

土 木 研 究 所 資 料

海 域 制 御 構 造 物 の 開 発 に 関 す る

共 同 研 究 報 告 書 (6)

—— 波力実験報告書 ——

昭和63年 7 月

建 設 省 土 木 研 究 所

河 川 部 海 岸 研 究 室

構 造 橋 梁 部 構 造 研 究 室

Copyright © (1988) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

海域制御構造物の開発に関する 共同研究報告書(6) — 波力実験報告書 —

建設省土木研究所海岸研究室	室 長	宇 多 高 明
〃	研 究 員	村 井 禎 美
〃		山 本 幸 次
〃	部外研究員	館 克 彦
建設省土木研究所構造研究室	室 長	横 山 功 一
〃	研 究 員	井 上 純 三
〃		伊 関 英 彦
飛島建設(株)総合企画本部技術開発部		岡 幸 夫
〃		松 尾 和 男
〃		川 村 哲 也
五洋建設(株)技術本部技術研究所		国 栖 広 志
〃		福 山 博 信
五洋建設(株)技術本部技術部		近 藤 浩 右
三井建設(株)土木本部土木技術部		高 木 春 生
〃		吉 川 雅 人
〃		田 村 直 明
清水建設(株)技術研究所		萩 原 運 弘
〃		藤 原 隆 男
清水建設(株)技術本部土木技術開発総括部		小田原 卓 郎
大成建設(株)技術研究所海洋・水理研究室		小 山 文 男
〃		中 塚 健 司
土木本部設計部		清 水 正 巳

要 旨

スリット式の海域制御構造物を中心に、重複波から碎波領域の波浪条件のもとで波力実験を行い、構造物に作用する全体波力、部材波力を求めた。碎波形態は巻き波である。これよりスリット式、透過水平板付スリット式海域制御構造物に作用する波力の特性が明らかになった。

キーワード：海洋開発，海域制御構造物，碎波，全体波力，部材波力，共同研究。

は じ め に

土木研究所では、沿岸域の有効利用を目指したMMZ構想を推進するために、総合技術開発プロジェクト“海洋利用空間の創成・保全技術の開発”研究を昭和61年度より実施している。また、この総プロの一環として昭和61年8月より土木研究所と民間企業14社との間で共同研究“海域制御構造物の開発”を行っている。その成果の一部は既に“海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(1), (2), (3), (4), (5)”としてとりまとめた。本報告は、これらの報告に引き続いて構造物の安定性検討のために行った波力実験の結果をとりまとめたものである。

目 次

はじめに

第1章 ま え が き	1
第2章 研究の目的および体制	2
第3章 乱れと反射を利用した海域制御構造物の波力に関する水理模型実験 (第2報) (第1グループ)	3
3.1 ま え が き	5
3.2 対象構造物の特徴	5
3.3 実 験 方 法	8
3.3.1 実験条件の設定	8
3.3.2 構 造 条 件	11
3.3.3 波力の測定方法	15
3.3.4 データの解析方法	16
3.3.5 部材波力の解析方法	18
3.4 実 験 結 果	
3.4.1 スリット型	22
3.4.2 水平板付スリット型(1)	38
3.4.3 水平板付スリット型(2)	47
3.4.4 透過水平板付スリット型	57
3.5 ま と め	
3.5.1 全 波 力	72
3.5.2 部材波力	73
3.6 あ と が き	
付章1. 波力測定における衝撃応答に関する検討	75
付章2. 合田式中の係数 α_2 について	81
第4章 スリット式構造物に作用する波力に関する実験 (土木研究所)	
4.1 ま え が き	89
4.2 実 験 方 法	89
4.3 実 験 結 果	93
4.3.1 波力に及ぼす波浪条件の影響	93
4.3.2 波力に及ぼす構造諸元の影響	95
4.3.3 合田波力との比較	104
4.4 ま と め	106
第5章 あ と が き	108

第1章 ま え が き

近年、地方自治体をはじめとして、全国各地でリゾート開発に関する関心が高まっている。こうした中で海洋性レクリエーションに関する需要も高まりつつあり、建設省でもマリーン・マルチ・ゾーン（MMZ）構想を推進し、外洋に面した沿岸域の有効利用を図ろうとしている。この構想の軸になるのが、沖合の水深10～20mに設置され、消波効果により静穏な海域環境を創出する海域制御構造物である。この海域制御構造物の開発は、官民共同で昭和61年度より5か年計画で行われている。本報では、引き続き検討を行っている海域制御構造物の研究のうち、乱れと反射を利用した構造物について行った波力実験の成果をまとめたものである。

第2章 研究の目的および体制

本研究の最終目的は、海域制御構造物の開発にある。このため種々の型式の構造物を選んで、多方面より検討を進めている。構造物の持つ機能性に関しては、各構造型式の透過率、反射率等を2次元水理模型実験により明らかにした。しかし、構造物の波力特性については、特に砕波作用下においての検討が不十分であった。このため、本報では乱れと反射を利用したタイプの構造物について砕波領域までを含む波浪条件下で波力実験を行った結果を報告する。

本共同研究は昭和61年度より研究が開始されている、総合技術開発プロジェクト「海洋利用空間の創成・保全技術の開発」の一環として、同年8月より土木研究所と民間企業14社の間で行われている。民間企業14社は、以下の3グループに大別される。

第1グループ 乱れと反射を利用した海域制御構造物の開発

飛島建設(株)

清水建設(株)

三井建設(株)

五洋建設(株)

大成建設(株)

第2グループ 没水型消波構造物の開発

清水建設(株)

大成建設(株)・(株)間組・東急建設(株)

東洋建設(株)

日本テトラポッド(株)

第3グループ ハイブリッド型消波構造物の開発

(株)大林組

住友金属工業(株)・東亜建設工業(株)

新日本製鉄(株)・戸田建設(株)

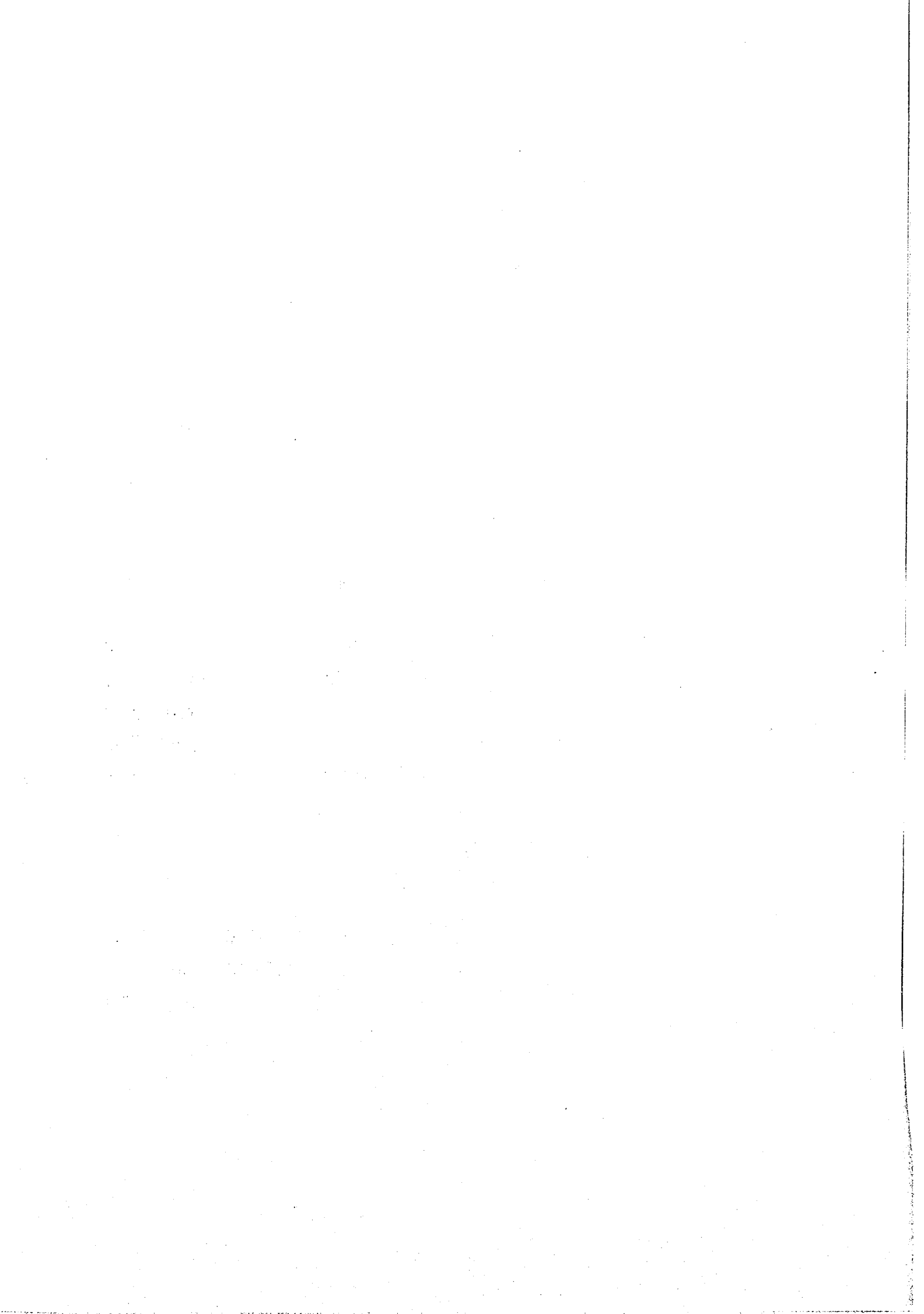
また、土木研究所側は昭和62年度より第1、第3グループとの共同研究に関連して、海岸研究室のほかに構造研究室が参加している。

本報告書はこのうち土木研究所、第1グループの行った波力実験の成果をまとめたものである。

なお、共同研究によって得られた研究成果をとりまとめた土木研究所資料「海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(1)～(5)」の目次を発行順に巻末資料として示す。

第3章 乱れと反射を利用した海域制御構造物 の波力に関する水理模型実験 (第2報) (第1グループ)

建設省土木研究所海岸研究室	室 長	宇多 高明
〃	研究員	村井 禎美
〃		山本 幸次
建設省土木研究所構造研究室	室 長	横山 功一
〃	研究員	井上 純三
〃		伊関 英彦
共同研究第1グループ		
飛島建設(株)総合企画本部技術開発部		岡 幸夫
〃		松尾 和男
〃		川村 哲也
五洋建設(株)技術本部技術研究所		国栖 広志
〃		福山 博信
技術本部技術部		近藤 浩右
三井建設(株)土木本部土木技術部		高木 春生
〃		吉川 雅人
〃		田村 直明
清水建設(株)技術研究所		萩原 運弘
〃		藤原 隆男
技術本部土木技術開発統括部		小田原卓郎
大成建設(株)技術研究所海洋・水理研究室		小山 文男
〃		中塚 健司
土木本部設計部		清水 正巳



3.1 まえがき

乱れと反射を利用した各種構造物の消波特性や重複波領域での波力特性を水理実験によって検討した結果についてはすでに報告した^{1),2)}。これに続いて現地海岸を対象として各種構造物の設計・施工に関するフィージビリティ・スタディを行った^{3),4)}。これに基づき、消波機能および設計・施工の面より今後重点的に研究を進めるべきタイプとしてスリット型、水平板付スリット型、透過水平板付スリット型の3種類の構造形式を選定した。ところで、これらの構造形式については、砕波を含む高波高時の波力特性は明らかになっておらず、構造物の安定性を検討する上で重要な課題として残されていた。設計波力の算定では重複波領域に止まらず砕波領域に至るまでの範囲の波浪条件を対象として検討しなければならない。そこで、3種類の透過性構造物の波力特性を砕波領域を含む高波高時の波浪条件下で、水理模型実験により調べた。

3.2 対象構造物の特徴

実験対象のスリット型、水平板付スリット型および透過水平板付スリット型の構造形状と消波機能の特徴を述べる。なお、海域制御構造物としての消波機能は周期 $T \leq 10$ s ($H_0/L_0 = 0.02 \sim 0.04$) の波浪条件のもとで透過率 $K_T \leq 0.6$ 、反射率 $K_R \leq 0.5$ を目標としている。

(1) スリット型構造 (図3.1)

スリット型構造は、鉛直スリット壁を複数配列することにより、水粒子の乱れおよび反射を引き起こして消波を行う構造である。この型式の消波特性は次の通りである。

- ① 透過率 $K_T \leq 0.6$ 、反射率 $K_R \leq 0.5$ を満足する構造諸元は、スリット壁の空隙率 $\epsilon_{v1} = 0.3$ 、 $\epsilon_{v2} = 0.2$ 、 $\epsilon_{v3} = 0.1$ 、吃水比 $h_1/h_2 = 0.8$ である。
- ② 3枚のスリット壁構造 ($\epsilon_{v1} = 0.3$ 、 $\epsilon_{v2} = 0.2$ 、 $\epsilon_{v3} = 0.1$) の反射率 K_R は低い。透過率 K_T は吃水比の増加とともに急激に低下し、吃水比が大きい場合には低透過・低反射型の構造物となり得る。

- ③ 3枚のスリット壁構造 ($\epsilon_{v1} = 0.3$ 、 $\epsilon_{v2} = 0.2$ 、 $\epsilon_{v3} = 0.1$) は中間スリット壁を有するため、構造的に安定性が高いだけでなく、消波効果の点でも2枚スリット壁構造 ($\epsilon_{v1} = 0.3$ 、 $\epsilon_{v3} = 0.1$) に比べて透過率 K_T が全体的に低

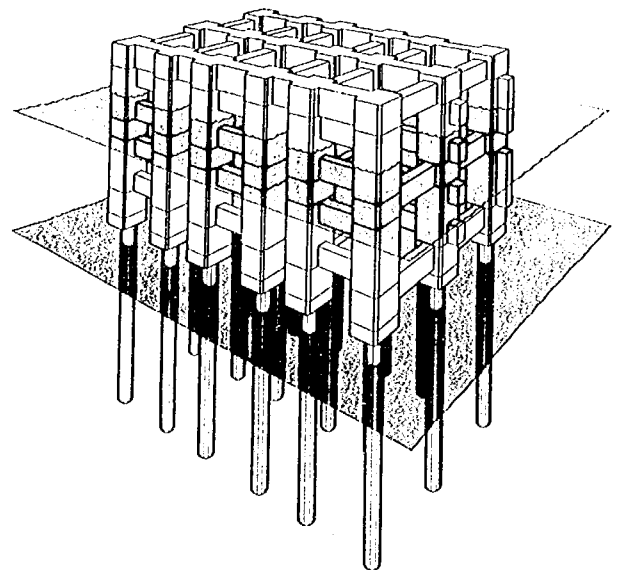


図3.1 スリット型構造

くなる。また、反射率 K_R に対しても2枚スリット壁構造の周波数特性が改良され、短周期でも K_R が低下する。

(2) 水平板付スリット型構造 (図3.2, 図3.3)

水平板付スリット型構造は、複数の鉛直スリット壁に加えて水平板を水面付近に配置した構造である。鉛直スリット壁による乱れと反射、水平板による乱れと反射および波の条件によっては、水平板上での砕波を期待するとともに、2種の異なる消波機能を組み合わせたことによる相互作用によって、消波機能を向上させる。水平板付スリット型構造には、水平板の消波機能を重視した構造 (図3.2) と鉛直スリットの消波機能を重視した構造 (図3.3) の2種類がある。水平板付スリット型の消波特性は次の通りである。

- ① 水平板の消波機能を重視した構造の場合、透過率 $K_T \leq 0.6$ 、反射率 $K_R \leq 0.5$ を満足する構造諸元は、鉛直スリット壁の空隙率 $\epsilon_v = 0.4$ 、鉛直スリット壁枚数 $N_v = 2$ 、水平板の空隙率 $\epsilon_H = 0.1$ 、吃水比 $h_2/h = 1.0$ 、天端高 $h_1/h = 0.2$ である。
- ② 鉛直スリットの消波機能を重視した構造の場合、①と同じ条件を満足する構造諸元は、鉛直スリット壁の空隙率 $\epsilon_{v1} = 0.4$ 、 $\epsilon_{v2} = \epsilon_{v3} = 0.25$ 、鉛直スリット壁枚数 $N_v = 3$ 、水平板の空隙率 $\epsilon_H = 0.2$ 、吃水比 $h_2/h \geq 0.8$ 、天端高 $h_1/h = 0$ である。
- ③ 両者とも水平板とスリットの特性を合わせ持ち、長周期の波に対しては鉛直スリットによる乱れと反射が、比較的短周期の波に対しては水平板上部の進行波 (流れ) の位相差による乱れと反射が、それぞれ支配的となる。

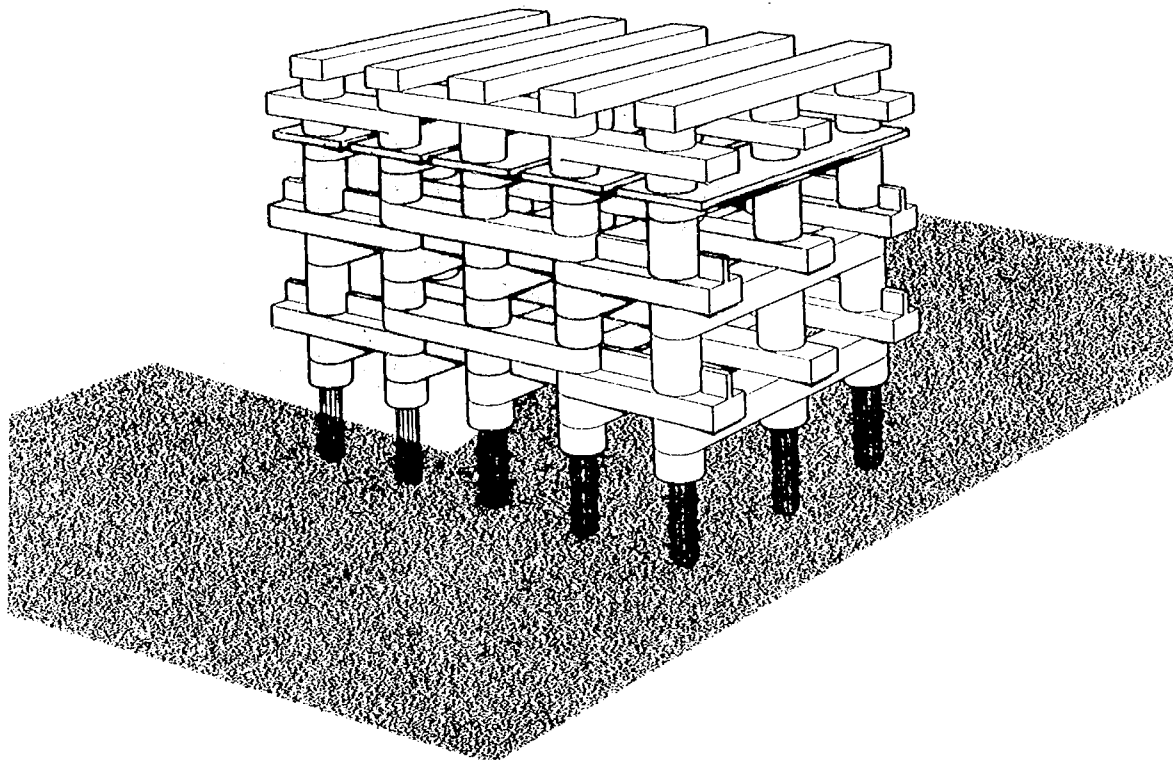


図3.2 水平板付スリット型(1)構造 (水平板の消波機能を重視した構造)

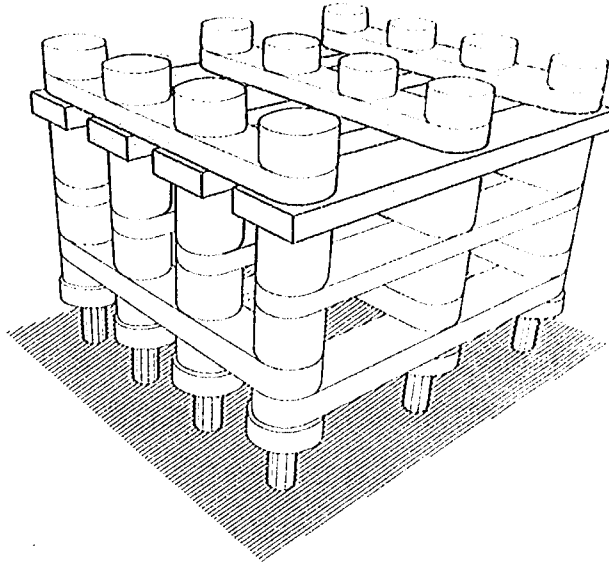


図3.3 水平板付スリット型(2)構造（鉛直スリットの消波機能を重視した構造）

(3) 透過水平板付スリット型構造（図3.4）

透過水平板付スリット型構造は、複数の鉛直スリット壁のほかに、静水面付近にスリット式の水平板、海底部に底版を配置した構造である。鉛直スリット壁により水粒子の水平方向の乱れを発生させ、さらに水平板により鉛直方向の乱れを発生させて波のエネルギーの減衰を図る。透過水平板付スリット型の消波特性は次の通りである。

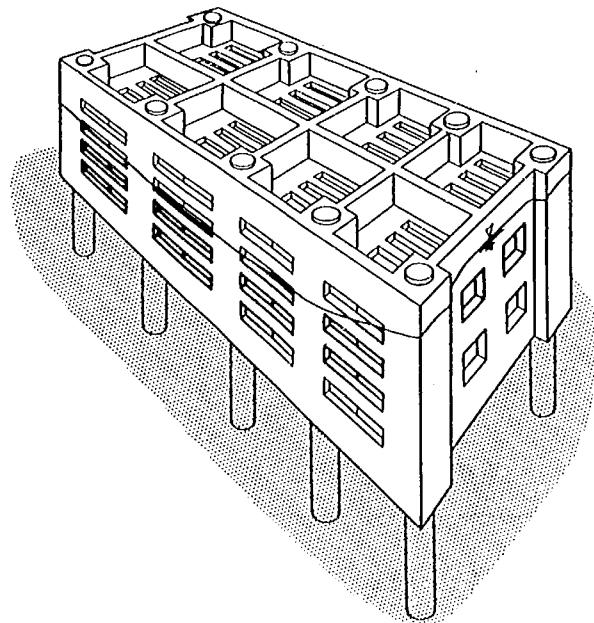


図3.4 透過水平板付スリット型構造

① 透過率 $K_T \leq 0.6$ ，反射率 $K_R \leq 0.5$ を満足する構造諸元は、鉛直スリット壁の空隙率 $\epsilon_v = 0.26$ ，鉛直スリット壁枚数 $N_v = 3$ ，水平板の空隙率 $\epsilon_v = 0.16$ ，吃水比 $h_2/h = 1.0$ ，天端高 $h_1/h = 0$ である。

② 透過水平板が透過率 K_T に与える効果は相対幅 $B/L = 0.15$ 以上の比較的波長の短い波に対して大きい。

③ 吃水比を $h_2/h = 0.7$ と浅くすると、堤体下面からエネルギーが伝達されるため、透過率

K_T は全体的に0.05~0.10程度大きくなる。また、反射率は逆に吃水の浅い方がやや小さくなる。

3.3 実験方法

3.3.1 実験条件の設定

実験は、建設省土木研究所水理共同実験棟内の風洞付造波水路を用いて行った（図3.5参照）。水路は全長52m、幅0.6m、高さ1.2mの片面ガラス張りの鋼製水路で、波の作用状況等を目視観察できる。この水路中、造波板から32mの位置より岸側へ5mの距離だけ1/10勾配の斜面を設け、これよりさらに岸側を水平床とした。構造物模型はこの水平床位置に設置した。また、岸側端部には、波の反射を防ぐために消波装置を設置した。作用させた波は規則波である。

容量式波高計G1~G4の配置を図3.5に示す。また、碎波波高測定用として斜面上（G2とG3の間）に容量式波高計を1本設置した。実験では波を作用させ始めた後、G3、G4位置で波形が安定してから10波以上の波高測定を行った。斜面上で碎波する場合には、波高測定のほか、碎波点位置を測定した。さらに、容量式波高計を碎波位置に設置し、再度同じ波を作用させて碎波波高を測定した。測定データは、実験自動化装置により20Hzのサンプリング間隔でA/D変換した後フロッピーディスクに収録した。模型設置位置での入射波高の算定は、合田らの入・反射分離推定法⁵⁾を用い、パーソナルコンピュータで解析した。

