図プログラム

本プログラムは平均波形をX-Yプロッターにて作図するプログラムである。本文中の波形図はこれにより作製したものである。なお、波形は平均波形を2波分けて作図した。

解析ではこれらのプログラムを用いて、合力波形の作製、1波ごとのピーク値およびそれらの平均値、同時波力の算出、平均波形の作製、平均波形のピーク値と同時波力の算出を全実験ケースについて行った。また、平均波形の作図を代表的波浪条件について行った。

港湾技研資料 No.543

1985・12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 有限会社アオイ綜合印刷

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