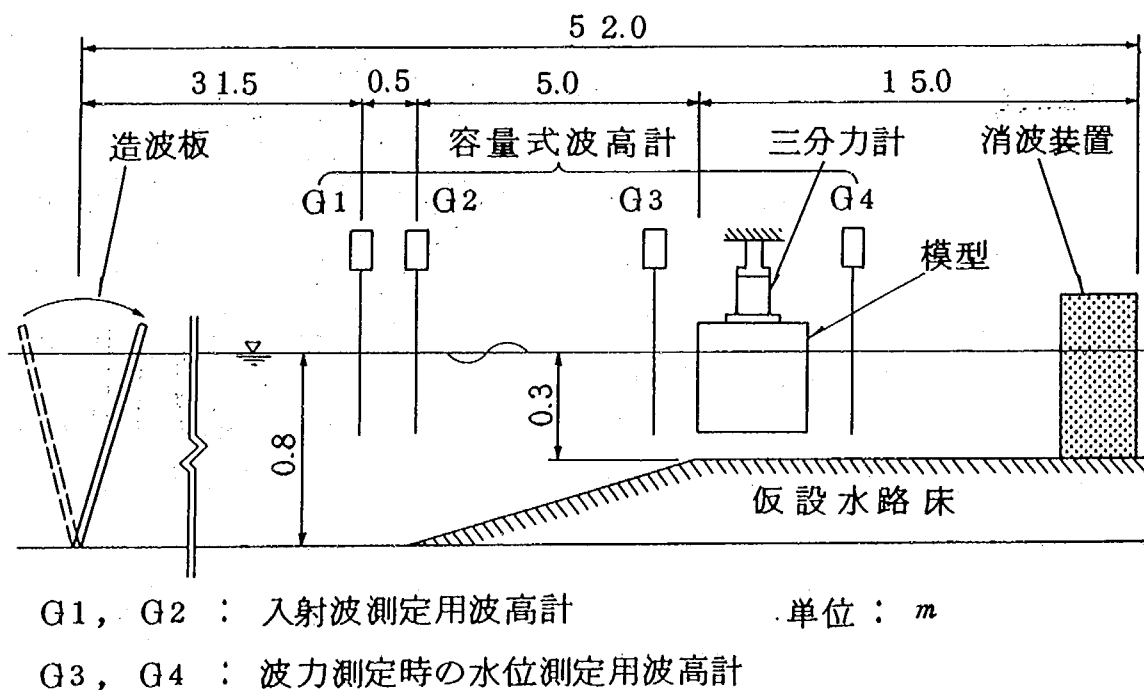


図3.5 実験装置

波高の検定結果の1例を図3.6に示す。模型設置位置での波高 H と造波カウント値 C の関係として、非碎波の場合には H は C に比例して増加するが、碎波する場合は H の C に対する増加率が減少し、あるカウント値で最大値を示した後に減少する。このとき碎波位置 X_b は C の増加に従い沖側に移動しており、碎波波高 H_b は C にほぼ比例して増加する。なお、 X_b は堤体前面より、沖向きに測った距離である。碎波形態は、すべて巻き碎波であった。

ここで、非碎波条件での波高 H と造波カウント値 C との関係を碎波条件の範囲まで直線的に伸ばした値 H' （仮想通過波高⁶⁾）について考える。図3.6によれば、碎波波高 H_b は H' にほぼ等しい。これは、碎波条件の場合にも碎波直前の波高は造波カウント値に比例して増加すると考えられるからである。これより、仮想通過波高は、非碎波条件では模型設置位置での波高、碎波条件では模型沖側での碎波波高に相当すると考えられる。

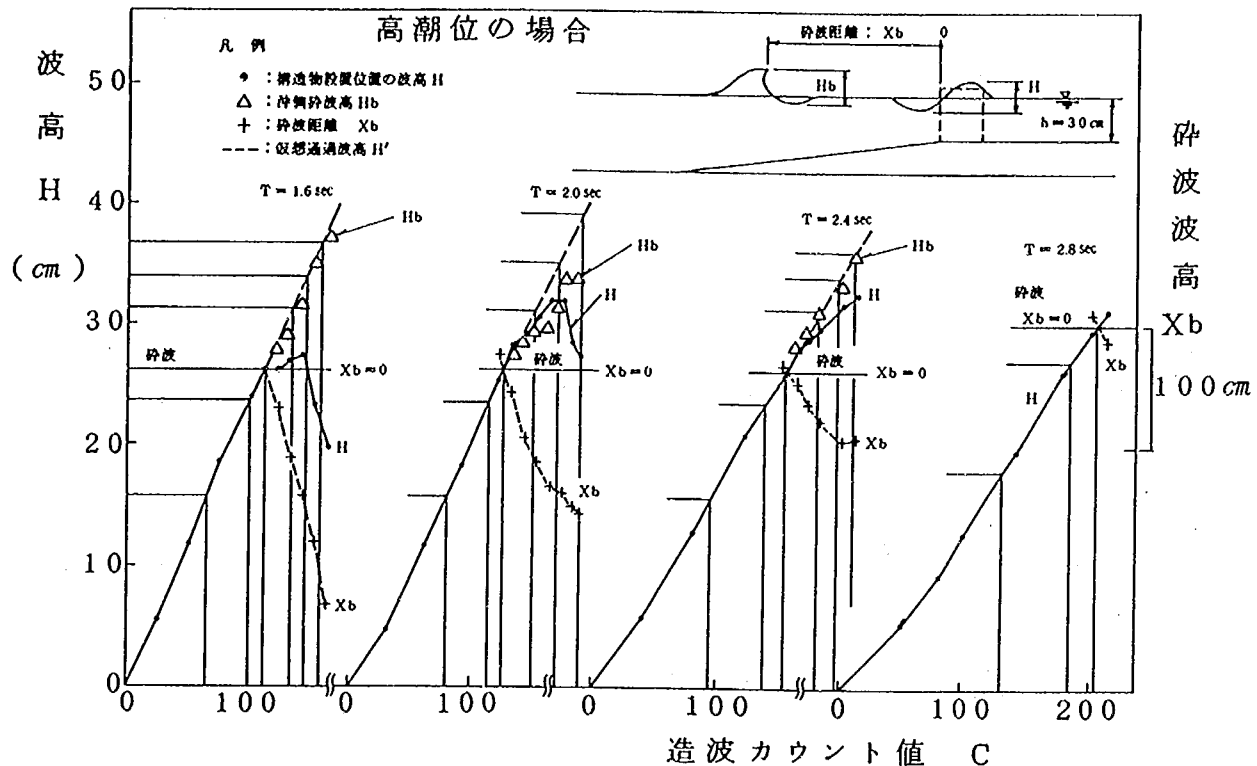


図3.6 波高測定結果

堤体に作用する波力は、堤体設置位置での波高に比例するので、波力の値も堤体設置位置の波高 H が最大となる造波カウント値付近でピーク値を持つと考えられる。したがって、 H のピーク値周辺の波浪条件を重点的に非碎波から碎波条件に至るまで波浪条件を選定した。例えば、周期 $T = 1.6$ sの場合、 $H'/H_{b0} = 0.6, 0.9, 1.0, 1.2, 1.3, 1.4$ の6波浪となる。ただし、 H_{b0} はちょうど模型位置で碎波する場合の模型位置での波高である。ここに、 $H'/H_{b0} \geq 1.0$ が碎波条件であり、波力のピーク値は $H'/H_{b0} \geq 1.2$ ($C \geq 135$) で生ずると予想される（図3.6参照）。なお、

実験波高を表示する場合、模型設置位置の波高 H では非碎波と碎波に分ける必要があり煩雑となるので、以下では仮想通過波高 H' で表示する。また、水平板を有する構造に作用する波力は、潮位変化によって大きく変化すると考えられる。このため、水深は30cmの他に各構造物の水平板が静水面に位置する水深を対象に実験を行った。実験波の諸元を表3.1に示す。波力実験では、造波カウント値 C が同じ値ならば、同一波浪条件が再現されるものとした。現地における構造物の設置水深を約10mとした場合の現地と模型の対比を表3.2に示す。実験の縮尺は1/33となる。

表3.1：実験波一覧

$h = 30\text{ cm}$						$h = 28.5\text{ cm}$						$h = 27\text{ cm}$					
No	T(s)	$H'(\text{cm})$	H'/h	H'/H_{bo}	C	No	T(s)	$H'(\text{cm})$	H'/h	H'/H_{bo}	C	No	T(s)	$H'(\text{cm})$	H'/h	H'/H_{bo}	C
1	1.6	15.6	0.52	0.6	64	1	1.6	18.9	0.66	0.9	78	1	1.6	18.0	0.67	0.9	76
2		23.4	0.78	0.9	98	2		21.0	0.74	1.0	88	2		20.0	0.74	1.0	86
3		26.0	0.87	1.0	110	3		25.2	0.88	1.2	104	3		24.0	0.88	1.2	102
4		31.2	1.04	1.2	135	4		31.5	1.11	1.5	130	4		30.0	1.11	1.5	128
5		33.8	1.13	1.3	144	5		37.8	1.33	1.8	156	5		36.0	1.33	1.8	155
6		36.4	1.21	1.4	155												
7	2.0	15.6	0.52	0.6	80	6	2.0	22.5	0.79	0.9	112	6	2.0	17.6	0.65	0.9	92
8		23.4	0.78	0.9	112	7		25.0	0.88	1.0	122	7		19.6	0.73	1.0	102
9		26.0	0.87	1.0	125	8		30.0	1.07	1.2	144	8		25.5	0.94	1.3	132
10		31.2	1.04	1.2	150	9		32.5	1.14	1.3	158	9		29.4	1.09	1.5	154
11		35.1	1.17	1.35	168	10		35.0	1.23	1.4	170	10		33.3	1.23	1.7	174
12		39.0	1.30	1.5	186												
13	2.4	15.6	0.52	0.6	94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14		23.4	0.78	0.9	135	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15		26.0	0.87	1.0	152	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16		31.2	1.04	1.2	180	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17		33.8	1.13	1.3	196	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18		36.4	1.21	1.4	209	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	2.8	18.0	0.60	0.6	130	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20		27.0	0.90	0.9	182	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21		30.0	1.00	1.0	204	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表3.2：現地と模型との対比

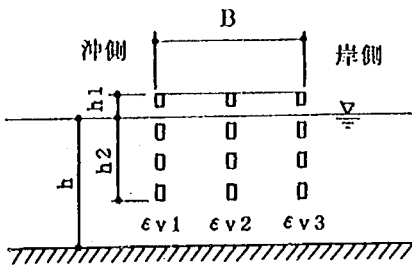
諸 元	実 物	模 型
水 深	9 ~ 10 m	27 ~ 30 cm
波 高	5 ~ 13 m	15 ~ 40 cm
周 期	9.2 ~ 16.2 sec	1.6 ~ 2.8 sec

3.3.2 構造条件

スリット型の構造条件を表3.3に示す。スリット型構造物の形式として、ブロックと杭との組み合わせによる形式（S L 1）と、ケーソンを杭で結合した底版のある形式（S L 2）が考えられる。

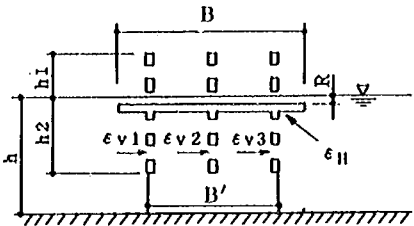
水平板付スリット型の構造条件を表3.4に示す。構造形式は、水平板の消波機能を重視した構造の場合に、鉛直スリットの枚数を3枚（P L S 1）および2枚（P L S 2）としたものの2種類の形式がある。また、鉛直スリットの消波機能を重視した構造をP L S 3とした。これらは全て底版を有しない構造物である。

表3.3：構造条件（スリット型）

構 造 ケース	構 造 条 件		実験模型諸量	記 号
	h_2 / h	底 版		
S L 1	0.8	無	$B/h=1.5$ $h_1/h=0.2$ $N=3$ $\epsilon_{v1}=0.3$ $\epsilon_{v2}=0.2$ $\epsilon_{v3}=0.1$	
S L 2	1.0	有		

注) 表中の諸元は $h=30\text{cm}$ の場合である。

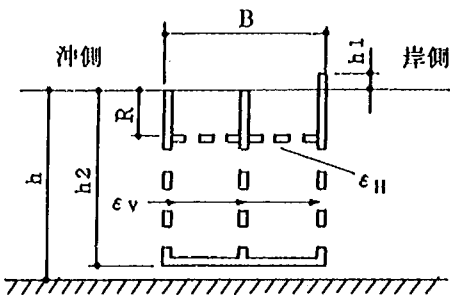
表3.4：構造条件（水平板付スリット型）

構 造 ケ ー ス	構 造 条 件						実験模型諸量	記 号
	N	ϵ_{v1}	ϵ_{v2}	ϵ_{v3}	ϵ_H	h_2/h		
P L S 1	3	0.4	0.4	0.4	0.1	1.0	$B/h=1.5$ $B'/h=1.0$ $h_1/h=0.2$ $R/h=0.05$	
P L S 2	2	0.4	—	0.4	0.1			
P L S 3	3	0.4	0.25	0.25	0.2	0.8	$B/h=B'/h=1.5$ $h_1/h=0$ $R/h=0.1$	

注) 表中の諸元は $h=30\text{cm}$ の場合である。

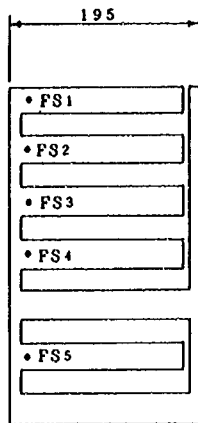
透過水平板付スリット型の構造条件を表3.5に示す。透過水平板付スリット型の形式については、ケーソンを杭で結合し、底版を有するタイプを基本タイプ（VHS1）とした。さらに、吃水比を小さくしたタイプをVHS2、底版のないものをVHS3とした。

表3.5：構造条件（透過水平板付スリット型）

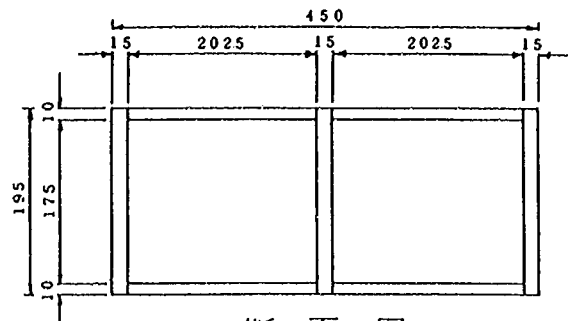
構 造 ケ ー ス	構 造 条 件		実験模型諸量	記 号
	h_2/h	底 版		
VHS1	1.0	有	$B/h=1.0$ $h_1/h=0$ $R/h=0.1$ $N=3$ $\epsilon_{v1}=0.26$ $\epsilon_{v2}=0.26$ $\epsilon_{v3}=0.26$ $\epsilon_H=0.16$	
VHS2	0.8	有		
VHS3	1.0	無		

注) 表中の諸元は $h=30\text{cm}$ の場合である。

以上の各模型のうち、代表例の形状寸法と波圧計、ひずみゲージの配置を図3.7～3.10に示す。

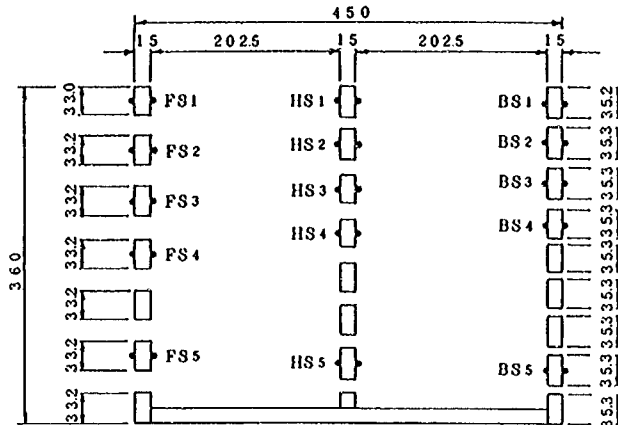


平面图



单位: mm

断面図



背面図

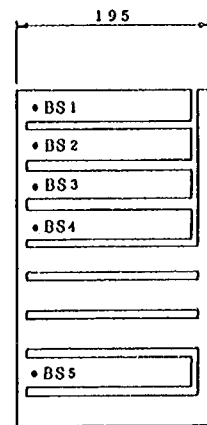
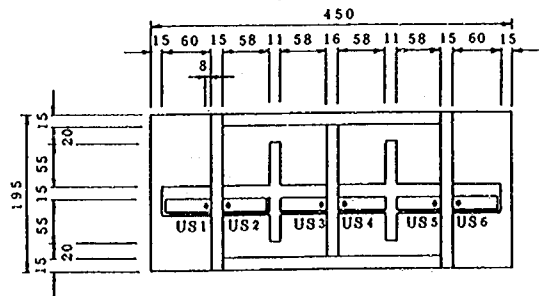


図3.7 スリット型の模型形状寸法

平面图

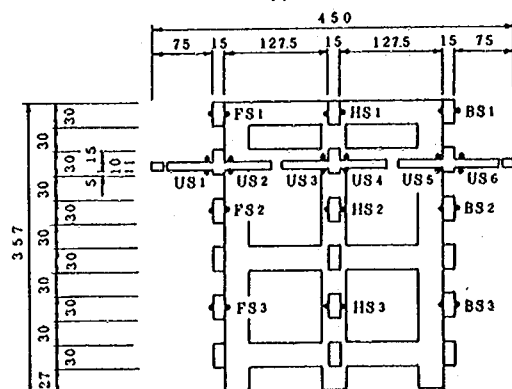


注) 本図は PLS1 のゲージ配置を示す。

PLS2 は中央鉛直スリット型の水平板より下部分が無い。従って測定のHS2およびHS3が無い。

单位：~~mm~~

断面図



正 面 图

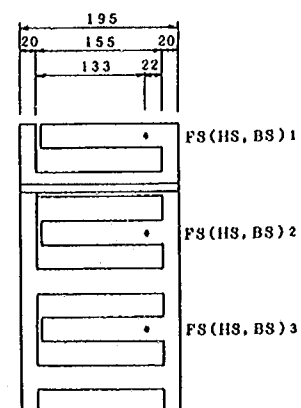


図3.8 水平板付スリット型(1)の模型形状寸法

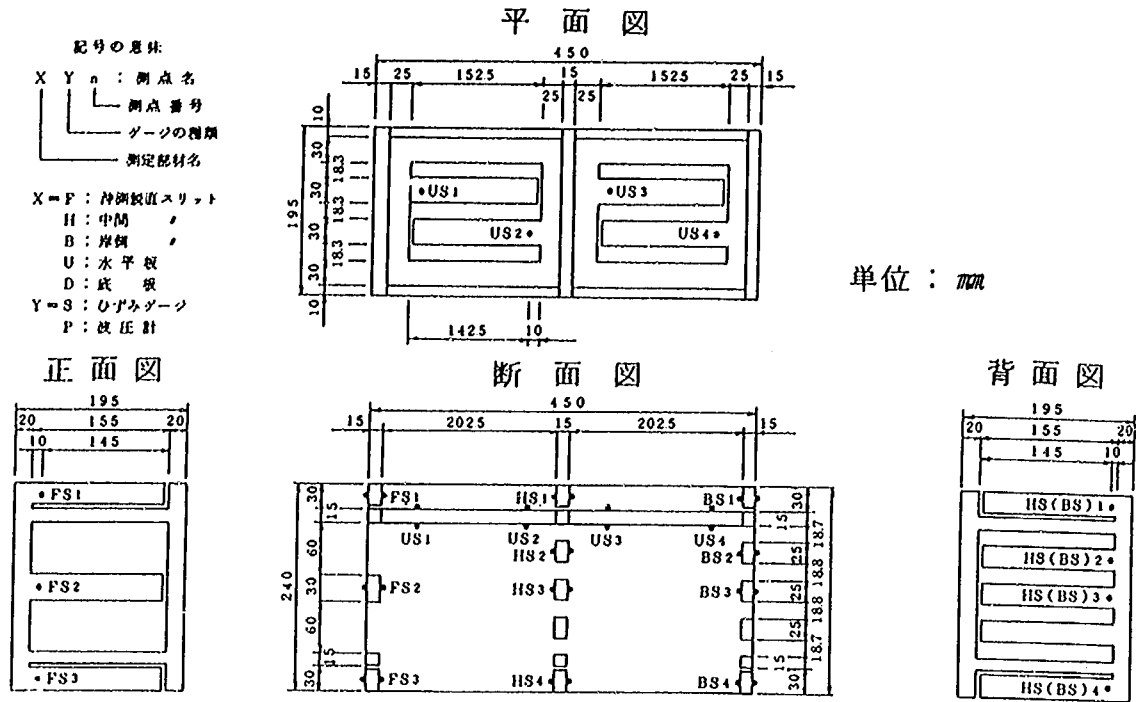


図3.9 水平板付スリット型(2)の模型形状寸法

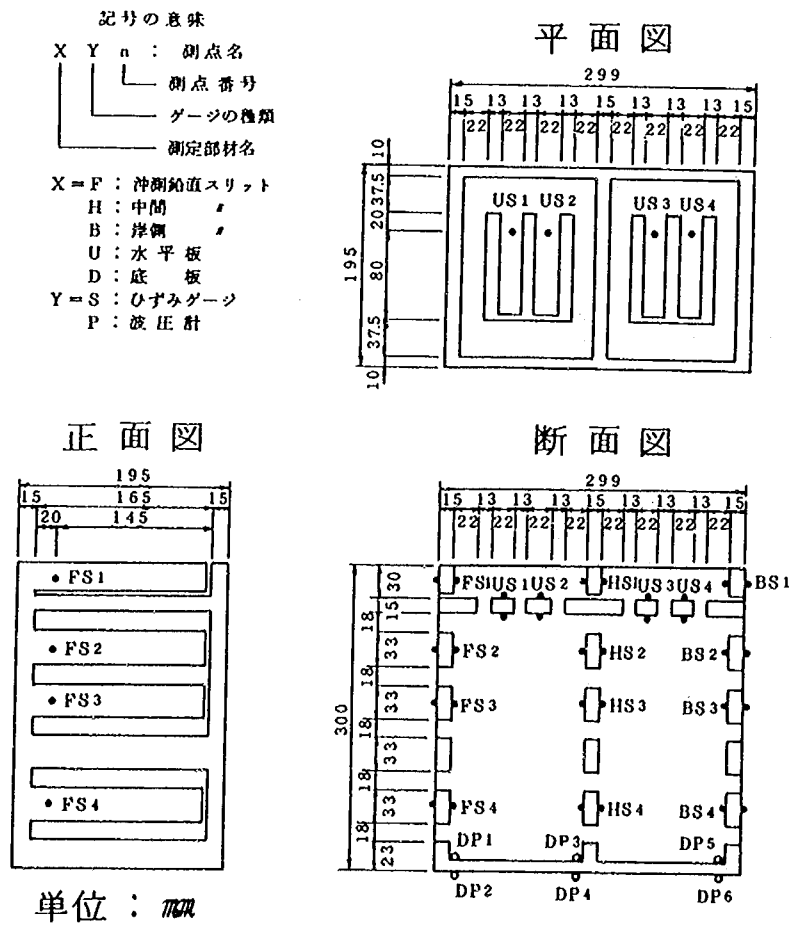


図3.10 透過水平板付スリット型の模型形状寸法

3.3.3 波力の測定方法

測定項目は、入射波高、構造物周辺の波高、全水平波力、全鉛直波力、部材波力である。各ケースの測点数の詳細を表3.6に示す。

表3.6：構造模型に対する水理条件と測点数

模 型	水 理 条 件			測 点 の 種 類 お よ び 測 点 数				
	h = 30cm (21波浪)	h = 28.5cm (10波浪)	h = 27cm (10波浪)	波 高	3 分 力 計	波 圧 計	歪 ゲージ	合 計
S L 1	○			4	3	0	1 5	2 2
S L 2	○		○	4	3	6	1 5	2 8
P L S 1	○	○		4	3	0	1 5	2 2
P L S 2	○			4	3	0	1 3	2 0
P L S 3	○		○	4	3	0	1 5	2 2
V H S 1	○		○	4	3	6	1 6	2 9
V H S 2	○			4	3	6	1 6	2 9
V H S 3	○			4	3	0	0	7

測定は波形の安定後に開始し、7 波以上 (20s) 測定した。それぞれの測定データは動ひずみアンブを介してデータレコーダにより磁気テープに記録した。データサンプリング間隔は、0.002s (500Hz) とした。

全波力の測定装置を図3.11に示す。全波力は三分力計を用いて測定した。三分力計の容量は、水平・鉛直波力については50kgf、抵抗モーメントについては25kgf・mである。よって、三分力計の測定容量を考慮して、模型は測定部分とダミー部分に分けた。測定部分は、治具を介して上部を固定した三分力計に取り付けた。また、その両側に測定部分と同一形状の2つのダミー部分を固定した。波力の測定においては、水平波力は岸向きを、鉛直波力は上向きを正とした。

鉛直スリットおよび水平板に作用する部材波力はひずみゲージにより測定した。図3.7～3.10に示したように、各部材の固定端部の表と裏にそれぞれ2枚ずつひずみゲージを貼付した。2ゲージ法により曲げひずみを測定し、応力・ひずみ関係を用いて部材波力を換算した。

底版に作用する部材波力は、超小型波圧計により測定した。最大200gf/cm²まで測定可能な超小型波圧計を底版の表・裏両面に粘着テープを貼付した。底版に作用する波力は、両面の波圧の差より求められる。

以後、部材波力の測定点を次のルールに従い3文字で表す。まず、1番目の文字は部材を示す。すなわち、鉛直スリットの場合沖側より1枚目をF (Forward)、2枚目をH (Half)、3枚目をB

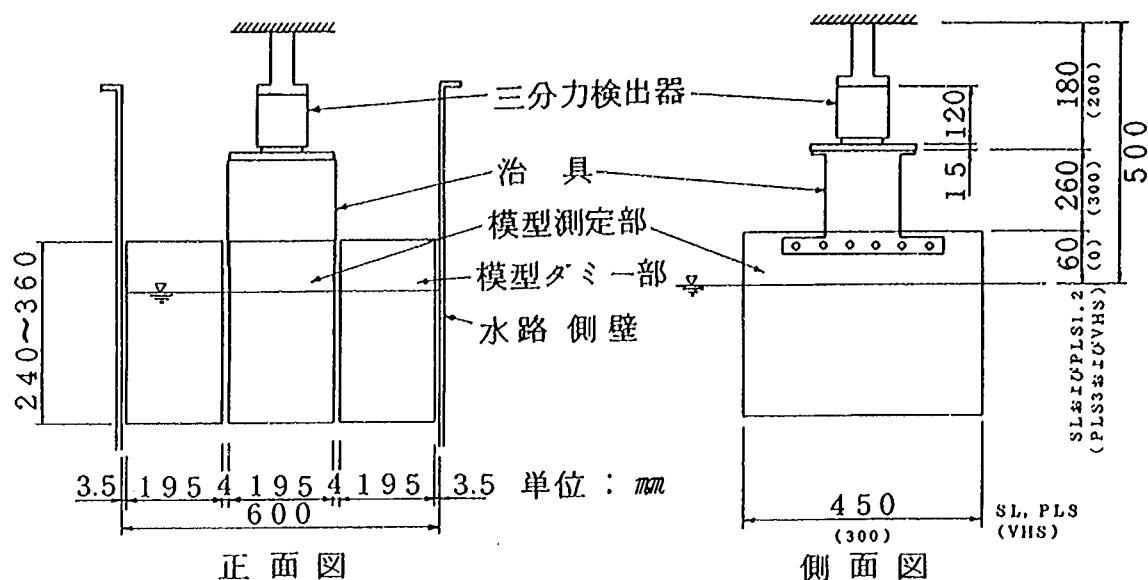


図3.11 全波力測定装置

(Backward) とし、水平板を U (Up), 底版を D (Down) とした。2 番目の文字は計測器を意味し、ひずみゲージを S (Strain), 波圧計を P (Pressure) とした。3 番目の数字は測点の位置を意味し、下向きまたは波の入射方向に番号を増やすものとする。

3.3.4 データの解析方法

収録した測定データの処理は、土木研究所の大型電算機を用いて行った。解析内容は、時刻歴波形の作図、データ群中の 1 周期ごとの極大値と平均値の算定、およびスペクトル解析である。ただし、極大値にはばらつきが多いため、平均値の算定では、データ群中の最大値の 1/2 以上となる極大値を対象とした。これは、本研究が安定性の検討および部材の設計波力を明らかにする目的で行われたものであり、著しく小さいデータの影響を取り除く必要があるからである。

碎波条件における波力の測定では測定系の動的特性による衝撃応答が問題となる。測定された外力の応答波形から元の作用外力を精度よく推定可能なのは、次の条件下に限られることが谷本らにより示されている⁷⁾。

$$\tau / T_N \geq 2.0 \quad (3.1)$$

ここに、 τ : 外力の作用時間, T_N : 応答系の固有振動周期である。さらに、文献 7) によればこの条件下で得られた外力の応答波形の解析では、応答系の固有振動数の約 55% 以上をカットする必要があることも示されている。本実験に用いる模型の部材の固有振動数は約 100 Hz であるから、解析ではカット周波数を 50 Hz とした。なお、全波力測定結果については、模型固定部分の固有振

動数が約18Hzと小さいことからカット周波数を小さくする必要がある。しかし、予備実験の結果、カット周波数が18Hzと50Hzの場合の解析結果がほぼ同じであったので、今回の解析では一律50Hz以上の周波数成分をカットすることとした。

なお、カット周波数決定の詳細については付章1を参照されたい。

全波力の測定結果を検討する場合、全波力をスリットの投影面積で除した平均波力強度 f_x および f_z を用いる。この理由は、同一タイプの構造物で吃水・堤体幅を変化させると、それに比例して全波力 F_x 、 F_z が変化するが、平均波力強度 f_x および f_z はほぼ一定で各タイプに固有な値と考えられることによる。

本研究で対象とする構造物は全て低天端で大波浪時には越波させる構造となっている。そこで、平均波力強度の算定は式 (3.2), (3.3) で行うものとする。

$$f_x = \frac{F_x}{D (h_1 + h_2)} \quad (3.2)$$

$$f_z = \frac{F_z}{B \cdot D} \quad (3.3)$$

ここに、 F_x ：全水平波力（測定値）（gf）

F_z ：全鉛直波力（測定値）（gf）

f_x ：平均水平波力強度（gf/cm²）

f_z ：平均鉛直波力強度（gf/cm²）

B ：構造物の堤体幅（cm）

D ：構造物の沿岸方向の長さ（cm）

h_1 ：構造物の天端高（cm）

h_2 ：構造物の吃水深（cm）

次に、合田式を用いて空隙のない不透過性構造物の平均波力強度を算定し（式 (3.4), (3.5)）、測定結果により得られた透過性構造物の場合と比較した。

$$f_{GX} = \frac{F_{GX}}{D (h_1 + h_2)} \quad (3.4)$$

$$f_{GZ} = \frac{F_{GZ}}{B \cdot D} \quad (3.5)$$

ただし、 F_{GX} ：合田式による全水平波力（gf）

F_{GZ} ：合田式による全鉛直波力（gf）

f_{GX} ：合田式による平均水平波力強度（gf/cm²）

f_{GZ} ：合田式による平均鉛直波力強度（gf/cm²）

であり、他のパラメータは式 (3.2), (3.3) と同じである。

本研究では急勾配斜面上での碎波による波圧強度の増大を考慮し、合田式中の係数 α_2 を波圧強度の増大を表すパラメータと考え、合田式の算定において考慮することとした。なお、詳細は付章2を参照されたい。

測定される全水平波力は、合田式で算定される全水平波力に比べて小さいはずである。そこで、低減割合を定量的に調べるため、測定値と計算値との比 λ を求めた。

$$\lambda = \frac{F_x}{F_{Gx}} = \frac{f_x}{f_{Gx}} \quad (3.6)$$

実験結果より求まる λ の上限値は、各構造タイプの波力を合田式で算定する場合の低減係数とみなすことができる。

3.3.5 部材波力の解析方法

部材波力の測定では、部材波力はひずみ値より換算する必要がある。その解析方法は次のようである。まず、各部材には、部材波力が一様に作用するとする (図3.12)。部材は片持ち梁であるから、測点位置 (ひずみゲージ貼付位置) に生ずる曲げモーメント M は次式で表される。

$$M = \frac{p \cdot b}{2} \ell^2 \quad (3.7)$$

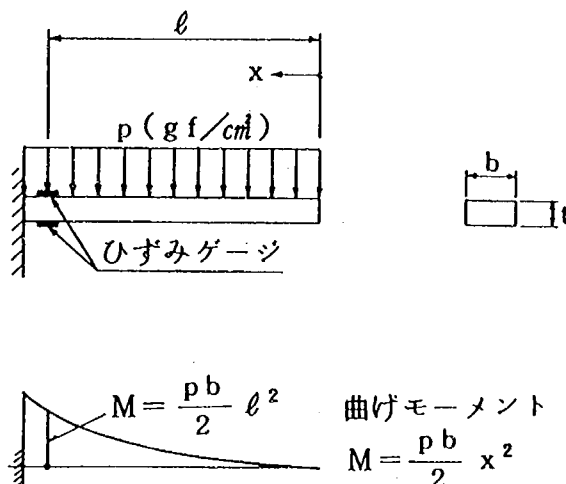


図3.12 部材に作用する波力

ここに、 M : 部材の測点位置に生じる曲げモーメント ($\text{gf} \cdot \text{cm}$), p : 部材波力 (gf/cm),

b : 部材の幅 (cm), ℓ : 部材の自由端から測点までの長さ (cm) である。

これより、曲げ応力 σ は次式となる。

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{6 M}{b t^2} = \frac{3 p}{t^2} \ell^2 \quad (3.8)$$

ここに、 σ : 部材の測点位置に生じる曲げ応力 (gf/cm^2), W : $W = bt^2/6$ により求められる部材の断面係数 (cm^3), t : 部材の厚さ (cm) である。

一方、応力-ひずみ関係は次式で表される。

$$\sigma = E \epsilon \quad (3.9)$$

ここに、E：部材の弾性係数 (gf/cnf)， ϵ ：曲げひずみである。

式 (3.9) に式 (3.8) を代入すれば、測定されたひずみ ϵ より部材波力 P を求める算定式が得られる。

$$P = \frac{E t^2 \epsilon}{3 \ell^2} \quad (3.10)$$

式中の t ， ℓ は既知量である (図3.7～3.10参照)。

なお、Eなどの部材の特性に関する量は、予備実験により求めた。各部材の特性を表3.7に示す。

表3.7(a)：部材の特性 (スリット型)

部 材 名	S L 1			S L 2		
	弾性係数 E (kgf/cnf)	固有振動数 (Hz)		弾性係数 E (kgf/cnf)	固有振動数 (Hz)	
		空 気 中	水 中		空 気 中	水 中
F S 1	42800	122.9	56.0	46600	107.2	61.8
F S 2	41000	128.7	64.6	45800	119.7	72.8
F S 3	39900	143.4	76.7	41100	104.3	62.2
F S 4	38600	124.9	72.3	41300	114.0	61.5
F S 5	41400	109.4	74.3	49600	122.3	78.7
H S 1	40200	168.9	98.5	37500	167.7	97.1
H S 2	41100	177.0	104.5	38600	168.3	102.5
H S 3	40700	175.0	103.6	39100	166.7	99.9
H S 4	41000	175.8	102.8	39500	165.0	101.4
H S 5	40800	174.2	94.5	40300	173.3	109.4
B S 1	45200	125.9	61.0	48300	128.3	108.2
B S 2	43300	124.3	63.3	41800	172.7	74.8
B S 3	43000	136.9	59.6	41100	144.3	82.0
B S 4	42200	141.5	73.3	42200	136.2	77.7
B S 5	43600	123.7	65.5	47200	139.3	84.3

表3. 7(b)：部材の特性（水平板付スリット型）

部 材 名	P L S 1 および P L S 2			P L S 3		
	弾性係数 E (kgf/cm ²)	固有振動数 (Hz)		弾性係数 E (kgf/cm ²)	固有振動数 (Hz)	
		空 気 中	水 中		空 気 中	水 中
F S 1	37100	99.1	69.1	39000	125.6	71.9
F S 2	35000	116.9	79.9	38300	144.2	79.1
F S 3	35500	128.5	84.4	39000	99.5	60.5
H S 1	37600	102.0	66.1	40400	113.8	68.7
H S 2	36800	47.2	28.7	37900	163.5	101.7
H S 3	36000	44.9	28.2	37800	158.5	94.3
H S 4	-	-	-	39200	96.7	61.3
B S 1	36600	105.1	74.1	40200	111.6	72.0
B S 2	35200	136.3	89.2	38300	154.4	100.3
B S 3	35700	134.6	89.1	37400	150.6	92.8
B S 4	-	-	-	41200	100.2	59.0
U S 1	36600	417.5	199.1	36600	151.2	96.3
U S 2	36200	315.7	175.4	35500	144.0	87.6
U S 3	35700	313.8	188.3	36700	130.6	83.9
U S 4	36600	352.2	189.6	35000	128.4	85.8
U S 5	36800	335.2	200.2	-	-	-
U S 6	36000	403.3	201.8	-	-	-

表3.7(c)：部材の特性（透過水平板付スリット型）

部 材 名	V H S 1 および V H S 3			V H S 2		
	弾性係数 E (kgf/cm ²)	固有振動数 (Hz)		弾性係数 E (kgf/cm ²)	固有振動数 (Hz)	
		空 気 中	水 中		空 気 中	水 中
F S 1	36600	109.4	73.4	38000	126.9	75.1
F S 2	36900	126.7	75.5	39000	134.4	74.5
F S 3	36600	125.7	74.2	38800	132.2	72.7
F S 4	37600	131.4	78.1	38100	132.2	72.8
H S 1	36600	102.5	63.0	37500	107.4	62.5
H S 2	37400	121.6	90.7	36700	144.9	97.3
H S 3	37500	125.9	89.2	36700	151.9	80.8
H S 4	36900	136.8	81.2	36500	154.5	90.3
B S 1	37700	119.0	81.8	37700	127.6	80.7
B S 2	38100	129.7	77.7	38000	134.6	73.4
B S 3	38800	129.4	77.1	37700	128.2	73.0
B S 4	39600	137.6	80.1	37900	130.5	74.3
U S 1	36400	268.5	263.4	36100	289.1	232.8
U S 2	36400	247.7	257.3	36000	267.2	266.4
U S 3	36400	246.0	243.8	35900	287.8	261.3
U S 4	36300	239.5	256.5	36200	273.2	259.6

3.4 実験結果

3.4.1 スリット型*

(1) 全波力測定結果

三分力計による測定記録の一例として、砕波領域である $h = 30.0\text{cm}$, $H' = 36.4\text{cm}$, $T = 2.4\text{s}$ の波浪条件の下での構造物前面および後面の水位変動 η_1 , η_2 と構造物に作用する全水平波力 F_x および全鉛直波力 F_z の時間波形を図 3.13 に示す。カーテンウォール形式 (SL 1) とケーソン形式 (SL 2) 両者の結果を示した。全水平波力 F_x は, SL 1 および SL 2 の場合とも構造物前面水位 η_1 とほぼ同位相で変動しており, η_1 が最高水位になった瞬間に鋭いピークを示す。すなわち, 構造物の前面に水塊が激しく衝突した瞬間に, 構造物には波の進行方向の衝撃圧が働いている。一方, その時刻での構造物後面の水位 η_2 は上昇中で, ちょうど静水面を切る位置にある。また, SL 2 ではスリットが水底まで設置されている

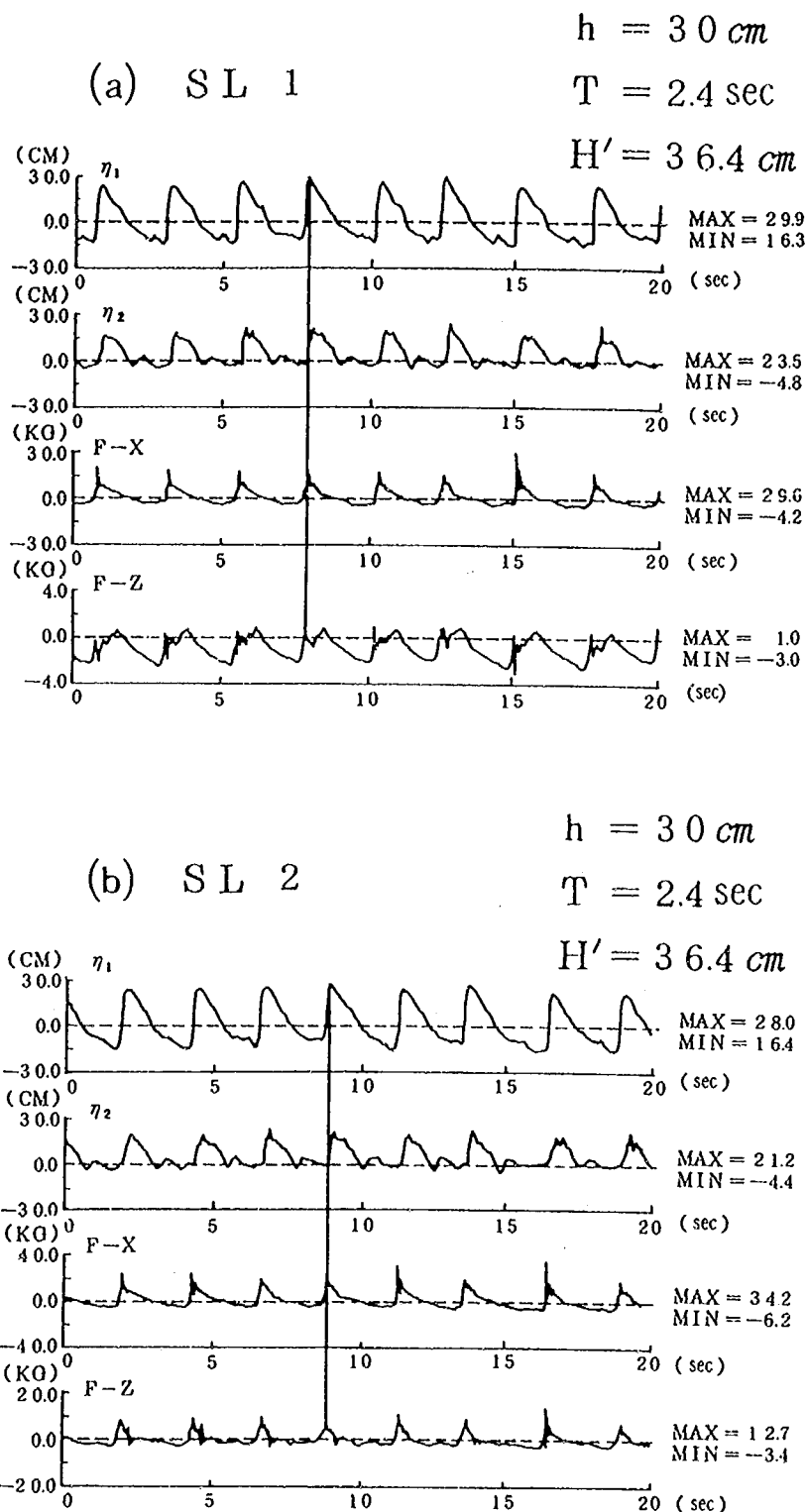


図3.13 全波力および水位の時刻歴図 (SL 1, SL 2)

*執筆: 萩原運弘 (清水建設株式会社技術研究所)

ため、SL1に比べて F_x の最大値が若干大きくなっている。一方、全鉛直波力 F_z の波力波形についてみると、SL1とSL2では明らかに異なっている。すなわち、底版を有するSL2の F_z は構造物前面水位 η_1 に追従して増大し、 η_1 が最高になった瞬間に F_x と同時に上向きの最大値を示す。しかし底版を有しないSL1の場合、 F_z は双峰形の波力波形を示しており、最初の鋭いピークは構造物前面の水位上昇に、また第二のピークは構造物後面の水位上昇に対応している。すなわち、 η_1 が上昇して最高水位になるまでは構造物内部の水位も上昇し、構造物には上向きの力が働いているが、構造物に水塊が衝突すると同時に、水底とスリット下端の間を通過して構造物の外へ流れ出る激しい水流が生じ、これによって構造物には下向きの力が働くようになる。しかしすぐに、若干 η_1 とは後れて上昇する η_2 に対応して、再び上向きの力が働くようになるものと考えられる。また、SL1には底版がないためSL2に比べて F_z の値は非常に小さく、全体的に下向きの力が卓越している。

SL1およびSL2に対して、測定記録から読み取った全水平波力および全鉛直波力の最大値と仮想通過波高の関係を図3.14～図3.17に示す。ただし、縦軸は平均波力強度である。また図中の斜線を付けたものは、非碎波領域のデータを表している。平均水平波力強度 f_x は、SL1およびSL2のいずれの場合とも、波力波形に認められたように正の値が卓越し、全般的に H' に比例して増大する。しかし $T=1.6\text{ s}$ や 2.0 s の波では、 H' が30cmを越すと構造物の相当手前で碎波するようになるため、正の f_x 値は一定かやや減少する傾向が認められる。また、周期が長くなると正の f_x 値は若干大きくなる傾向がある。さらに、SL2において潮位が変化した場合（図中、水深の相違で表してある）、水深が浅い方が正の f_x 値は若干大きくなるようである。これは $H'=23\sim 26\text{ cm}$ の場合、 $h=30\text{ cm}$ の水深ではまだ碎波が起こらないのに対して $h=27\text{ cm}$ の水深では碎波するためであり、また両者が碎波する $H'\approx 30\text{ cm}$ 程度では、水深の浅い方が水面付近の衝撃的な波力を受けやすくなるためと考えられる。一方、平均鉛直波力強度 f_z は波力波形に認められたように、SL1では負の値が、またSL2では正の値が卓越し、これらはSL1の正の値を除いて H' に比例して増大する傾向を示す。周期に関しては f の値に

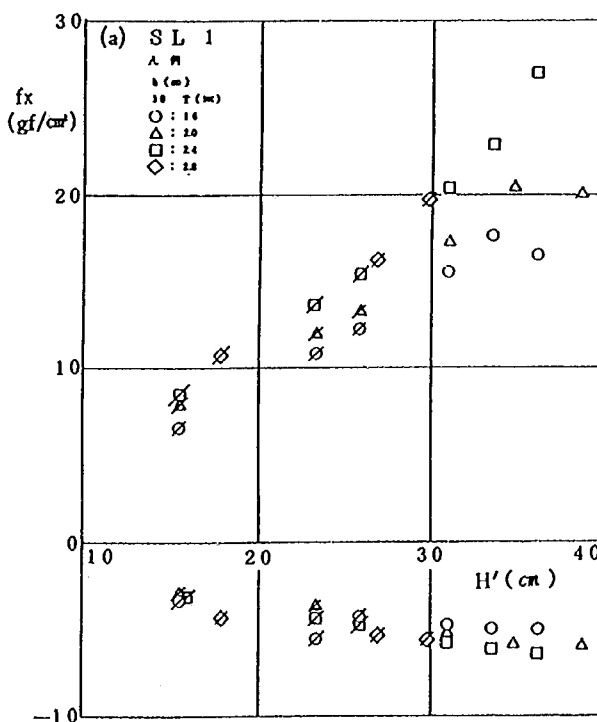


図3.14 f_x と H' の関係 (SL1)

は明確な差異は認められないが、S L 2 に碎波が作用する条件では正の f_z 値は周期に比例して大きくなっている。さらに S L 2 において潮位が変化した場合には、水平波力と同じように、潮位が低い方が正の f_z 値は若干大きくなる傾向がある。しかし f_z の値は f_x に比べて非常に小さく、底版の有る S L 2 の揚圧力は岸向き方向の水平波力のほぼ $1/3$ 程度、底版の無い S L 1 の場合では $1/10 \sim 1/20$ 程度の大きさをもつのみである。

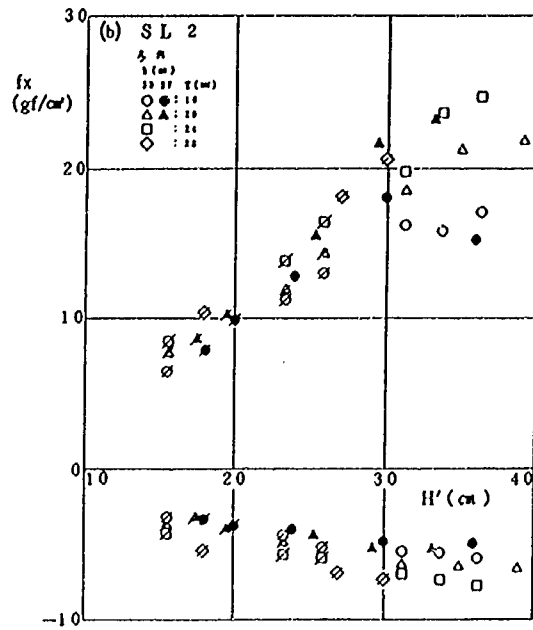


図3.15 f_x と H' の関係 (S L 2)

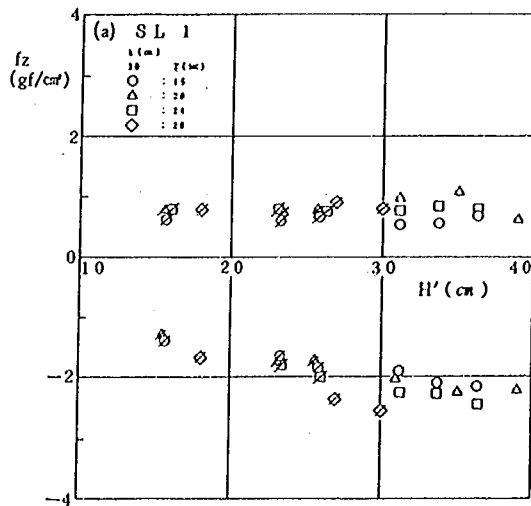


図3.16 f_z と H' の関係 (S L 1)

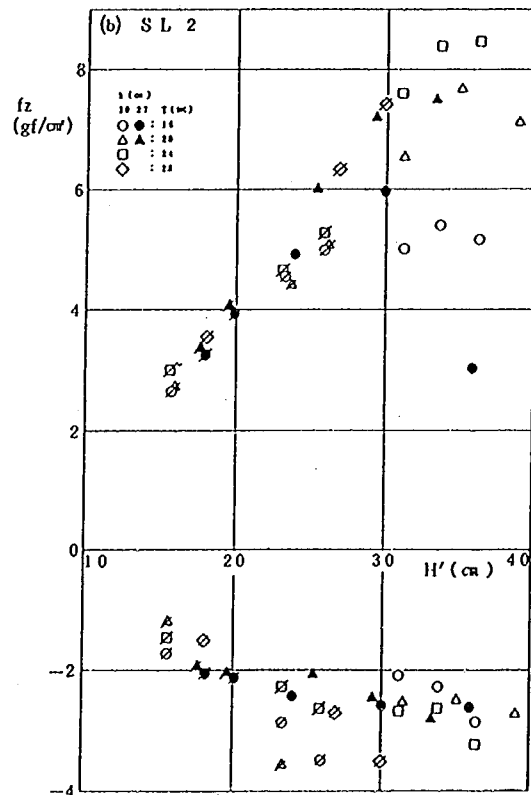


図3.17 f_z と H' の関係 (S L 2)

次に、S L 1 および S L 2 に作用する正の最大全水平波力に及ぼす周期の効果をより明確に把握するために、無次元平均水平波力強度 $f_x / w_0 H'$ と相対幅 B / L との関係を図3.18, 3.19に示す。ここに、 w_0 は水の単位体積重量 (gf/cm^3) である。いずれの構造形式においても、 $f_x /$

$w_0 H'$ は B/L が小さいほど、すなわち周期の長い波ほど大きな値を示す。構造物全体に働く波力は、構造物を構成する各スリットに作用する部材波力の総和となるから、周期の長い波ほど三枚のスリットはほぼ同時に波力を受けるようになり、全波力が大きくなると考えられる。これに対して、周期の短い波では三枚のスリットに働く各部材波力に位相差が生じるため、全波力としては小さくなると考えられる。

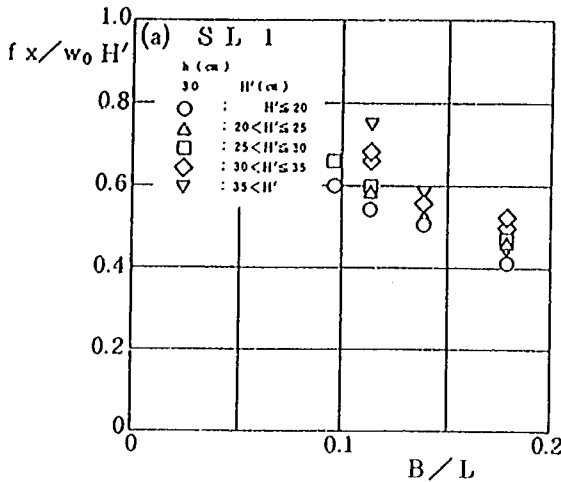


図3.18 $f_x / w_0 H'$ と B/L の関係 (SL1)

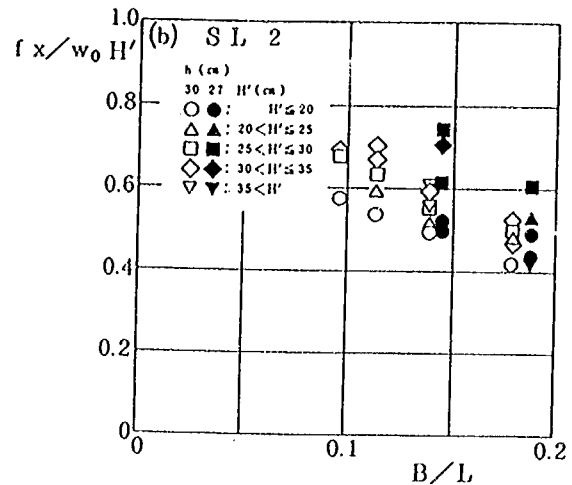


図3.19 $f_x / w_0 H'$ と B/L の関係 (SL2)

SL2の正の最大全鉛直波力についても水平波力の場合と同様に、無次元鉛直力強度 $f_z / w_0 H'$ と相対幅 B/L の関係を図3.20に示す。 $f_z / w_0 H'$ の値は小さいが、水平波力の場合と同様の傾向が認められる。

図3.21, 3.22に、SL1およびSL2の全鉛直波力最大時の平均水平波力強度 f_x' と最大全水平波力の平均波力強度 f_x との比 f_x' / f_x を相対幅 B/L に対して示した。SL1の場合、 f_x' / f_x の値はほぼ0.1~0.95の範囲で大きくばらついている。前述したようにSL1の全鉛直波力波形は二つのピークをもつ双峰型になっており、波浪条件によって第一のピークで最大値になったり、第二のピークで最大値になったりしているためである。しかし、SL2では全水平波力のピーク

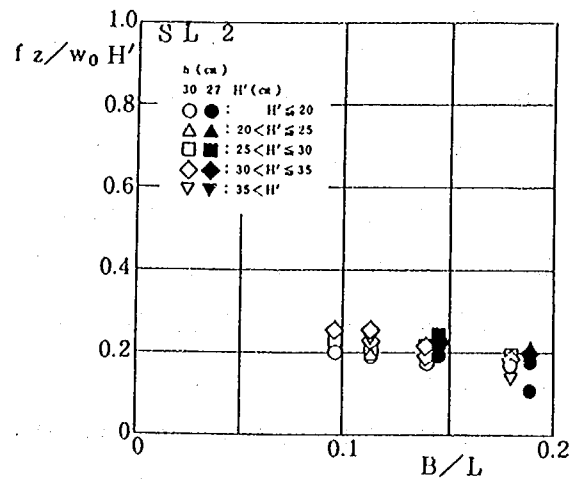


図3.20 $f_z / w_0 H'$ と B/L の関係 (SL2)

値と全鉛直波力のピーク値はほぼ同時に出現するため、 f_x' / f_x の値は一例を除いて0.6~1.0の範囲にある。また、いずれの場合も B/L に対しては明確な傾向は認められない。

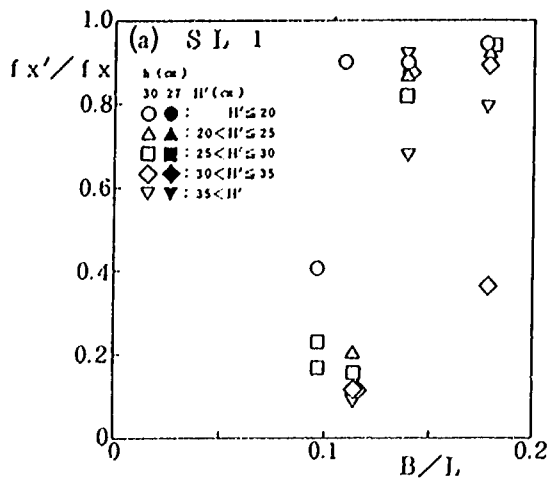


図3.21 f_x' / f_x と B/L の関係 (SL1)

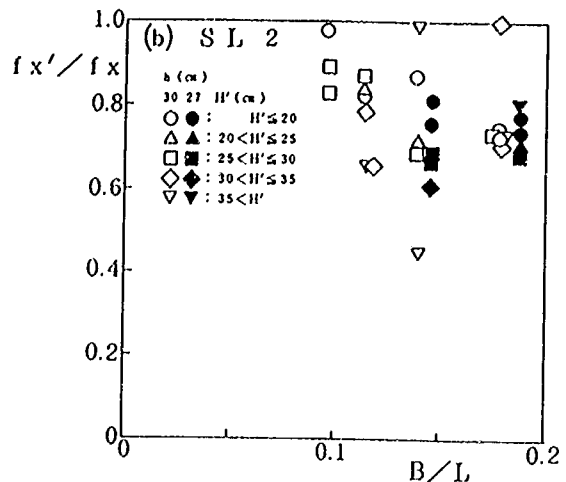


図3.22 f_x' / f_x と B/L の関係 (SL2)

次に、SL 2の場合について、全水平波力最大時の平均鉛直波力強度 f_z' と最大全鉛直波力の平均波力強度 f_z との比 f_z' / f_z を、相対幅 B/L に対して図3.23に示した。 f_z' / f_z の値はほぼ0.4～0.95の範囲にあり、やはり B/L に対しては明確な傾向を示さない。

(2) 部材波力測定結果

歪みゲージによる測定記録の代表例としてSL 1, SL 2の静水面近傍の前面スリット部材FS 2, 中間スリット部材HS 2, 後面スリット部材BS 2の波力波形記録を、また波圧計による測定記録の代表例としてSL 2の底版前端部のDP 2における波圧波形を、構造物前面および後面の水

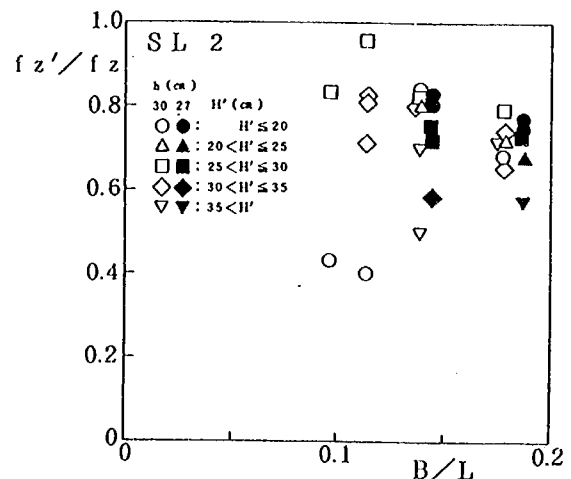


図3.23 f_z' / f_z と B/L の関係 (SL2)

位変動記録 η_1 , η_2 とともに図3.24に示す。ただし、波浪条件は全波力の波形記録を示した図3.13の場合と同じである。SL 1およびSL 2の場合とも、静水面の近傍に位置するFS 2, HS 2およびBS 2には衝撃的な岸向き波力が働いており、逆に、引き波時には部材が水面上に露出するため冲向き波力はほとんど作用していない。また前面スリット部材FS 2の波力は、構造物前面水位 η_1 が急激に上昇し水塊が激しく衝突すると同時に最大に達しており、最大値もHS 2やBS 2に比べて大きい。中間スリット部材HS 2には、FS 2の波力が最大に達した時にはまだ波力が作用していないが、FS 2の波力が最大に達した直後から急激に波力が作用する。その波力波形はFS 2の場合と類似しているが、FS 2に比べて、ピーク値に続く腰掛け部分が現れ

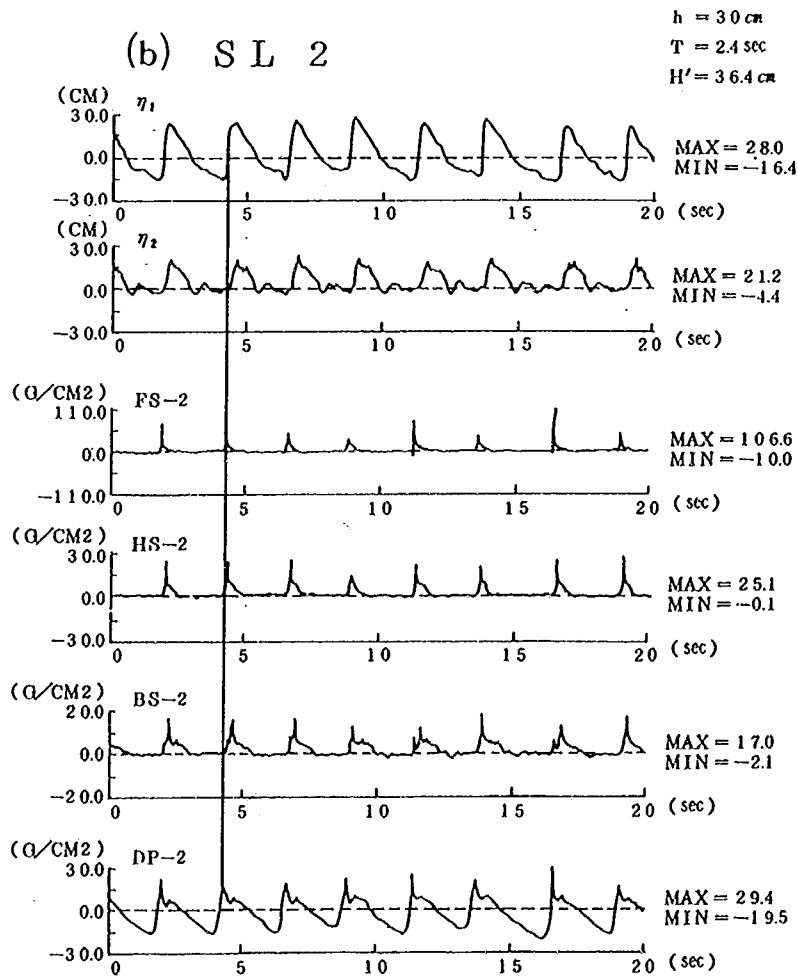
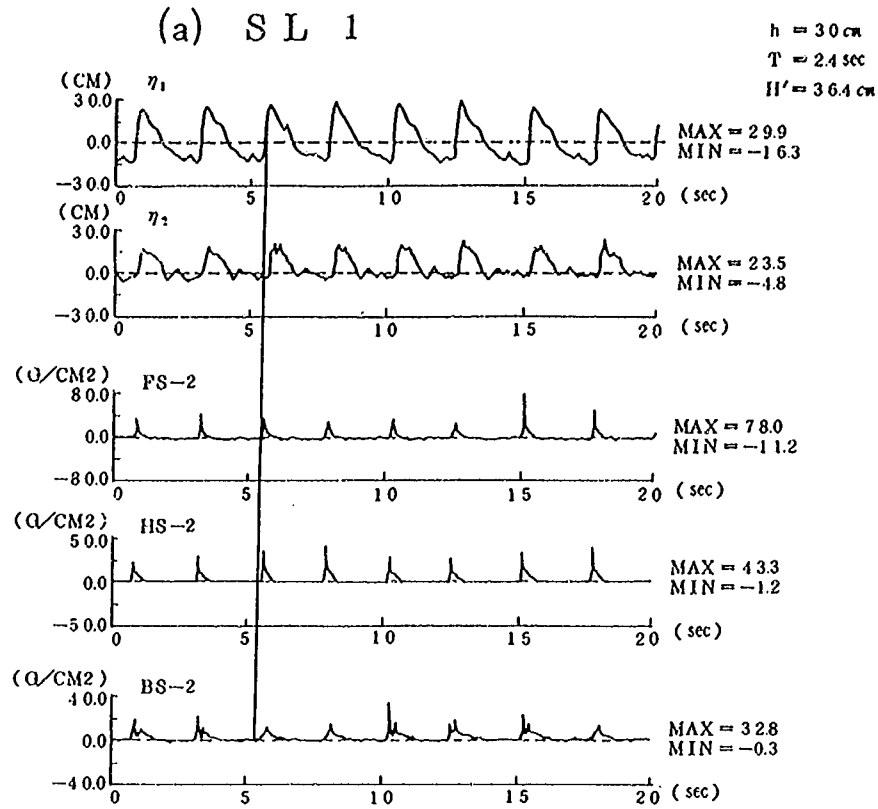


図3.24 部材波力及び水位の時刻歴図 (S L 1, S L 2)

るようになり、波力の作用時間も若干長くなる。一方、後面スリット部材 B S 2 の波力は、H S 2 の波力が最大になった後から作用し始め、立ち上がり部分に小さなピークが現れた後、最大値に達する。これは、後面スリットの前面の水位が上昇し始め、まだ充分上昇していない時、前面および中間のスリットを通過してきた水塊が後面スリットに衝突するためと考えられる。また、水塊が後面スリットに衝突した後も後面スリットの前面の水位は上昇するため、波力が最大値を示した後は腰掛け部分が明確に現れている。したがって、波力の作用時間も F S 2 や H S 2 に比べて非常に長い。S L 2 の底版前端部の D P 2 の波圧は構造物前面水位 η_1 に対応しており、 η_1 が最高水位になった時に上向きの最大波圧を示している。この時刻には、前述したように全水平波力 F_x 、全鉛直波力 F_z および前面部材 F S 2 も同時に最大値をとる。

さらに、図3.25には S L 2 の前面スリット部材 F S 1 ~ F S 5 の波力波形記録を示す。ただし、波浪条件は図3.24の場合と同じである。静水面上の部材 F S 1、静水面付近の部材 F S 2、静水面直下の部材 F S 3 は引き波時に空中に露出するため負の波力値を示さない。また静水面下約12cmにある F S 4 は、引き波時にちょうど水面付近にくるため負の波力が若干作用し始めている。さらに、静水面下約23cmにある F S 5 は引き波時にも完全に水中に没しているため、明確に冲向き方向の波力が作用している。これらの部材の正の最大波力は、当然のように F S 1 から F S 5 の順に小さくなっており、したがって波力の作用時間も F S 1 から F S 5 の順に大きくなっている。

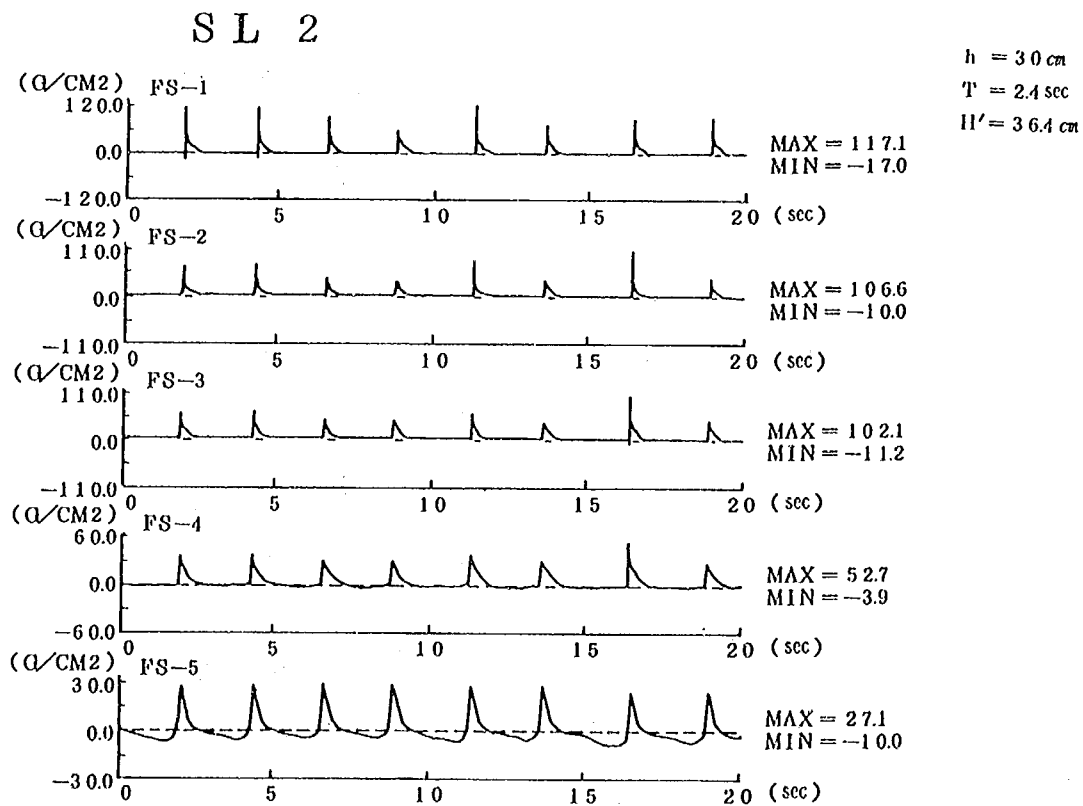


図3.25 沖側鉛直スリットの部材波力の時刻歴図 (S L 2)

SL1およびSL2に対して、前面スリット部材FS2、中間スリット部材HS2、後面スリット部材BS2およびSL2の底版前端部DP2-DP1に作用する正の波力強度 P と仮想通過波高 H' の関係を図3.26～3.32に示す。なお、SL2の底版前端部の波力強度は底版下面DP2と底版上面DP1の差圧として求めたものである。図中、非碎波領域のデータには斜線を付けて区別しており、また、波力強度と波高の関係を分かり易くするために、適当な直線関係を示した。FS2の P の値は、SL1およびSL2の場合とも非碎波領域では H' に比例して増大するが、碎波が作用する時には著しく大きくなる場合があり、碎波領域での P の最大値はS

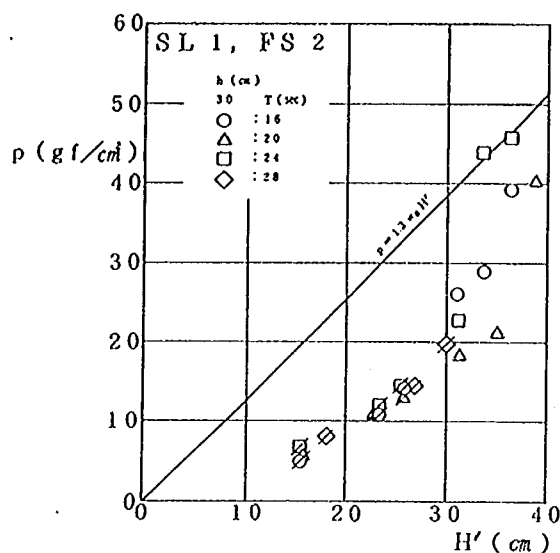


図3.26 P と H' の関係 (SL1 ; FS2)

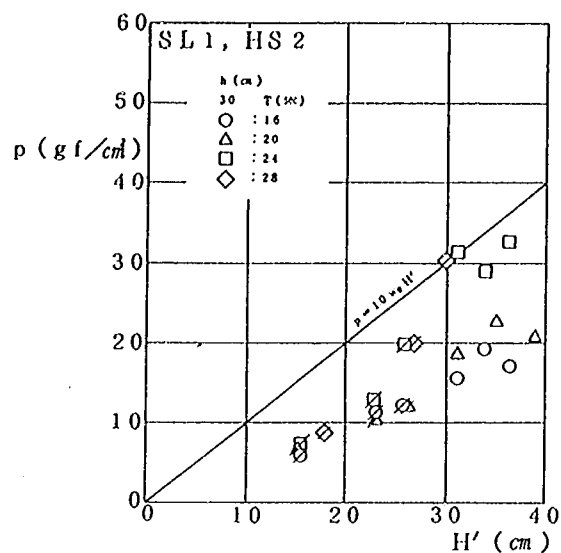


図3.27 P と H' の関係 (SL1 ; HS2)

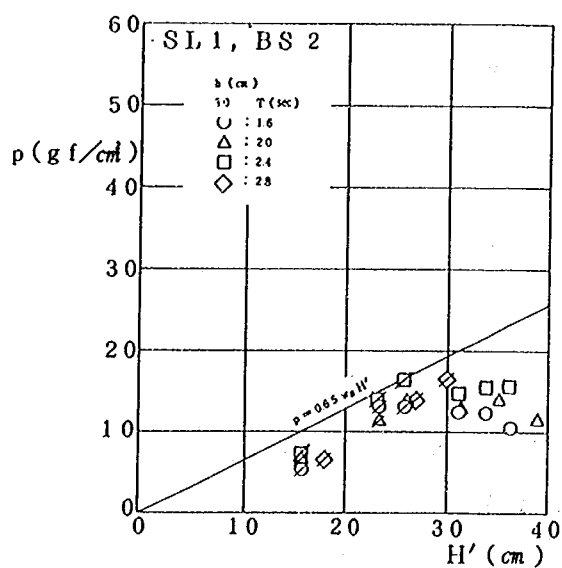


図3.28 P と H' の関係 (SL1 ; BS2)

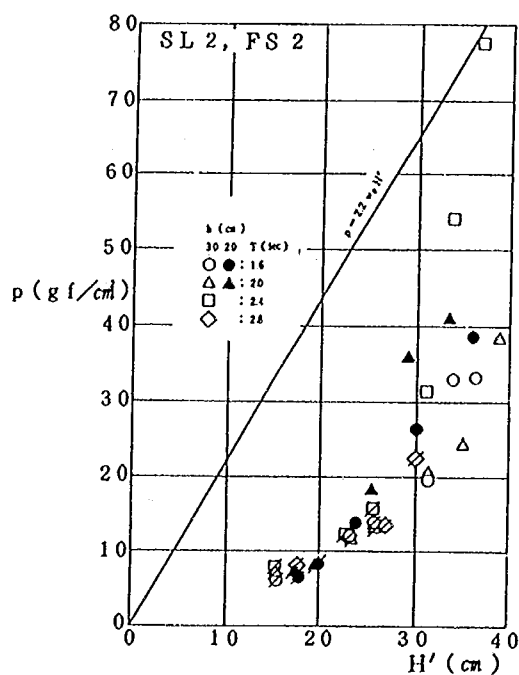


図3.29 P と H' の関係 (SL1 ; FS2)

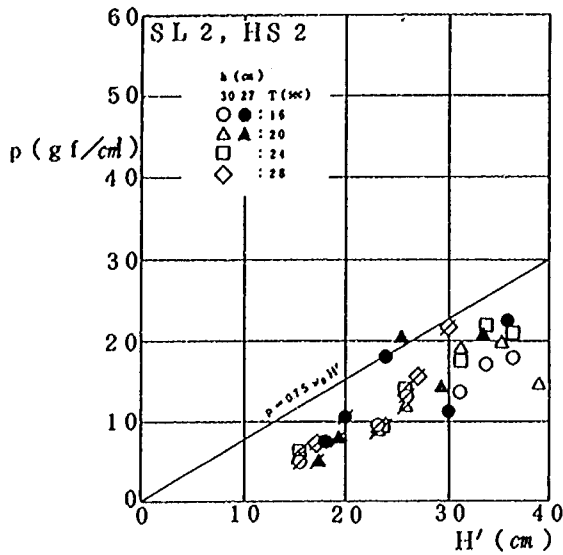


図3.30 p と H' の関係 (SL2 ; HS2)

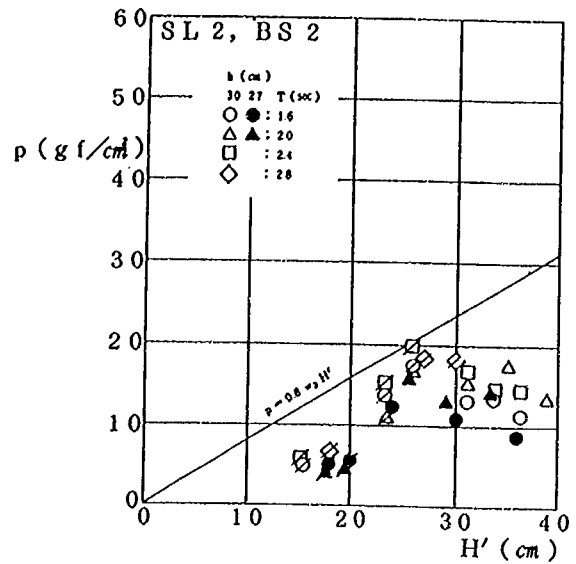


図3.31 p と H' の関係 (SL2 ; BS2)

L 1 で $1.3w_0H'$ 程度, S L 2 では $2.2w_0H'$ 程度となっている。また H S 2 の p の値は, S L 1 および S L 2 の場合とも非砕波領域から砕波領域に至るまで H' にほぼ比例して増大しており, S L 1 で $1.0w_0H'$ 以下, S L 2 ではほぼ $0.75w_0H'$ 以下となっている。一方 B S 2 の p の値は, S L 1 および S L 2 の場合とも非砕波領域ではやはり H' に比例して増大するが, 砕波が作用する場合には一定か, 逆に減少する傾向を示す。そのため, p の最大値は非砕波領域で生じ, S

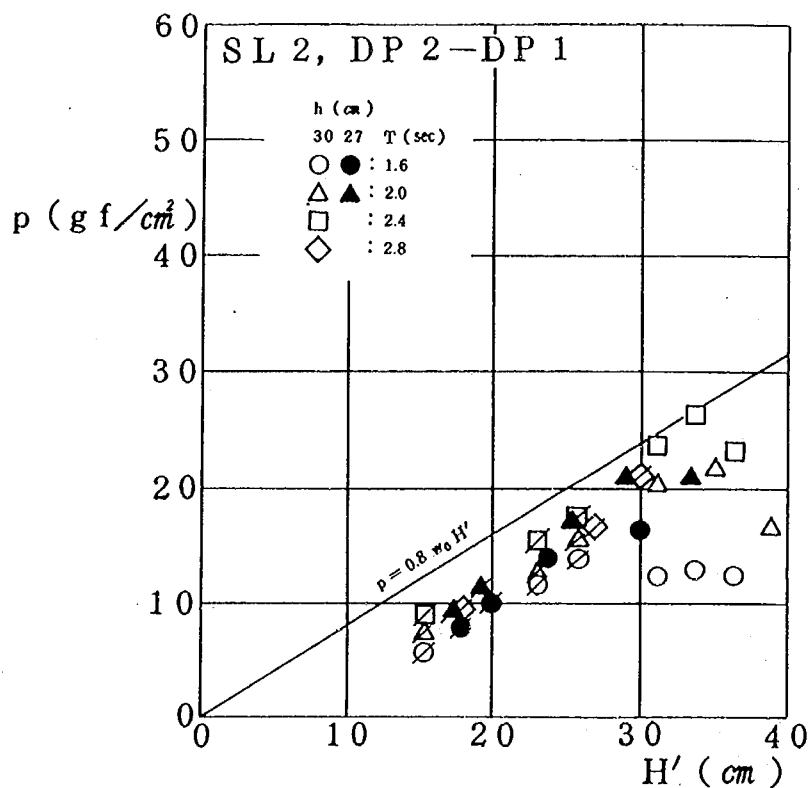


図3.32 p と H' の関係 (SL2 ; DP2-DP1)

SL1で $0.65w_0H'$ 程度、SL2の場合には $0.8w_0H'$ 程度となっている。また、周期については長い方がやや大きい傾向が認められる。さらに潮位の変化（図3.29～図3.31を参照）についてはPの値に明確な差異は認められないが、砕波が作用する場合には、FS2でのPの値が高潮位時よりも低潮位時で大きくなっている。一方、SL2の底版前端部では上向きの波力が卓越しており、DP2-DP1の値は $0.80w_0H'$ 以下の範囲にある。

(3) 安定性の検討に用いる設計波力

スリット型海域制御構造物の波力算定式を一般式の形で提案することは現時点では困難であるので、合田式を準用するのが便利であると思われる。その場合、どの程度の波力の低減を行えばよいか問題になる。SL1およびSL2に関して、実験値から求めた平均水平波力強度 f_x を合田式から計算した平均水平波力強度 f_{GX} で除した値と、仮想通過波高 H' の関係を図3.33、3.34に示す。ただし、斜線付は非砕波領域の値である。SL1の場合、 f_x/f_{GX} の値はほぼ0.5～0.75の範囲にあり、特に $H'=36\text{cm}$ 、 $T=2.4\text{s}$ の条件での値を除けば0.7以下である。仮想通過波高 H' を用いて整理しているため、砕波領域においては $T=1.6\text{s}$ および 2.4s の条件では f_x/f_{GX} の値は減少している。SL2の場合もSL1の場合と同様な傾向を示し、 f_x/f_{GX} の値はほぼ0.42～0.76の範囲にある。特に、 $h=27\text{cm}$ 、 $H'=29.4\text{cm}$ 、 $T=2.0\text{s}$ の条件で $f_x/f_{GX}=0.76$ と最大になっており、これを除けば f_x/f_{GX} の値はほぼ0.7以下である。一方、潮位変化に対しては $h=27\text{cm}$ 、 $H'=36.0\text{cm}$ 、 $T=1.6\text{s}$ の場合を除いて、高潮位時よりも低潮位時の方が f_x/f_{GX} の値は全体的に若干大きくなっている。またSL1およびSL2の場合とも、周期が長い波に対して f_x/f_{GX} の値は若干大きくなる傾向が認められる。

f_x/f_{GX} の値は近似的に波力の低減率 λ と

考えられ、SL1およびSL2の場合、上限に近い値として考えれば $\lambda \approx 0.7$ 程度を、また平均値として考えれば $\lambda \approx 0.63$ 程度を与えればよいと思われる。

次に、 $h=30\text{cm}$ 、 $H'=36.4\text{cm}$ 、 $T=2.4\text{s}$ の波浪条件に対して、SL1およびSL2の全水

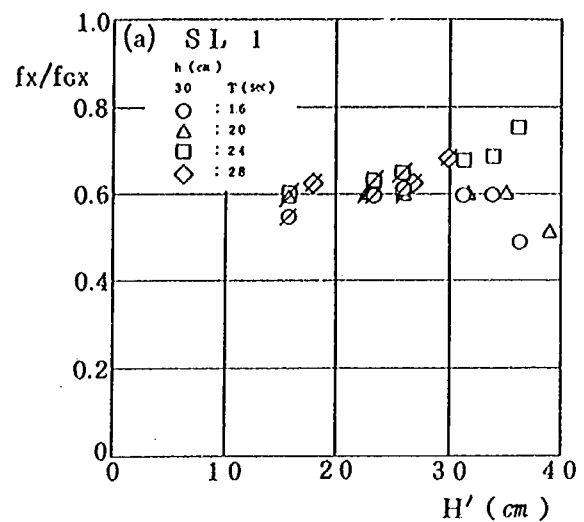


図3.33 f_x/f_{GX} と H' の関係 (SL1)

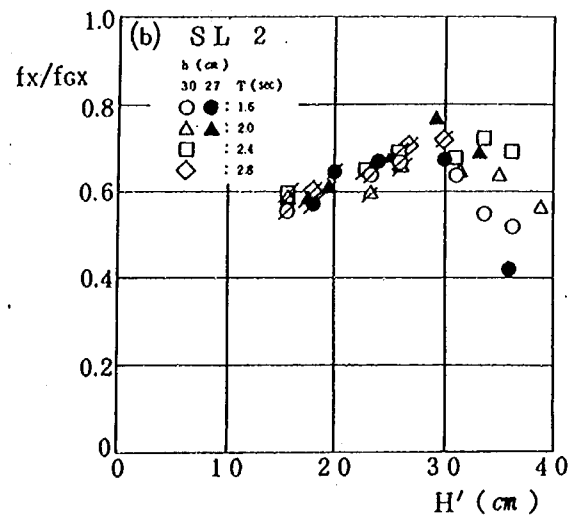


図3.34 f_x/f_{GX} と H' の関係 (SL2)

平波力が最大になるタイミングにおける同時波力分布を図3.35, 3.36に示す。構造物全体に正の最大水平波力が働く時刻では、前述したように構造物前面の水位 η_1 は最高、構造物後面の水位 η_2 は上昇中でほぼ静水面を切る位置にある。このためS L 1 およびS L 2 の場合とも前面と中間スリットではいずれも正の波力分布を示し、前面スリットの波力が卓越している。また後面スリットの波力は小さく、S L 1 では静水面付近の部材で正、水底付近の部材で負のS字の波力分布を、S L 2 では全体的に負の波力分布を示す。したがって、この時の全水平波力の大部分は前面と中間スリットに作用する波力ということになる。またケーソン底版には上向きの揚圧力が作用し、前端部で最大となっている。

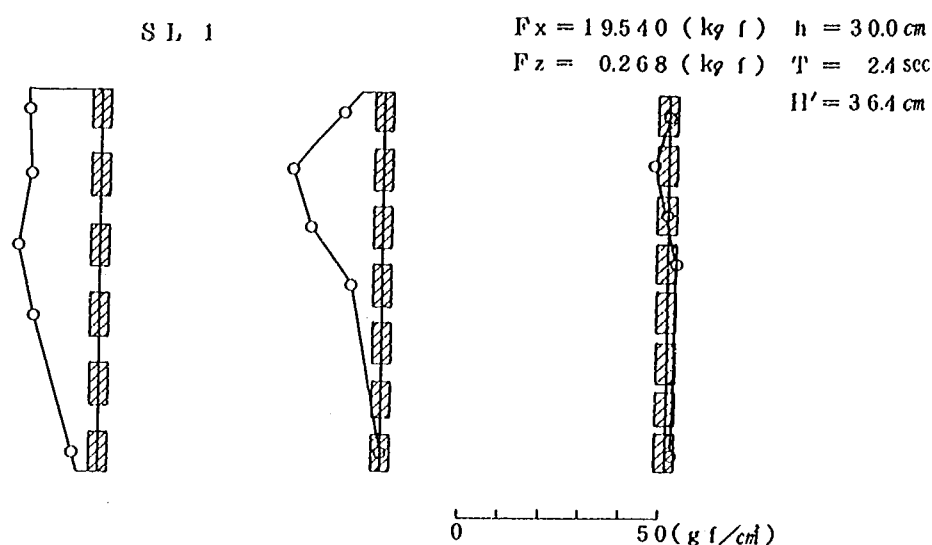


図3.35 全水平波力最大時の波力分布 (S L 1)

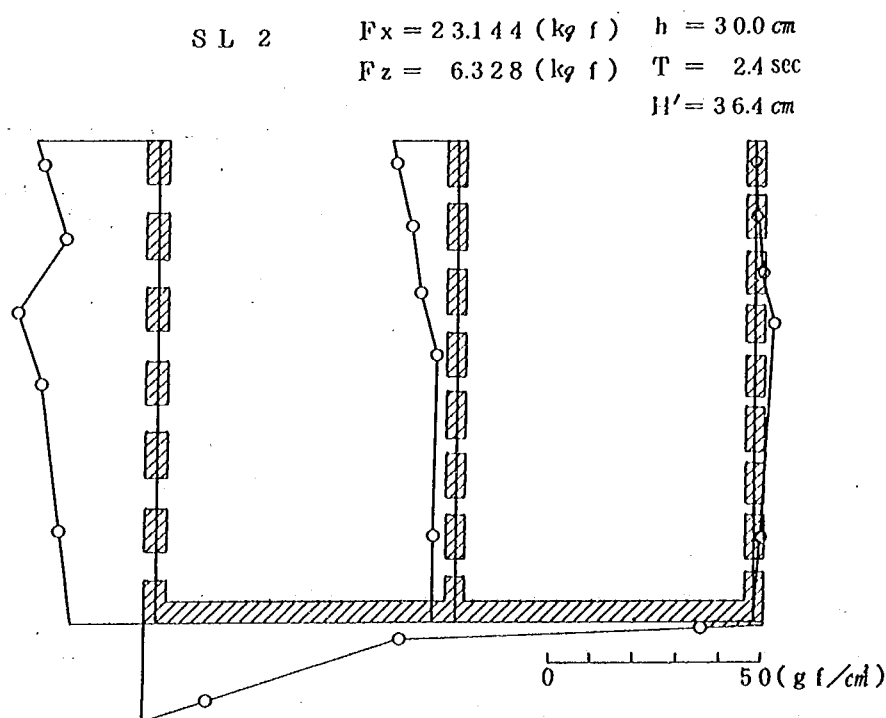


図3.36 全水平波力最大時の波力分布 (S L 2)

次に S L 2 の場合に、全鉛直波力が最大になるタイミングにおける同時波力分布を図3.37に示す。前述したように全鉛直波力は全水平波力とほぼ同時に最大になるため、中間スリット部材 H S 4 が負の値を示している点を除けば全水平波力最大時と類似の分布を示し、絶対値もほぼ同じである。

さらに、S L 1 の前面スリット部材 F S 2、中間スリット部材 H S 2 および後面スリット部材 B S 2 の正の波力がそれぞれ最大になる時刻での同時波力分布を図3.38～3.40に示す。図より明らかなように、F S 2 に正の最大波力が作用する時刻には中間、後面スリットには大きな波力は作用しておらず、中間、後面スリットとも静水面付近を境として静水面上の部材で正、水底付近の部材には負の力が働く分布となっている。次に、H S 2 に正の最大波力が作用する時刻では、前面スリットには中間スリットと同程度かそれ以上の波力が働いている。しかし後面スリットの波力は、この場合も小さく、しかも F S 2 の波力が最大になったときと同じ波力分布を示している。一方、B S 2 に正の最大波力が作用する時刻では、前面、中間スリットにはまだ相当大きな正の波力が作用していることが認められる。また、この時後面スリットの水底付近の部材には負の力が作用しているが、これはカーテンウォール下端にできる渦の影響によるものと推測される。

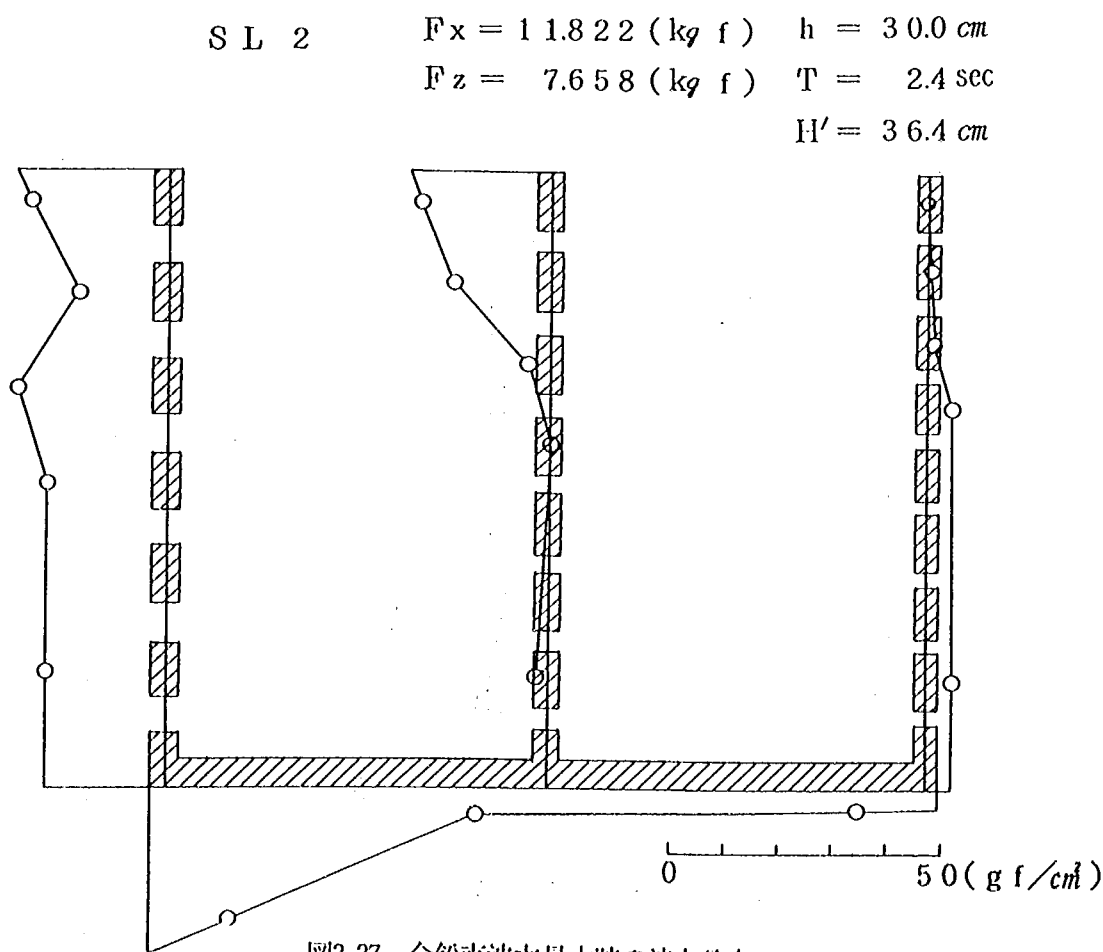


図3.37 全鉛直波力最大時の波力分布

FS 2 最大時

$h = 30.0 \text{ cm}$

$T = 2.4 \text{ sec}$

$H' = 36.4 \text{ cm}$

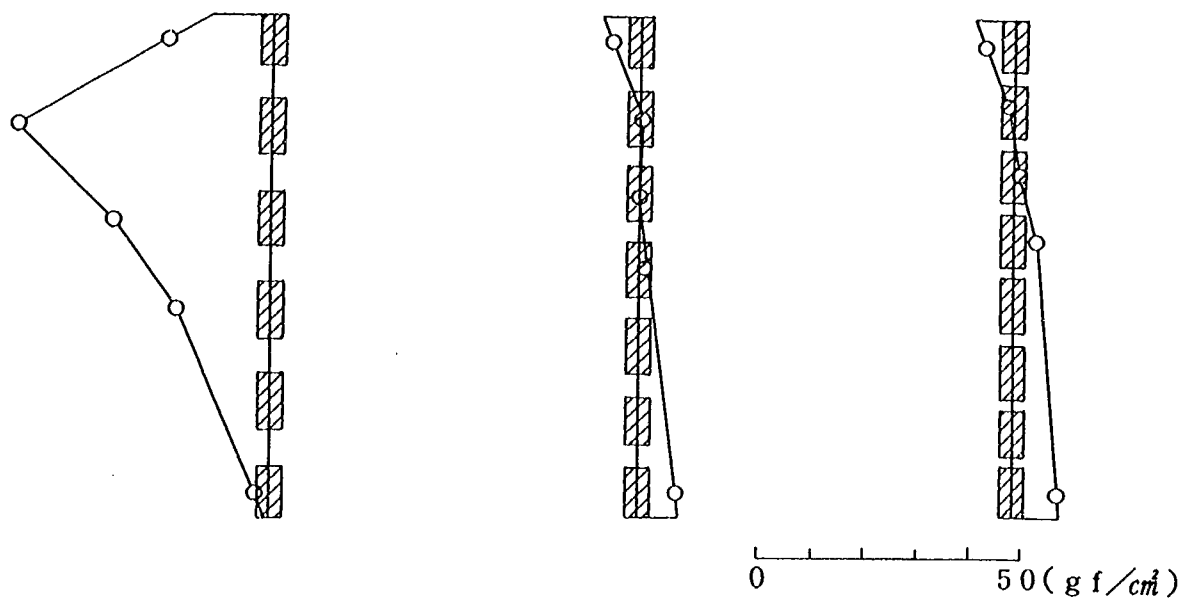


図3.38 FS 2 最大時の波力分布 (SL 1)

HS 2 最大時

$h = 30.0 \text{ cm}$

$T = 2.4 \text{ sec}$

$H' = 36.4 \text{ cm}$

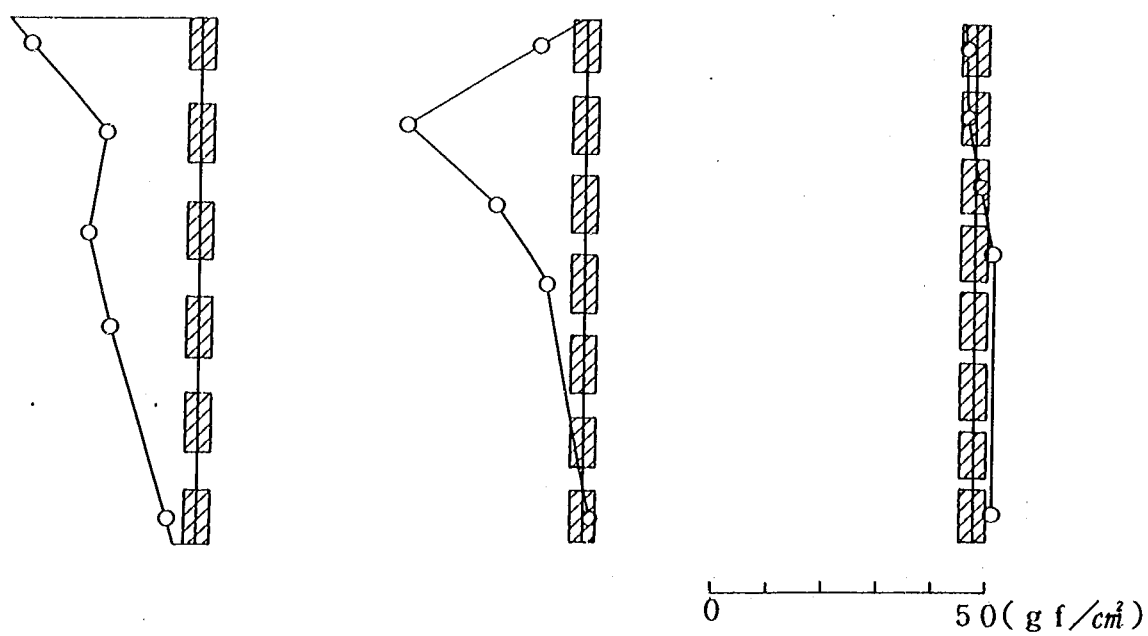


図3.39 HS 2 最大時の波力分布 (SL 1)

BS 2 最大時

$$h = 30.0 \text{ cm}$$

$$T = 2.4 \text{ sec}$$

$$H' = 36.4 \text{ cm}$$

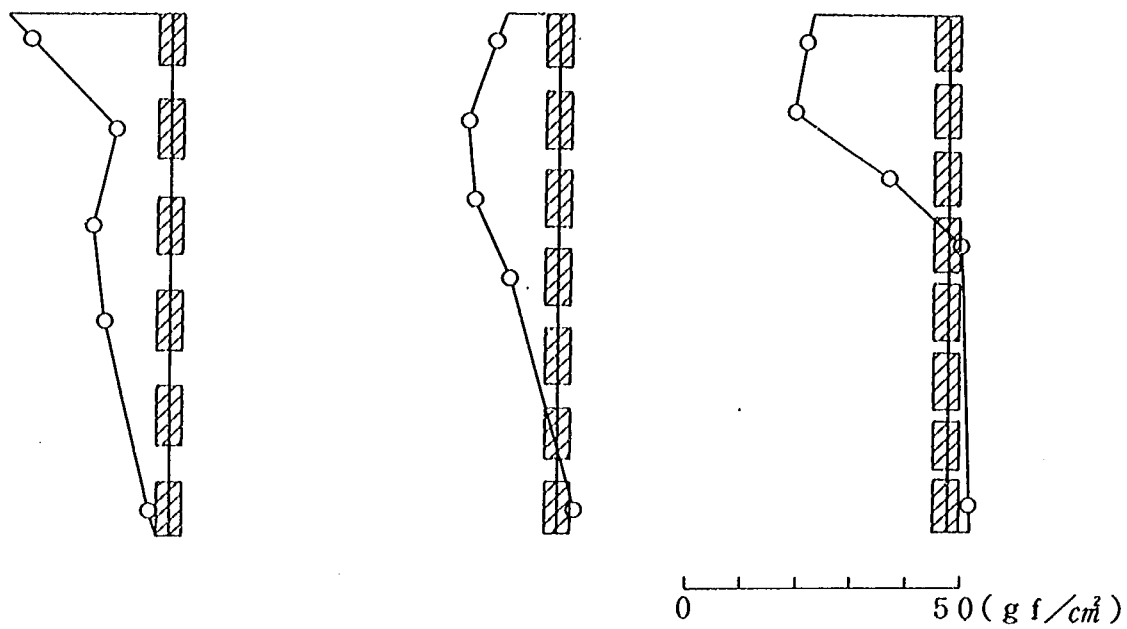
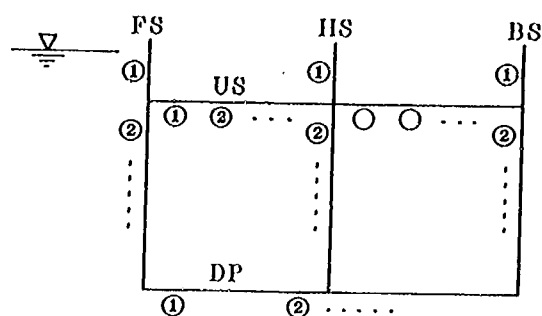


図3.40 BS 2 最大時の波力分布 (SL 1)

(4) 部材の設計に用いる波力

部材に作用する波力は、波浪条件や潮位の変化によって複雑に変化する。したがって、設計部材波力として一般的に定めることはきわめて困難である。ここでは、部材設計の安全性も考慮し、各部材の最大波力の包絡線の平均的な傾向を表すと考えられる最大無次元波力をまとめて表3.8に示す。

表3.8 無次元波力の一覧表 (スリット型)



		無次元波力: $p/w \cdot H'$			
		FS	HS	BS	DP
模型名 ($h=30\text{cm}$) S L 1	①	0.45	0.25	0.58	
	②	1.30	1.02	0.63	
	③	0.95	0.79	0.51	
	④	0.60	0.44	0.40	
	⑤	0.24	0.20	0.25	
	MAX	1.30	1.02	0.63	
模型名 ($h=30\text{cm}$) S L 2	①	2.71	1.23	0.95	0.78
	②	2.17	0.72	0.76	0.50
	③	1.93	0.54	0.52	0.44
	④	0.95	0.33	0.43	
	⑤	0.71	0.29	0.39	
	MAX	2.71	1.23	0.95	0.78
模型名 ($h=27\text{cm}$) S L 2	①	2.90	0.92	0.68	0.72
	②	1.30	0.80	0.63	0.50
	③	1.35	0.50	0.55	0.35
	④	1.64	0.36	0.42	
	⑤	0.70	0.29	0.33	
	MAX	2.90	0.92	0.68	0.72

(5) まとめ

- ① 全水平波力 F_x は、S L 1 および S L 2 の場合とも構造物前面水位 η_1 とほぼ同位相で変動し、 η_1 が最高水位になった瞬間に正のピーク値を示す。また、その時刻での構造物後面の水位 η_1 は上昇中で、ちょうど静水面を切る位置にある。一方、全鉛直波力 F_z の波力波形は S L 1 と S L 2 では異なっている。すなわち、S L 2 では構造物前面水位 η_1 が最高になった瞬間に全水平波力 F_z と同時に上向きの最大値を示すが、S L 1 では双峰型の波力波形になっており、最初の鋭いピークは構造物前面の水位上昇に、また第二のピークは構造物後面の水位上昇に対応している。
- ② 平均水平波力強度 f_x は、S L 1 および S L 2 の場合とも正の値が卓越し、仮想通過波高 H' に比例して増大する。また正の f_z 値は、周期が長くなると若干大きくなる。一方、平均鉛直波力強度 f_z は、S L 1 では負の値が、また S L 2 では正の値が卓越し、S L 1 の正の値を除いて波高に比例して増大する。また、周期に対しては明確な差異は認められないが、S L 2 に碎波が作用する条件では周期に比例して f_z の値は大きくなる。さらに S L 2 において潮位が変化した場合には、潮位の低い方が、正の f_x および f_z 値は若干大きくなる傾向を示す。しかし、いずれにしろ f_z の値は f_x に比べて非常に小さく、S L 2 の場合ではほぼ $1/3$ 程度、また S L 1 では $1/10 \sim 1/20$ 程度の大きさしか示さない。
- ③ S L 1 および S L 2 の無次元平均水平波力強度 f_x/w_0H' および S L 2 の無次元平均鉛直波力強度 f_z/w_0H' は、ともに B/L が小さいほど大きな値を示す。また、全鉛直波力最大時の平均水平波力強度と最大全水平波力の平均波力強度との比 f_x'/f_x は、S L 1 で $0.1 \sim 0.95$ の範囲に、S L 2 では $0.6 \sim 1.0$ の範囲にある。一方、S L 2 の全水平波力最大時の平均鉛直波力強度と最大全鉛直波力の平均波力強度との比 f_z'/f_z は、ほぼ $0.4 \sim 0.95$ の範囲にある。
- ④ S L 1 および S L 2 の場合とも、前面スリット部材 F S 2、中間スリット部材 H S 2、後面スリット部材 B S 2 には衝撃的な岸向き波力が働き、冲向き波力はほとんど働かない。これらのうち海側にある部材ほど作用する波力は大きく、波力の作用しはじめる時刻も早い。かつ波力の作用時間も短い。特に、B S 2 にはピークに続いて明確な腰掛け部をもつ波力波形が現れ、波力の作用時間も F S 2 や H S 2 に比べて長い。一方、S L 2 の底版前端部 D P 2 には、構造物前面水位 η_1 が最高水位になった時、上向きの正の最大波圧が作用する。
- ⑤ F S 2 の波力強度 P は S L 1 および S L 2 の場合とも非碎波領域では波高 H' に比例して増大するが、碎波が作用する時には著しく大きくなる場合があり、 P の最大値は S L 1 で $1.3w_0H'$ 程度、S L 2 では $2.2w_0H'$ 程度になる。また H S 2 では、S L 1 および S L 2 の場合とも非碎波領域から碎波領域に至るまで P の値は H' にほぼ比例して増大し、S L 1 で $1.0w_0H'$ 以下、S L 2 ではほぼ $0.75w_0H'$ 以下である。一方、B S 2 の P の値は S L 1、S

L 2 の場合とも非砕波領域では H' に比例して増大するものの、砕波が作用する場合には一定か、逆に減少する傾向を示す。そのため P の最大値は非砕波領域で生じ、S L 1 で $0.65 w_0 H'$ 程度、S L 2 では $0.8 w_0 H'$ 程度となる。また、周期の長い方がやや大きい傾向が認められる。一方、S L 2 の底版前端部 D P 2 - D P 1 では上向きの力が卓越しており、 P は $0.8 w_0 H'$ 以下の範囲である。さらに潮位の変化については明確な差異は認められないが、砕波が作用する場合の F S 2 において、高潮位時よりも低潮位時に P の値が大きくなっている。

- ⑥ 実験値から求めた平均水平波力強度と合田式から計算した平均水平波力強度との比 f_x / f_{GX} は、S L 1 ではほぼ $0.5 \sim 0.75$ 、S L 2 ではほぼ $0.42 \sim 0.76$ の範囲にある。周期が長くなったり、潮位が低くなると f_x / f_{GX} の値は若干大きくなるようである。この f_x / f_{GX} の値は波力の低減率 λ と考えてよく、S L 1 および S L 2 の場合とも、上限に近い値と考えれば $\lambda \approx 0.7$ 程度を、また平均値として考えれば $\lambda \approx 0.63$ 程度を与えればよい。
- ⑦ 全水平波力あるいは全鉛直波力が最大になる時刻では S L 1、S L 2 とも、前面および中間スリットで正の波力分布を、また後面スリットでは部材によって正負の波力が現れる複雑な分布となる。

3.4.2 水平板付スリット型(1)

この模型は、1枚の水平板と2枚あるいは3枚の鉛直スリット壁より構成される。3枚スリットの P L S 1 タイプについては、高潮位 ($h = 30.0\text{cm}$) で 21 波浪、低潮位 ($h = 28.5\text{cm}$) で 10 波浪条件を設定した。また、2枚スリットの P L S 2 タイプについては、高潮位 ($h = 30.0\text{cm}$) で 21 波浪の実験を行った。この結果より、潮位変化に対する特性、および鉛直スリット壁枚数を変化させた時の各壁への水平力の配分等について検討した。P L S 1 と 2 を比較したとき、全水平力に関し P L S 2 のほうが若干小さいが、仮想通過波高や周期の増減に対する全波力および部材波力の変化の傾向は同様であった。このため全波力と部材波力の検討は、主に P L S 1 に関して行い、P L S 2 については、設計に用いる波力の項で述べる。

(1) 全波力測定結果

水平板付スリット模型 P L S 1 の高潮位 $h = 30.0\text{cm}$ 、波高 $H' = 36.4\text{cm}$ 、周期 $T = 2.4\text{s}$ の波浪条件における模型前面

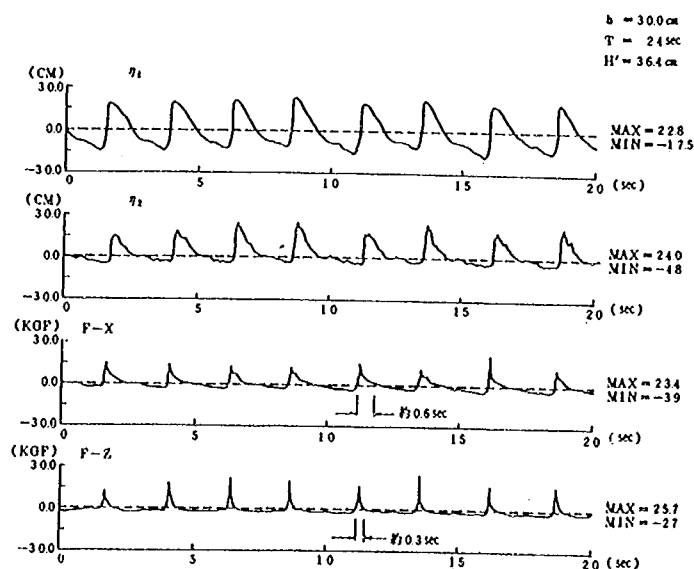


図3.41 全波力および水位の時刻歴図
(P L S 1)

および後面の水位変動 η_1 , η_2 , 模型に作用する全水平波力 F_x , および全鉛直波力 F_z の時刻歴を図3.41に示す。 F_x は岸向きが, F_z は上向きが卓越している。岸向き全水平波力の時刻歴波形は, 急激に立ち上がり, 正の最大値に達し, そこから時間の経過とともに緩やかに減少する前傾三角形の形状をしている。この波形は, 模型沖側の水位 η_1 の時刻歴図と同様の形である。またこの波形は, 波圧測定で碎波の前面と壁面の間への空気の封じ込めが不十分な場合に発生すると言われている単発型⁸⁾の波圧波形と似た形状である。波形に高周波の振動がみられるが, これは測定系の固有振動によるものと考えられる。一方, 上向き鉛直力は, 鋭く立ち上がって正の最大値となり, その後急激に減少する。また, 岸向き水平力および上向き鉛直力の作用時間は, この波浪条件では図中に示すように約0.6 s と約0.3 s で, これは周期の1/4および1/8程度である。

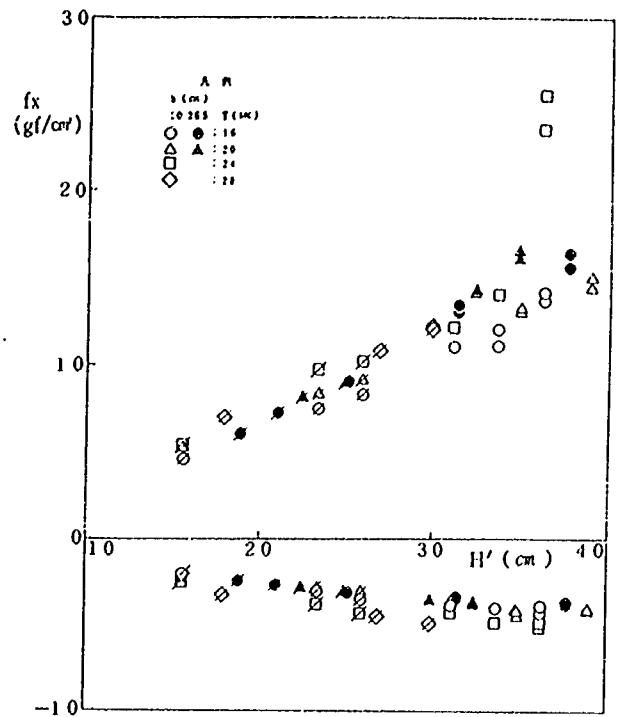


図3.42 f_x と H' の関係 (PLS1)

PLS1の平均水平波力強度 f_x と波高 H' の関係を図3.42に示す。ただし, 図中, 斜線の付いた記号は, 非碎波領域でのデータである。冲向き f_x は, H' の変化にあまり依存せず, その値も岸向き f_x の30%程度であるため, 以下岸向きの f_x について検討する。岸向き f_x は H' が大きくなるにつれて, ほぼ線形的に増加する。また周期 T の影響を調べると, 周期の長いほうが若干 f_x は大きい。次に, 同一周期における低潮位と高潮位で比較すると, 非碎波領域ではほとんど差はないが, 碎波領域では高潮位より低潮位の条件のほうが大きな f_x の値を示している。これは, 低潮位のほうが水深が浅く, 碎波が促進されることと, 低潮位になると水面上に出た部分が多くなるためと思われる。また, 図中, 水深 $h = 30.0\text{cm}$, 波高 $H' = 36.4\text{cm}$, 周期 $T = 2.4\text{s}$ の条件で測定された2ケースが特に大きな値となっているが, これは実験データの一次処理プログラムの特性上生じたものと考えられる。図3.41にこの2ケースのうち一方の波力の時刻歴が示されているが, 全体で8波測定されたうち, 7番目の波が他に比べ大きく記録されている。そのため残りの7波中で最大波力の50%に達しなかった4波が記録されず, 結果として比較的大きな波力だけの平均となり突出した値となったものと思われる。

PLS1の平均鉛直波力強度 f_z と波高 H' の関係を図3.43に示す。ただし, 図中, 斜線の付いた記号は, 非碎波領域でのデータである。下向きの f_z は H' による変化が少なく, その値も上向きの25%程度と小さいため, 以下では上向きの f_z について検討する。上向きの f_z は $H' \leq 26.0\text{cm}$ 程度ま

ではどのケースも、 H' が大きくなるにつれ直線的に増加している。しかし、 H' がさらに大きくなると周期によって、減少するもの、あまり変化しないもの、増加するものとに分かれる。そこで、各周期で f_z が最大となる時の H' を調べると、通過波高検定時に測定された模型設置点での通過波高が最大となる時の H' にほぼ合致していることが分かった。つまり各周期での f_z の最大値は、模型設置位置での実際の波高が最大となった時に発生するものと考えられる。

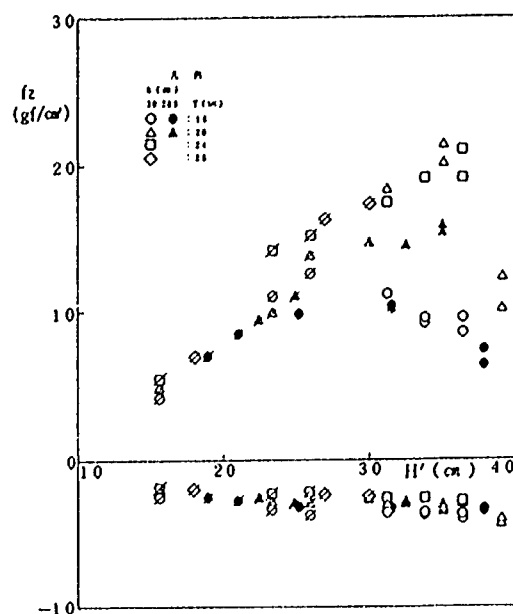


図3.43 f_z と H' の関係 (PLS 1)

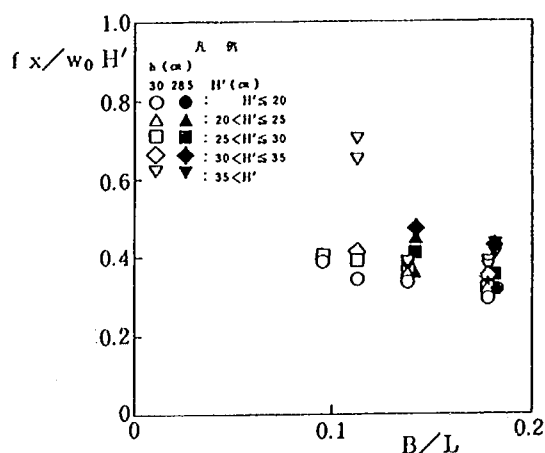


図3.44 $f_x / w_0 H'$ と B / L の関係 (PLS 1)

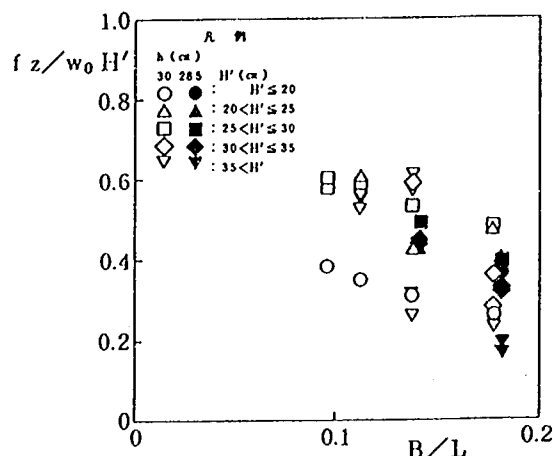


図3.45 $f_z / w_0 H'$ と B / L の関係 (PLS 1)

全鉛直波力最大時の平均水平波力強度 f_x' と最大全水平波力の平均波力強度 f_x の比 f_x' / f_x と B / L の関係を図3.46に示す。 f_x' / f_x の値は高潮位の場合約0.1から約0.9の範囲で分布しており、 B / L の変化には依存せず、 H' の値によって大きく変動している。 H' が大きくなると f_x' / f_x も大きくなる傾向がある。これは以下の理由によると思われる (図3.47参照)。鉛直波力の最大値は水平波力の最大値に先行して現れる。 H' が小さい時の f_x の波形は対称三角形であるため、

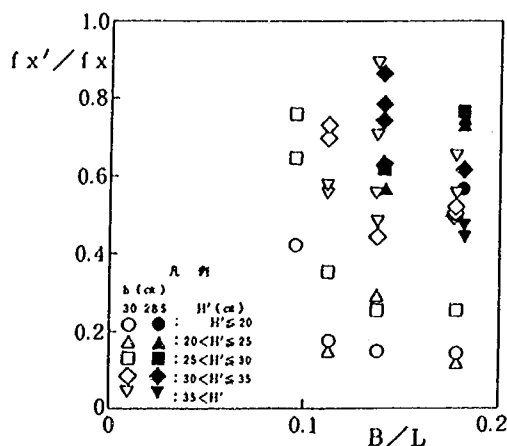


図3.46 f_x' / f_x と B / L の関係 (PLS1)

f_z が最大値の時点の f_x はまだ増加途中で最大値に至っていない。一方、 H' が大きくなると f_x 波形は前傾三角形となり、 f_x の最大値の位置は前の方へ移動し、先行している f_z の最大値の位置に近づくため、 f_z 最大時の f_x の値は、 f_z の最大値に近くなる。

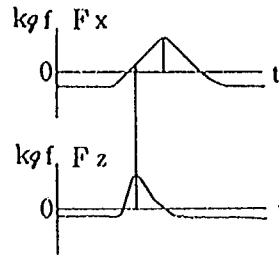
同様に低潮位の場合（図3.46参照）も B/L の変化には依存せず、 H' により約 $0.4 < f_{x'}/f_x < 0.9$ の範囲で分布している。

次に、全水平波力最大時の平均鉛直波力強 f_z' と最大全鉛直波力の平均波力強度 f_z の比 f_z'/f_z と B/L の関係を図3.48に示す。 f_z'/f_z の値も $f_{x'}/f_x$ の値と同様に B/L の変化にはよらず、0から約0.9まで大きく変動している。しかし、 $f_{x'}/f_x$ の値のように、 H' が大きくなると増加する傾向はなく、 H' の変化との関連性は見られない。そして、碎波・非碎波の条件によって2グループに分かれる。非碎波領域では0.0～0.2あるいはマイナスに分布し、碎波領域では0.3～0.7付近に分布する。これは、 F_z の正方向の作用時間が、 F_x のそれに比べ約半分と短いために、非碎波領域では、 F_x がピークの時、 F_z はまだゼロ近くにあり、その結果 f_z'/f_z の値がゼロ付近に分布し、一方、碎波領域では、 F_x および F_z のピークの時期が近づくので、 f_z'/f_z の値が比較的1に近い方に分布したと考えられる。

(2) 部材波力測定結果

水平板スリット模型 P L S 1 の高潮位 $h = 30.0\text{cm}$ 、波高 $H' = 36.4\text{cm}$ 、周期 $T = 2.4\text{s}$ の波浪条件における模型前面および後面の水位変動 η_1 、 η_2 と沖側、中央、岸側の各鉛直スリット壁最上段の部材の側点 F S 1、H S 1、B S 1における波力、張り出し部および中間部の水平板部材の側点 U S 1、U S 5における波力の時刻歴を図3.49に示す。ここで部材波力強度 P は、鉛直スリット壁部材においては岸向き方向を正、水平板部材については鉛直上向きを正としている。ただし、測点 H S 1 の部材波力の値は、実験時にゼロ点の移動が生じたため、実際より約 1.0gf/cm^2 大きな値を示している。水平方向波力（F S 1、H S 1、B S 1）は岸向きが、鉛直方向波力（U S 1、U S 5）は上向きが卓越している。ただし、図示した例ではみられない

H' が小さい時の $f_{x'}/f_x$



H' が大きい時の $f_{x'}/f_x$

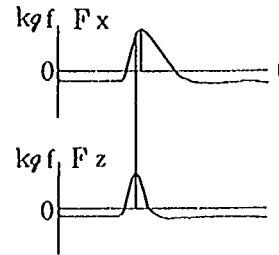


図3.47 $f_{x'}/f_x$ と H' の関係

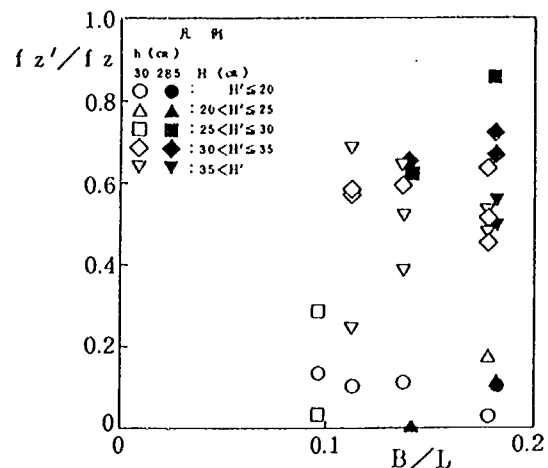


図3.48 f_z'/f_z と B/L の関係 (PLS1)

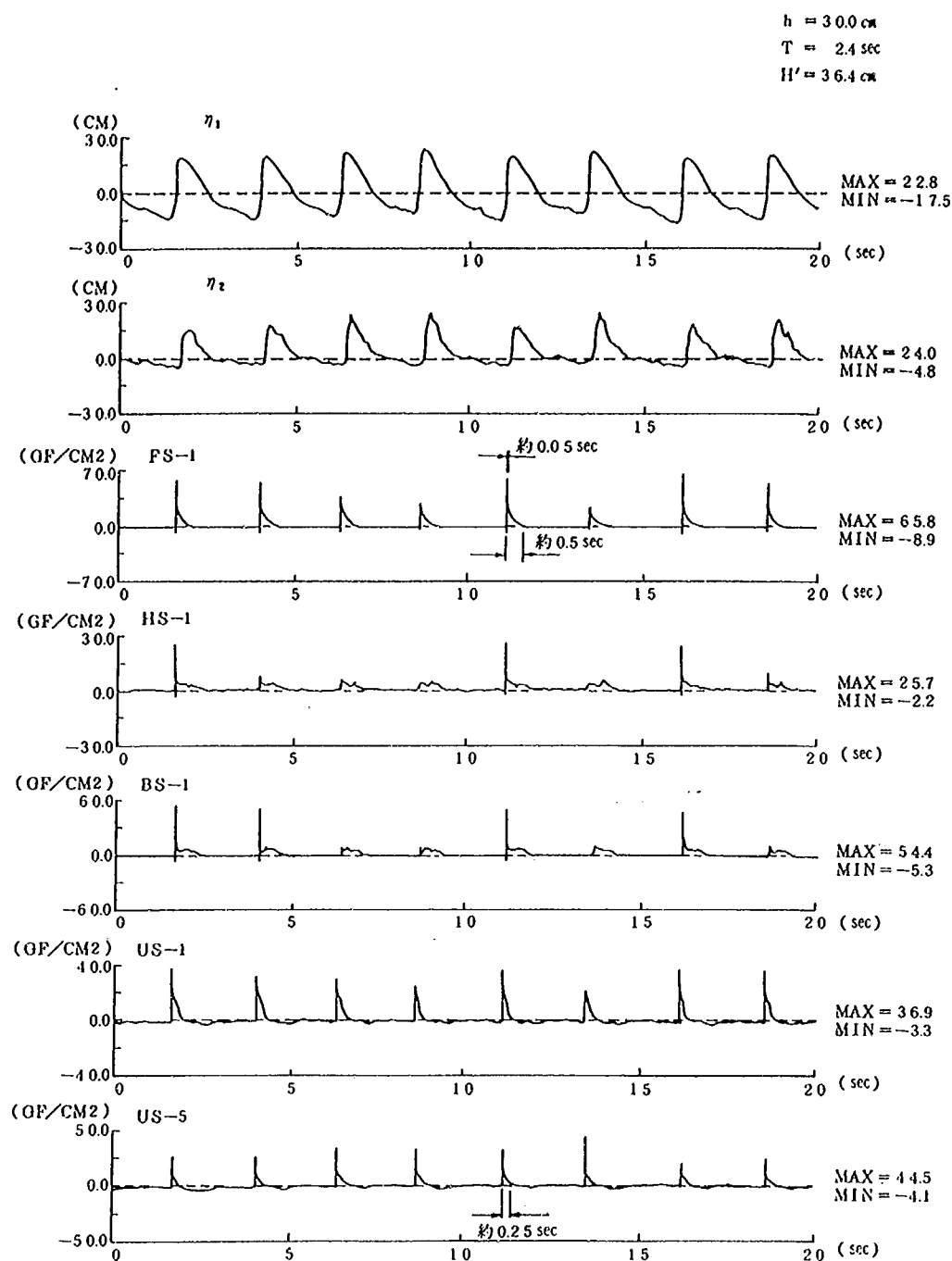


図3.49 部材波力および水位の時刻歴波形 (P L S 1)

が、模型沖側へ張り出している水平板部材US 1だけは波の作用状態によっては、鉛直下向きにかなりの波力を受けることがある。鉛直スリット壁上段の部材 (FS 1, HS 1, BS 1) に作用する波力強度の波形をみると、波の谷が通過している間は部材は空中に出ているため、波力強度 p はゼロであり、波の前面が部材に衝突すると同時に急激に立ち上がり最大値を示し、水塊が部材を通過する間、時間の経過とともに p は減少し、また部材が空中に出ると波力強度

はゼロになる。FS1の部材に関して、波力の作用時間を衝撃的と考えられる鋭く立ち上がった部分と、減衰部とに分けたとき、立ち上がり部は約0.05 sで減衰部は約0.50 sとなる。同様に水平板部材も、波の谷が通過する際、空中に出ており、続いて水位の上昇とともに波が水平板を下からたたきように衝撃的に作用し、波形はかなり鋭い立ち上がりを示す。そしてその後、波力は鉛直スリット部材に比べて短時間に減少する。US5の部材に関して鉛直上向きの波力の作用時間は0.25 s程度である。

FS1, US5の波力強度と p と仮想通過波高 H' の関係を図3.50(a)(b)に示す。ここでFS1は鉛直スリット壁部材で最大の波力強度が得られた測点、US5は水平板部材で最大の波力強度が得られた測点である。図中の実線は、波力強度と仮想通過波高の関係を分かりやすくするために、各部材について傾きが最大と最小のデータと原点を結び直線的関係で示したものである。なお、斜線の付いた記号は、非碎波領域でのデータである。鉛直スリット壁部材のFS1の場合、 p の値は $1.5 w_0 H'$ と $0.30 w_0 H'$ の範囲でほぼ分布している。この上限値 $p=1.5 w_0 H'$ の直線は、既往の直立堤に作用する衝撃波力の研究⁹⁾で報告されている波高の3～5倍と比較すると小さい。本構造は透過性であるため高波浪条件でも波力が低減されることが分かる。同様に、水平板部材のUS5の場合、 p の値は $0.89 w_0 H'$ と $0.34 w_0 H'$ の範囲でほぼ分布している。

(3) 安定性の検討に用いる波力

透過構造物の波力算定式は、まだ確立されていないので、ここでは不透過壁に対する合田式により計算される波力をどの程度低減できるかについて検討する。PLS1および2の最大全水平波力の実験値と合田式による計算値との比 f_x/f_{GX} と H' の関係を図3.51(a)(b)に示す。ただし、図中、斜線のついた記号は、非碎波領域でのデータである。前述したように一時処理プログラムの特性上、PLS1で $H'=36.4\text{cm}$ の条件の2ケースが飛び抜けて大きな値を示しているが、他の実験ケースは全て H' の変化によらず、ほぼ一定値となる。PLS1タイプについて

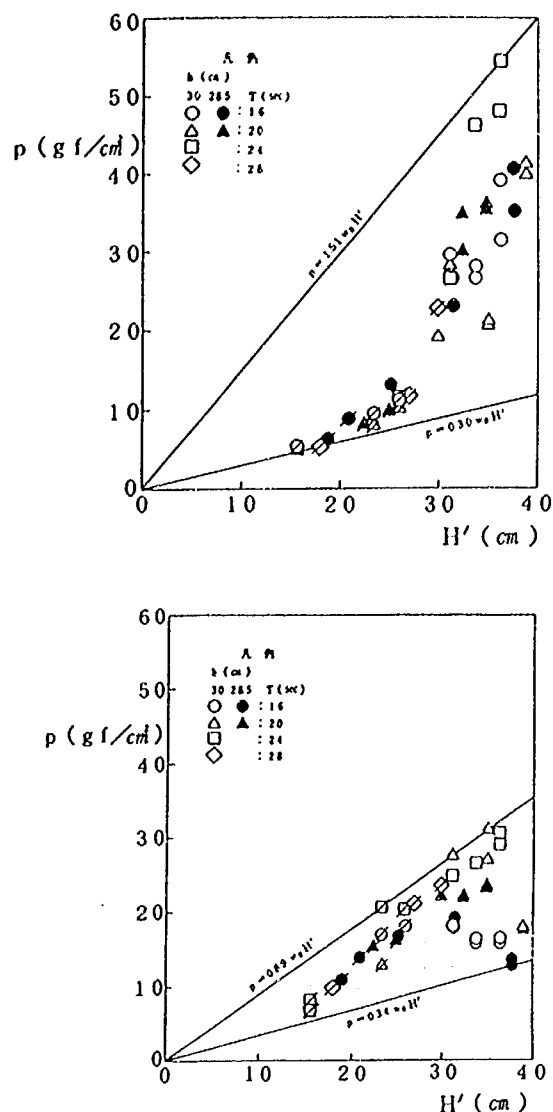


図3.50 p と H' の関係
(PLS1 ; FS1およびUS5)

は、高潮位 $h = 30.0\text{cm}$ と低潮位 $h = 28.5\text{cm}$ で比較する。高潮位の場合、上記の大きな 2 ケースを除いて平均すると f_x / f_{GX} は約 0.41 で、低潮位の場合は平均 0.44 程度と高潮位の場合に比べてわずかに大きい。また、両者の差は主に砕波領域で生じている。高潮位より低潮位の方が f_x / f_{GX} の値が大きくなったのは、砕波による大きな波力を受ける静水面上に出た部分の面積が広がったためと思われる。このことから、構造物の安定性を検討する際には、潮位の変化に注意する必要があると言える。水平板より下の中間鉛直スリット壁のない PLS 2 タイプの f_x / f_{GX} の値は平均で約 0.37 で PLS 1 に比べ若干小さい。 f_{GX} の値は同じであるため PLS 2 は PLS 1 より全波力が小さいことが分かる。水平波力は沖側から岸側のスリット壁に作用する波力の総和であるため、スリット間隔が狭いほど同時に波力を受け易い。中間スリット壁が無くなると、岸側スリット壁に作用する波力は大きくなるが (図 3.52 参照)、スリット壁間隔が広がるため、沖側、岸側それぞれのスリット壁に作用する波力のピークの時期のズレが大きくなり、その結果、全波力が少し小さくなったものと思われる。 f_x / f_{GX} の値を、そのまま合田波力の低減係数と考えれば、PLS 1 タイプは高潮位で平均約 0.41、低潮位で平均約 0.43、PLS 2 タイプは高潮位で平均約 0.37 となる。鉛直合力については、合田式による揚圧力との比較は行わない。つまり、本構造は底版を持たず、水面付近に設置された水平板を有する透過堤であり、底版を有する不透過堤を前提とし、堤体前後の水圧差による揚圧力分布を考える合田式とは異なるからである。水面付近の水平板には、揚圧力として等分布波力が作用するものと考ええる。この等分布な鉛直波力を H' の係数値で表すと、PLS 1 の場合は図 3.45 に示したように、高潮位で平均約 0.45、低潮位で約 0.44 となる。図には示さないが PLS 2 については高潮位の場合のみであるが、平均約 0.44 であった。

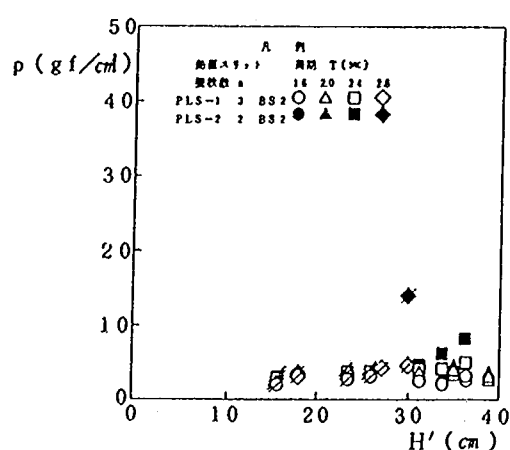
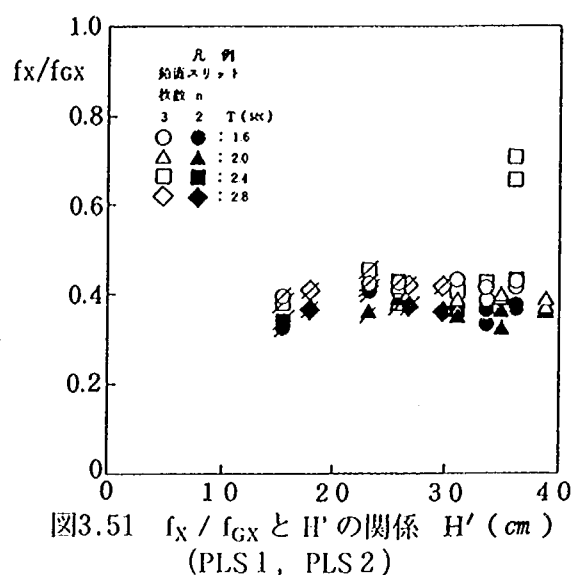
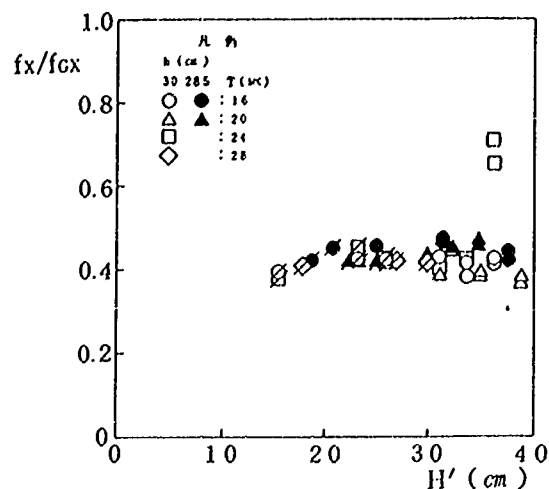
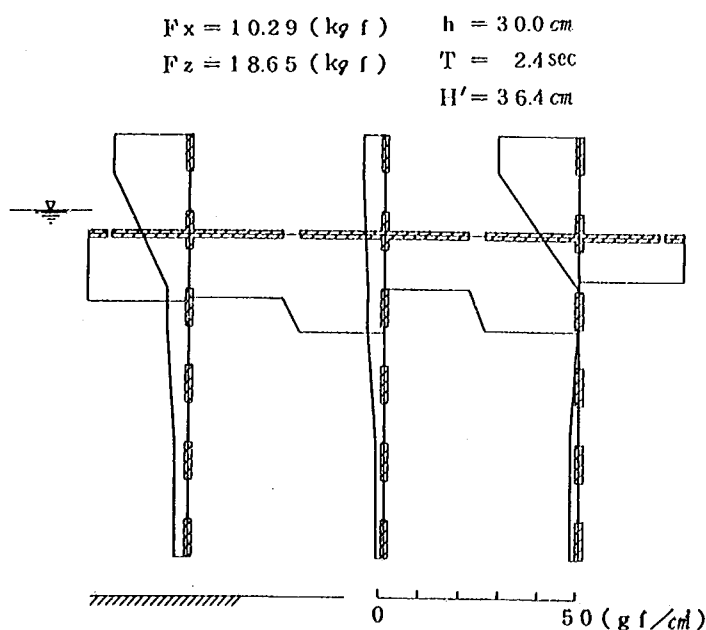
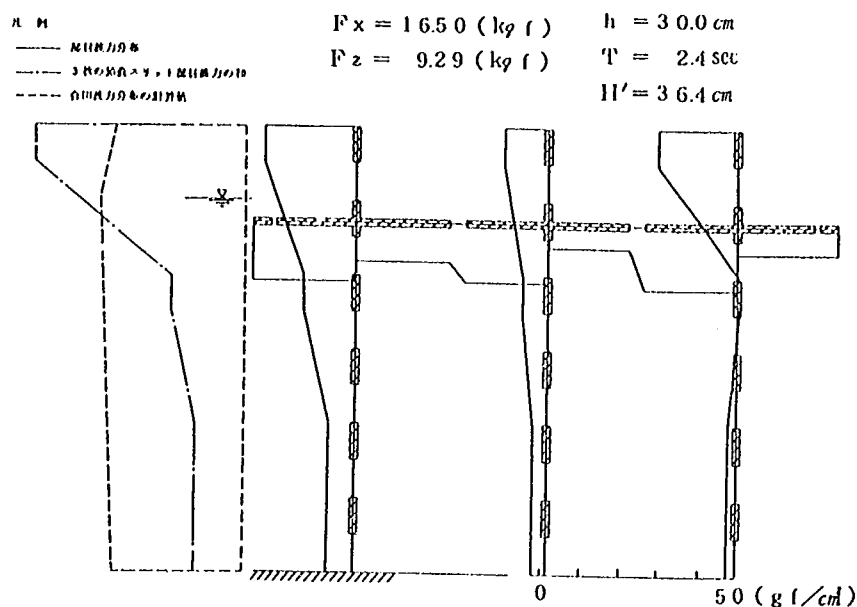


図 3.52 p と H' の関係
(PLS1, PLS2 ; BS2)

P L S 1 の高潮位 $h = 30.0\text{cm}$ 、波高 $H' = 36.4\text{cm}$ 、周期 $T = 2.4\text{s}$ の波浪条件における全水平波力 F_x 最大時および全鉛直波力 F_z 最大時の各測点での波力分布を図3.53、3.54に示す。 F_x 最大時の水平波力分布をみると、各スリット壁の最上段部材に主として作用しており、この時点ではまだ岸側スリット壁の水中部には波力が作用していないことが分かる。また、この時の部材波力を図示した面積より合計すると 9.2kgf となり、三分力計による同時刻の全水平合力 16.5kgf の 56% となる。部材波力が全波力に比べかなり小さく計算されたことの理由としては、以下のことが考えられる。まず、全波力測定系の固有振動の影響があげられる。つまり、全波力測定系の固有振動数は約 20Hz であるが、本実験ではデータ処理に 50Hz のローパスフィルターを使用したため、得られた全体の水平力には模型の固有振動の影響が残っていると考えられる。



ちなみに、模型の固有振動の影響を除くため15Hzのローパスフィルターを使い解析した結果と比較すると、50Hzのローパスフィルターを使用した方が F_x の場合20%程度大きな値が得られている。第2に、波力分布形状の影響が考えられる。つまり図中の各測点間の波力分布は単に測点で得られた値を直線で結んでいるが、水平板付け根の鉛直部材の所では、コーナー部に内側から水塊がぶつかるように作用することから、図の波力分布より大きな力が働いていることが予想される。第3には、水平力を測定していない部材に作用する水平力の影響が考えられる。つまり、水平力を計測している鉛直スリット壁にのみ水平力を分布させて、部材波力の合計を算出したが、水平板を含む岸沖方向の部材にも水平力は作用しているものと考えられる。以上の理由により、部材波力の合計値と全水平力は異なった値を示したものと推測される。次に図中に破線で示した合田波力の分布形状と、実験で得られた各スリットに作用する波力を合計した波力分布を比較する。水平板より下では、構造物が透過性であることによると考えられる波力の低減がみられ、水面付近の部材には水塊の衝突によると思われる波力の集中が起こっており、合田波力の分布形状とは異なった形状となっている。

次に、全鉛直波力最大時の波力分布をみると、一様な等分布ではなく、特に鉛直スリット壁と水平板とのコーナー部では他の部分より大きな波力が作用している。またこの時の図示の面積で部材波力を合計すると14.3kgfとなり、これは三分力計による同時刻の全鉛直合力18.65kgfの77%を占める。部材波力の合計が全体波力より小さくなった理由は、水平力の場合と同様に、全体系の固有振動

表3.9：無次元波力の一覧表（水平板付スリット型(1)）

		無次元波力： $P / w \cdot H'$			
		F S	H S	B S	U S
P L S - 1 (h=30.0cm)	①	1.51	-	1.38	0.82
	②	1.33	0.34	0.18	0.63
	③	0.17	0.19	0.18	0.82
	④				0.70
	⑤				0.89
	⑥				0.61
	M A X	1.51	-	1.38	0.89
P L S - 1 (h=28.5 cm)	①	1.08	-	1.15	0.72
	②	0.72	0.49	0.20	0.50
	③	0.17	0.13	0.12	0.70
	④				0.57
	⑤				0.68
	⑥				0.62
	M A X	1.08	-	1.15	0.72
P L S - 2 (h=30.0 cm)	①	1.13	-	1.18	0.71
	②	0.90		0.48	0.46
	③	0.18		0.22	0.66
	④				0.62
	⑤				0.78
	⑥				0.62
	M A X	1.13	-	1.18	0.78

による影響、および水平板以外の部材に作用する鉛直力の影響が考えられる。

(4) 部材の設計に用いる波力

各部材に対する無次元力の一覧表を、表3.9に示す。中間鉛直スリット壁最上段の測点H S 1は、実験時に歪ゲージのゼロ点に移動が生じ、最大値を数値では求められなかった。しかし、部材波力の時刻歴（図3.49参照）をみると、F S 1、B S 1と同様に大きな波力が作用していることが分かる。その結果、今回の実験での部材波力の最大値は、F S 1、H S 1、B S 1付近、およびF S 2付近の鉛直スリット壁部材については約 $1.5w_0H'$ となる。またそれ以外の鉛直スリット壁部材付近では、水平板より下の中間鉛直スリット壁の有無によりB S 2に作用する波力は変化するが（図3.52参照）約 $0.5w_0H'$ 、また水平板部材では約 $0.9w_0H'$ であった。測点H S 1、B S 1には、測点F S 1と比較して、岸側にあることによる波力の低減は見られない。これは、本構造の天端が低いため、高波高の波が沖側部材を越波して、直接、中間および岸側の最上段部材に沖側部材と同様に作用するからであると思われる。

(5) まとめ

本実験で得られた主要な結果をまとめると次のとおりである。

- ① 水平板付スリット型(1)に作用する岸向き全水平力は、鉛直スリット壁に3枚のP L S 1タイプの場合、合田式的全水平波力に対し高潮位で約0.41である。また、鉛直スリット壁2枚のP L S 2タイプの場合、高潮位で約0.37である。沖向き波力は岸向き波力の約30%である。
- ② 上向き方向全鉛直力は等分布と仮定するとP L S 1タイプの場合、高潮位で約 $0.45w_0H'$ 、低潮位で約 $0.36w_0H'$ 、またP L S 2タイプでは、高潮位で約 $0.44w_0H'$ である。下向き波力は上向き波力の約25%である。
- ③ 鉛直スリット壁部材に作用する部材波力は、等分布と仮定すると、各スリット壁最上段および沖側スリット壁の水深15cm付近までで最大約 $1.5w_0H'$ 、沖側スリットの水深15cm以深と他の鉛直スリット壁の水平板より下の部材では最大約 $0.5w_0H'$ である。
- ④ 水平板部材に作用する部材波力は、最大で約 $0.9w_0H'$ である。
- ⑤ 中間鉛直スリット壁の水平板より下部を取り除くと、全水平力は若干小さくなった。部材波力は、岸側スリット壁の水中部材に作用する波力が大きくなった。

3.4.3 水平板付スリット型(2)*

(1) 全波力測定結果

巻波砕波作用時の3分力計による全波力測定結果の一例として、水深 $h=36.4\text{cm}$ の場合の堤体沖側および岸側の水位 η_1 、 η_2 、堤体に作用する全水平波力 F_x 、全鉛直波力 F_z の時刻歴を図3.55に示す。これより次のことが分かる。

*執筆:松尾和男（飛鳥建設株式会社 総合企画本部 技術開発部）

$h = 30.0 \text{ cm}$
 $T = 2.4 \text{ sec}$
 $H' = 36.4 \text{ cm}$

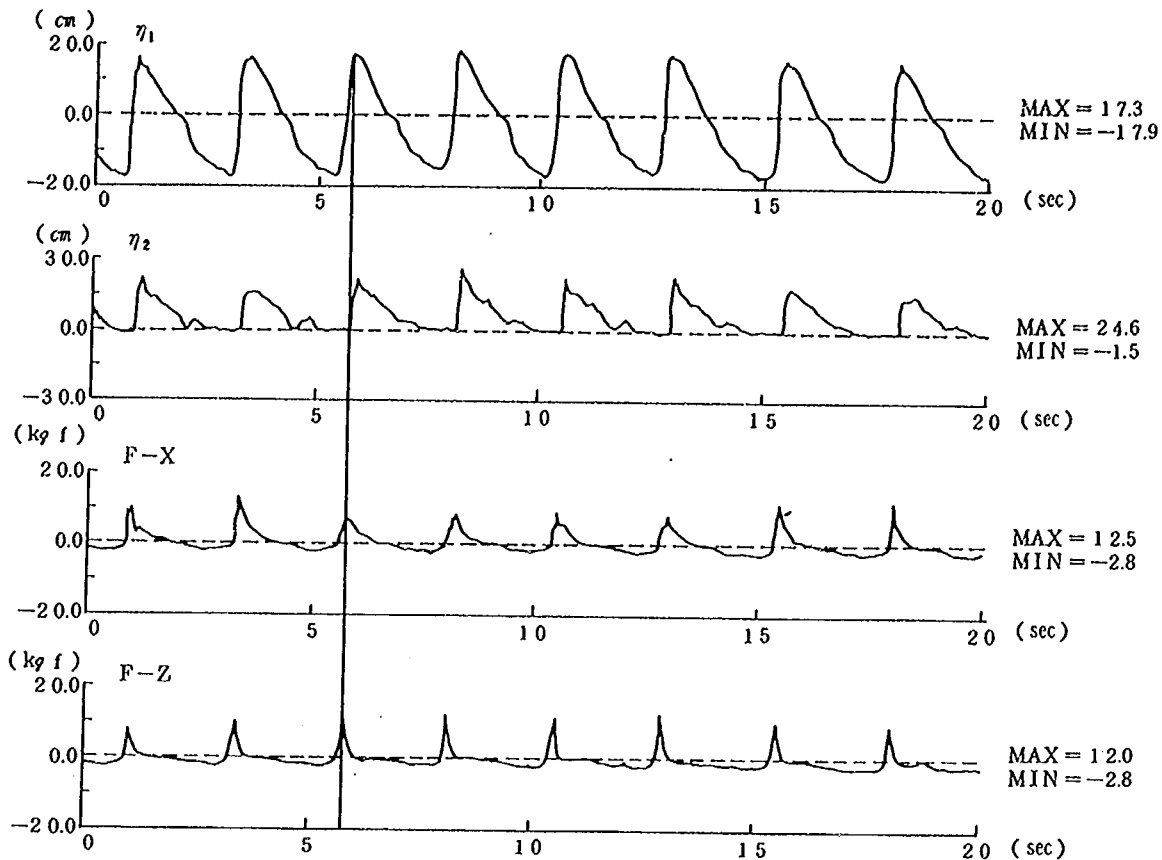


図3.55 全波力および水位の時刻歴図 (P L S 3)

- ① 堤体沖側の水位が η_1 が極大となる時刻で全波力 F_x が極大となる。このとき堤体岸側の水位はほぼ極小である。
- ② 全波力 F_x , F_z の波形は、正の側は鋭く尖った三角形となっており、波力の立ち上がり部分の作用時間は波の周期に比べてかなり短い。
- ③ 水平方向は岸向き、鉛直方向は上向きの波力が卓越する。

①は、堤体沖側と岸側の水位差が最大するとき、すなわち堤体前面の水位が最大するとき、全水平波力が最大となることを示す。②は、巻波砕波が堤体に衝突する際に衝撃的な波力が作用するため、全波力は鋭く尖った波形を示すことを表す。

平均水平波力強度 f_x と仮想通過波高 H' の関係は図3.56に示すとおり（図中斜線付の記号は、非砕波領域のデータを表す。）であり、次のような傾向がある。

- ① 仮想通過波高 H' が大きくなると平均水平波力強度 f_x の絶対値は岸向き、沖向きのいずれに対しても増加する。
- ② 仮想通過波高 H' に対する f_x の絶対値の増加の割合は、岸向き（ f_x が正）の方が沖向き（ f_x が負）よりも大きい。

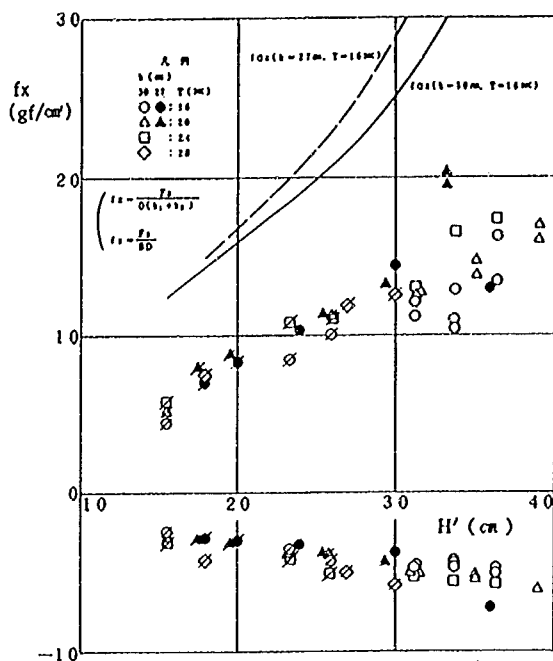


図3.56 f_x と H' の関係 (PLS 3)

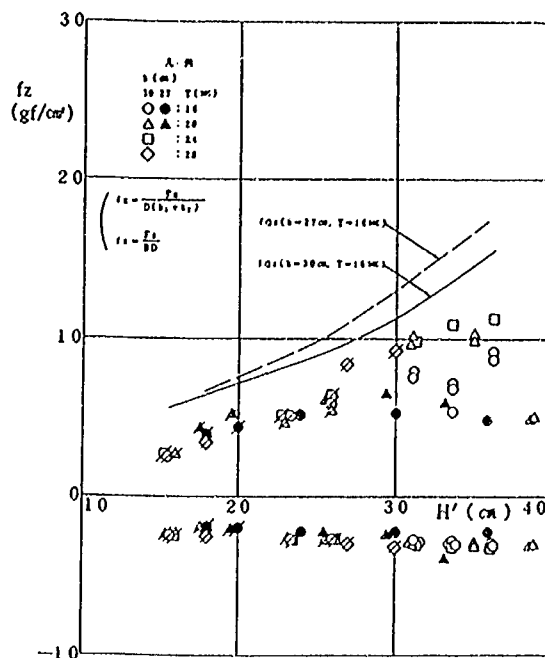


図3.57 f_z と H' の関係 (PLS 3)

③ 低潮位 ($h=27\text{cm}$) では, 高潮位 ($h=30\text{cm}$) の場合に比べて碎波条件で f_x の値がわずかに大きくなる傾向がある。

③は, 低潮位条件で, 静水面上に出た部分に碎波による局所的に大きな波力が作用したことを表す。

次に平均鉛直波力強度 f_x と仮想通過波高 H' との関係を図3.57に示す。平均鉛直波力強度 f_z の絶対値は, 平均水平波力強度 f_x と同様に仮想通過波高 H' が大きくなるに従い増加する。また, f_z の H' に対する増加の割合は, 上向き (f_z が正) の方が下向き (f_z が負) よりも大きい。

無次元水平平均波力強度 $f_x/w_0 H'$ と相対幅 B/L の関係を図3.58に示す。これにより次のことが分かる。

- ① $f_x/w_0 H'$ の値は波高, 周期により若干の変動があるものの, ほぼ一定値と見なすことができる。
- ② B/L が同じ条件では H' が大きいほど $f_x/w_0 H'$ の値がやや大きくなっているようであるが, その変動幅は小さい。
- ③ H' が同じ条件では, B/L の増加すなわち

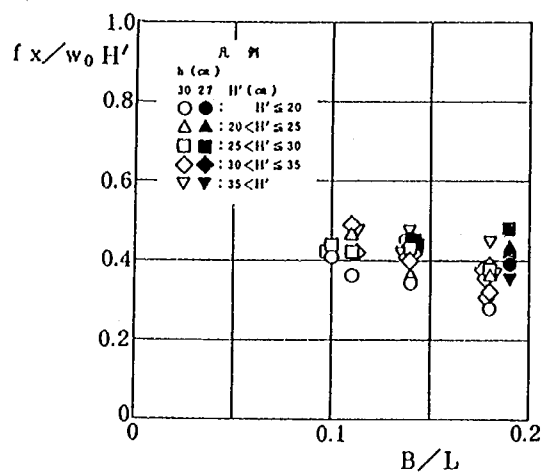


図3.58 $f_x/w_0 H'$ と B/L の関係 (PLS 3)

周期 T の減少にともない f_x/w_0H' が緩やかに減少する傾向がある。

②の H' に対する f_x/w_0H' の増加は、言い換えれば仮想通過波高 H' に対する水平波力の非線形性を示すものである。③の波力と周期の関係については、 H' が同じならば周期 T が長いほど構造物に作用する波力が大きくなることを表している。 f_x/w_0H' の平均値を求めると、約0.41となり、最大値は0.49であった。

上述の傾向は無次元鉛直波力強度 f_z/w_0H' と相対幅 B/L の関係においても同様に現れる(図3.59)。なお、無次元鉛直波力強度 f_z/w_0H' の平均値は約0.23であり、最大値は0.32である。

以上では、水平波力と鉛直波力を個別に検討したが、構造物の安定性を検討する上では、これらの波力の組み合わせを考える必要がある。波力の組み合わせを考えなければならないのは、全鉛直波力

が最大となる時の全水平波力との組み合わせと、全水平波力が最大となる時の全鉛直波力との組み合わせの2ケースである。全鉛直波力最大時の全水平波力 $f_{x'}$ と全水平波力の最大値 f_x との比 $f_{x'}/f_x$ と B/L の関係を図3.60に、また全水平波力最大時の全鉛直波力 $f_{z'}$ と全鉛直波力の最大値 f_z との比 $f_{z'}/f_z$ と B/L の関係を図3.61に示す。 $f_{x'}/f_x$ および $f_{z'}/f_z$ の値にはばらつきがみられるが、それぞれの平均値を求めると $f_{x'}/f_x \approx 0.62$ 、 $f_{z'}/f_z \approx 0.38$ となる。

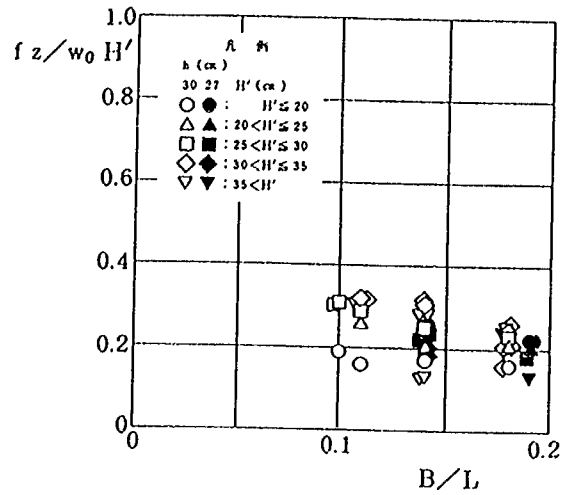


図3.59 f_z/w_0H' と B/L の関係 (PLS3)

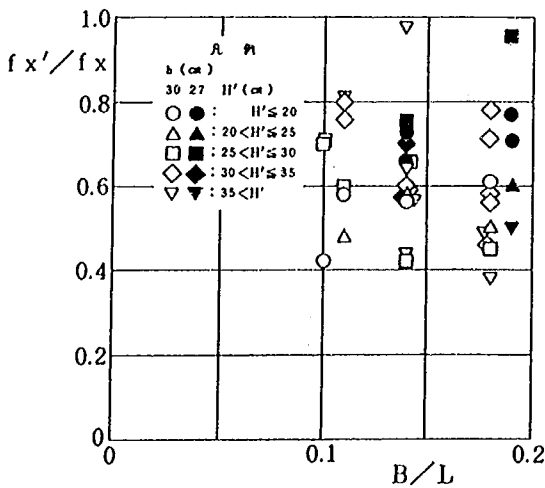


図3.60 $f_{x'}/f_x$ と B/L の関係(PLS3)

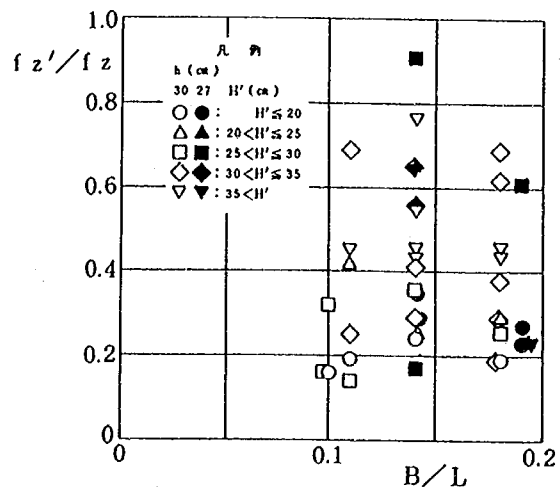


図3.61 $f_{z'}/f_z$ と B/L の関係(PLS3)

(2) 部材波力測定結果

各部材に作用する波力の時刻歴の一例を図3.62に示す。このときの波浪条件は図3.55の場合と同じである。なお、図には静水面付近に位置する部材についてのみ示した。これより次のことが分かる。

- ① 鉛直スリットの部材波力 (FS 1, HS 1, BS 1) および水平板の部材波力 (US 1, US 4) は、堤体沖側の水位 η_1 が極大のとき、ほぼ同時に極大値を持つ。
- ② どの部材波力についても、正の極値が負の極値より大きい。また、正の極大値を示す立ち上がり部の作用時間は約0.1~0.6 sと短く、波形も鋭く尖った三角形となっている。

①は、堤体の沖側の水位 η_1 が極大となった後、堤体の岸側の水位 η_2 が極大となるまでのわずかな時間に水粒子が次々と鉛直スリット壁および水平板に衝突するためと考えられる。②については、碎波条件で波面が部材に衝突することにより衝撃的な波力が作用するため、鋭く尖った形状を示すものと考えられる。

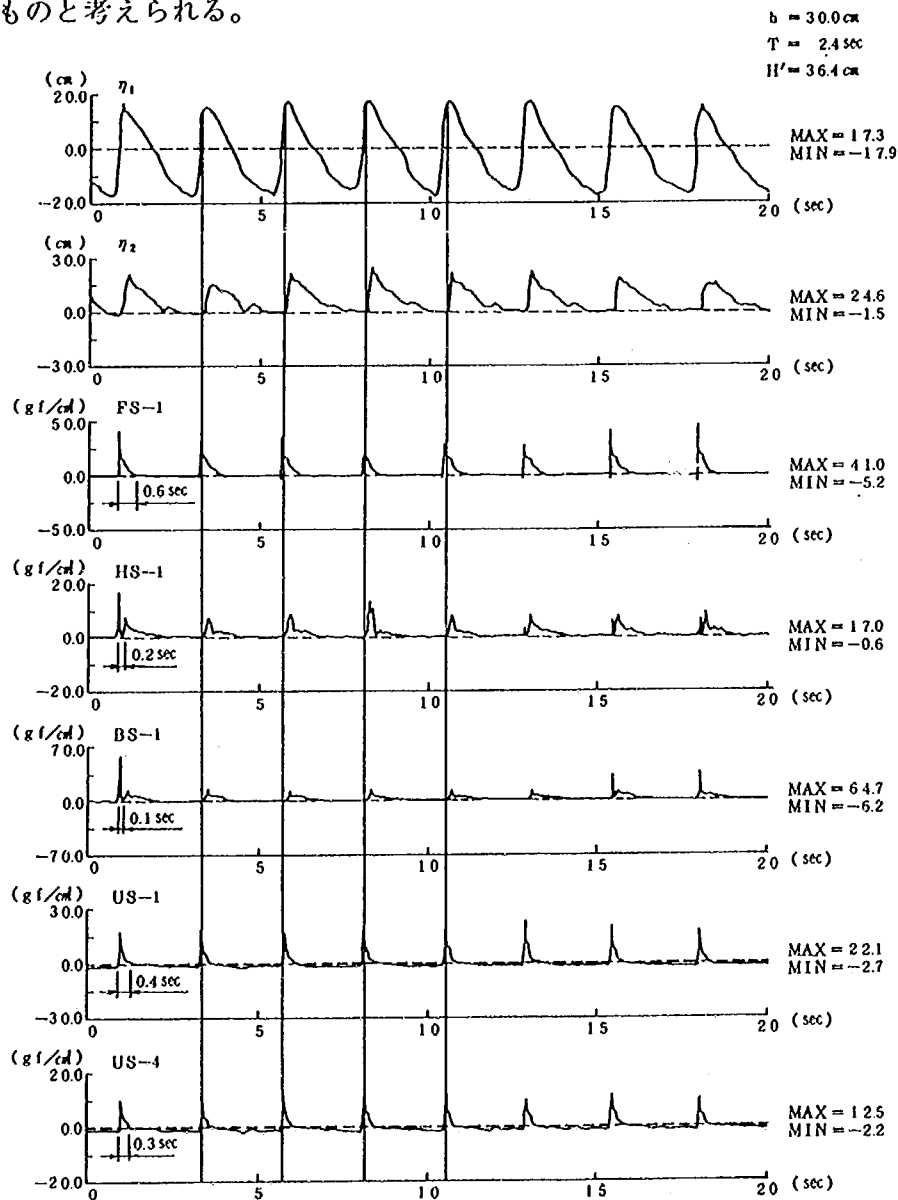


図3.62 部材波力及び水位の時刻歴波形 (PLS 3)

なお、水面下の部材波力の特徴としては、波力の値が静水面のものに比べて小さく、また波形が比較的正弦波形に近い特徴がある。さらに正、負の極値の絶対値がほぼ同じであった。これらの点より、以下の部材波力の検討では静水面付近の部材に働く波力について取り上げて検討することとし、さらにそれらの中で卓越した大きさを持つ岸向き水平波力と上向き鉛直波力について述べることにする。

部材波力 P と仮想通過波高 H' の関係を図3.63～3.67に示す。図中斜線付の記号は、非碎波領域のデータを表す。まず、1枚目鉛直スリット静水面付近の部材波力 (FS1) の実験結果によれば、非碎波領域 ($H' < 30\text{cm}$) の部材波力 P は周期にほぼ無関係であり、 H' に比例して増加する特徴がある。碎波領域 ($H' \leq 30\text{cm}$) の場合、周期によって P のばらつきが大きく、また P の H' に対する増加率が $H' < 30\text{cm}$ の場合に比べて大きくなっていることが分かる (図3.63)。図中に実線で示すように P の範囲は $P = (0.27 \sim 1.09) \cdot w_0 H'$ である。

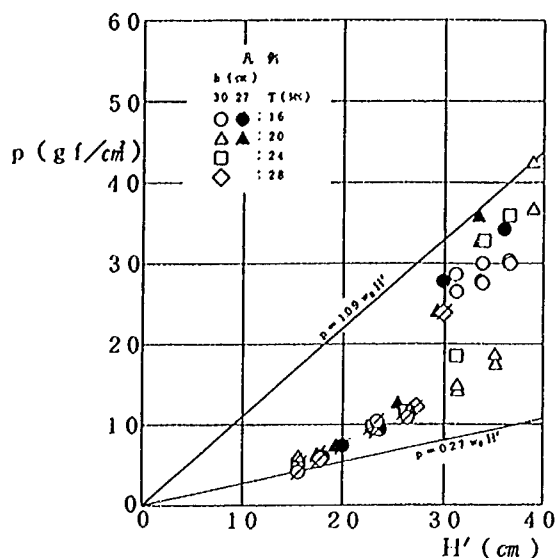


図3.63 P と H' の関係 (PLS3 : FS1)

2枚目の鉛直スリットの部材の点HS1での波力について、波力 P と仮想通過波高 H' の関係を図3.64に示す。 P と H' の関係についてはFS1 (図3.63) の場合とほぼ同様の傾向を示す。なお、波力の値は低潮位 ($h = 27\text{cm}$) の方が高潮位 ($h = 30\text{cm}$) の場合に対して若干大きくなっている。これは、低潮位の場合、静水面より上の部材面積が大きく、衝撃波力が作用し易いためと考えられる。 P の値の範囲は、 $P = (0.27 \sim 1.50) \cdot w_0 H'$ である。

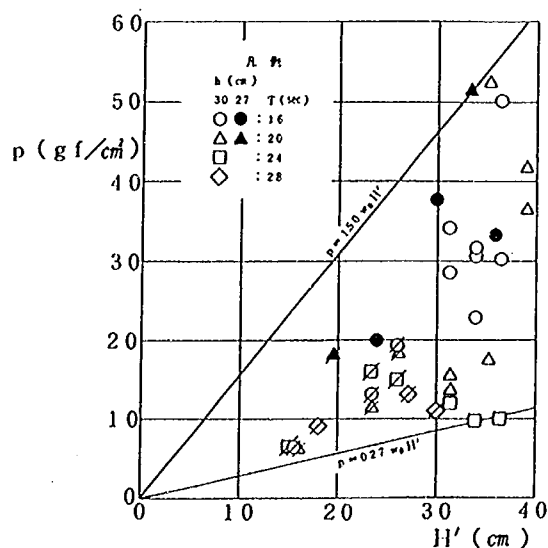


図3.64 P と H' の関係 (PLS3 : HS1)

3枚目の鉛直スリットの部材波力 (BS1) についてもほぼ同様な結果が得られており、 P の値の範囲は $P = (0.23 \sim 1.39) \cdot w_0 H'$ となった (図3.65)。

結局、当模型においては、静水面付近の水塊が各鉛直スリット上部に衝突することにより生ずる波力は各スリット共に同程度の値を有し、その場

合の3枚の鉛直部材波力の上限值はほぼ $p = 1.5 w_0 H'$ で与えられる。

次に、水平板に作用する部材波力について検討する。水平板沖側の部材波力 p と仮想通過波高 H' の関係を図3.66に示す。非碎波領域 ($H' \leq 30\text{cm}$) において p は周期に無関係であり、 H' に比例して大きくなる。しかし、碎波領域 ($H' > 30\text{cm}$) においては p は周期により値がばらついている。また、 p の値は $p = (0.17 \sim 0.55) \cdot w_0 H'$ である。これに対し、水平板岸側の部材波力 p と波高 H' の関係 (図3.67) について p の範囲を求めると、 $p = (0.13 \sim 0.31) \cdot w_0 H'$ となり、水平板沖側の部材波力に比べ若干小さくなっている。これは、波の進行にともなう鉛直スリットおよび水平板による乱れにより静水面下の水粒子の鉛直速度成分が減少することに起因していると考えられる。

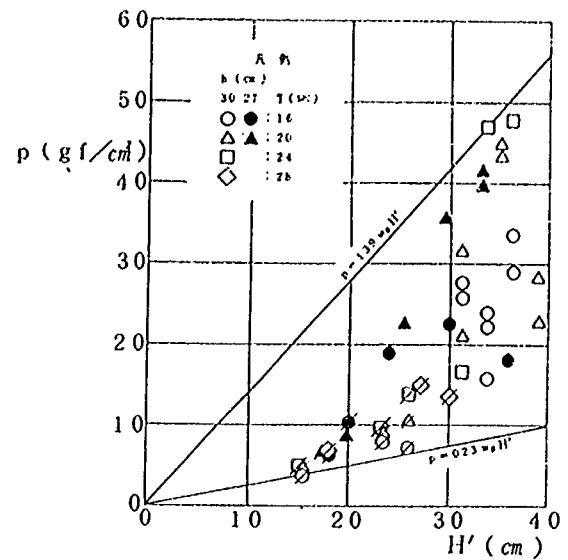


図3.65 p と H' の関係 (PLS3 : BS1)

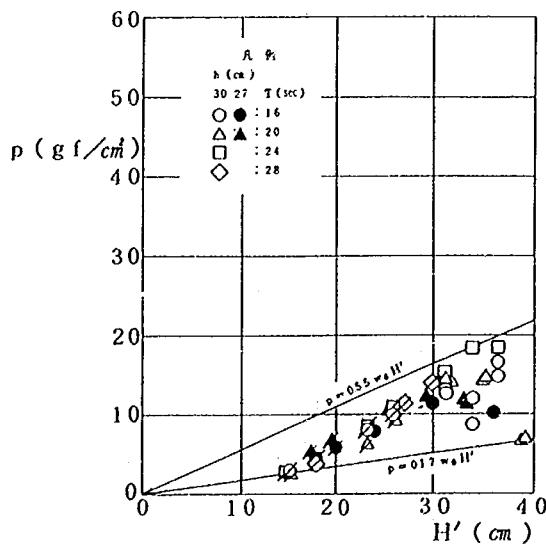


図3.66 p と H' の関係 (PLS3 : US1)

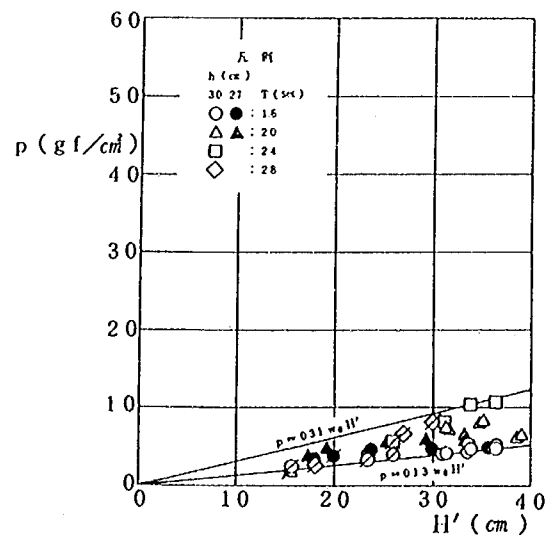


図3.67 p と H' の関係 (PLS3 : US4)

(3) 安定性の検討に用いる設計波力

全水平波力の実験値と合田式による計算値との比 f_x/f_{GX} 仮想通過波高 H' の関係を図3.68に示す。図中斜線付記号は、非碎波領域のデータを表す。この結果から高潮位 ($h=30\text{cm}$) のとき f_x/f_{GX} の平均値は0.42, 低潮位 ($h=27\text{cm}$) のとき f_x/f_{GX} の平均値は0.48とそれぞれの場合ではほぼ一定値となることが分かる。また、最大値は0.56である。低潮位の結果が高潮位の結果に比べてやや大きめの値を与えることについては、潮位が下がることによって静水面より上の構造物前面の面積が増加し、それに衝撃波力が作用したためと考えられる。

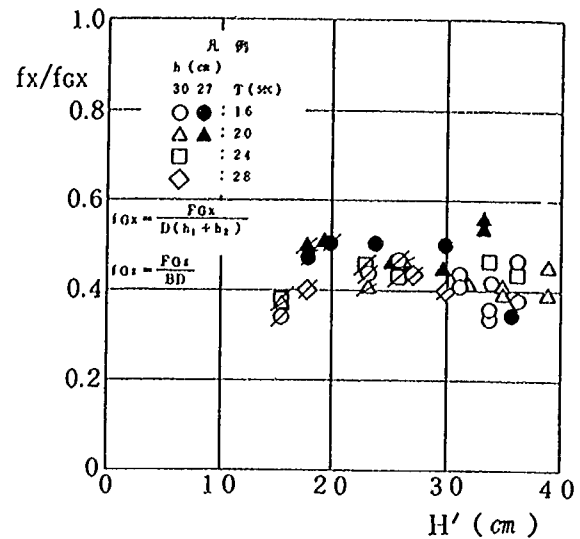


図3.68 f_x/f_{GX} と H' の関係 (PLS3)

結局、安定性の検討に用いる設計波力の算定では、水平波力に対し合田式より求まる全水平波力に低減係数 $\lambda = f_x/f_{GX}$ を乗ずれば良く、その場合、 $\lambda \approx 0.6$ とすることが可能である。

一方、全鉛直波力については、PLS3の場合底版がなく、かつ透過性構造であるため、合田式による揚圧力 f_{GX} との比較を行うのはやや無理がある。そこで、全鉛直波力の特性 (図3.59) を参照すると、 f_z/w_0H' は一定値 (最大0.32) を取っている。このことより、設計では $f_z/w_0H' \approx 0.35$ とすることができよう。

以上より、PLS3について全波力の最大値は次の式より算定することができる。

$$\begin{aligned} f_x &= \lambda f_{GX} \\ &= 0.6 f_{GX} \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$f_z = 0.35 w_0 H' \quad (3.12)$$

ただし、 f_x :平均水平波力強度、 f_z :平均鉛直波力強度、 f_{GX} :合田式による平均水平波力強度、 λ :波力の低減係数、 w_0 :水の単位重量である。なお、 H' は仮想通過波高であり、非碎波の場合には模型設置位置での最大波高、碎波の場合には碎波限界波高に等しい。

次に、波力の分布形状について述べる。高潮位 ($h=30\text{cm}$) で周期 $T=2.4\text{ s}$ 、波高 $H'=36.4\text{cm}$ としたとき、全水平波力が最大となるときの波力の分布を図3.69に示す。なお、水平波力については3枚の鉛直スリットの波力分布の和および合田式による波力分布の計算値を1枚目のスリットの部材波力とともに示している。これより、3枚の鉛直スリットの波力分布の和は静水面付近の値が水面下の値に比べてかなり大きいことが分かる。合田式による波力の計算値と比較すると静水面付近の部材波力の値は計算値に等しいが、水面下の部材波力の値は計算値に対してかなり小さい。このときの全水平波力の測定値が $F_x=8.13\text{ kgf}$ であるのに対し、波

力分布の測定値から求められた全波力の計算値は5.0kgfであった。また、全鉛直波力の測定値 $F_z = 4.57 \text{ kgf}$ に対し、波力分布から求められた計算値は3.5kgfであった。

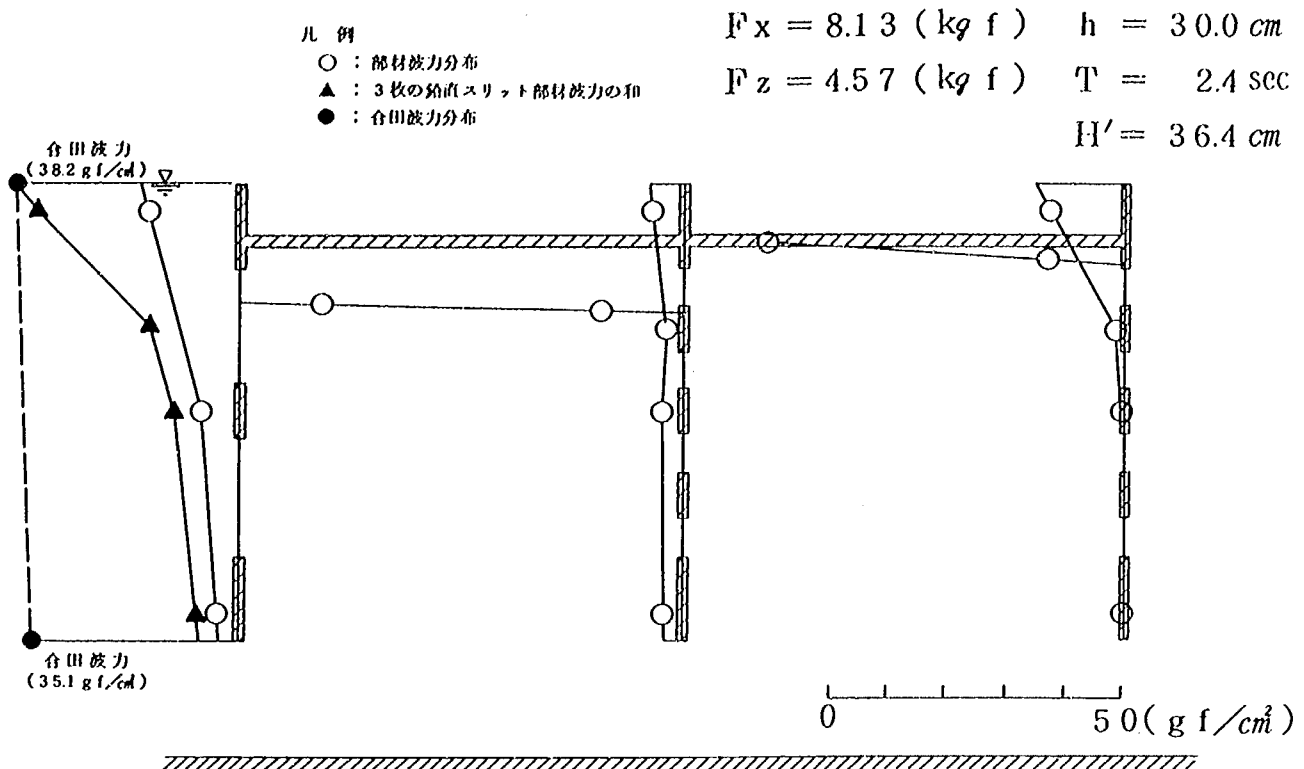


図3.69 全水平波力最大時の波力分布 (P L S 3)

(4) 部材の設計に用いる波力

部材の設計では、各部材に作用する最大の波力に対して応力の検討等を行うため、部材波力の最大値を個別に求めておかなければならない。部材波力の全測定結果について(2)で述べた方法により波力の上限值を無次元化してまとめたのが表3.10である。

表に示した数値は、全て碎波条件の場合の測定結果である。どのスリットに対しても静水面付近の部材波力が大きくなる。表3.10に示した数値は波力の最大値であり、衝撃的な波力の作用時間は前述のようにかなり短く、この波力が長時間継続して作用している訳ではない。碎波条件で動的に作用する部材波力を静的な外力に置き換えた場合、表に示した波力の値はいくらか低減されると考えられる。また、この関係は部材の固有振動数等の特性によって異なると考えられる。一方、設計では静的に作用する外力に対して応力検討を行うのが簡便である。このためここでは部材の設計に対しては測定結果の最大値に基づき、鉛直スリットおよび水平板の設計に用いる部材波力をそれぞれ次の通りとする。

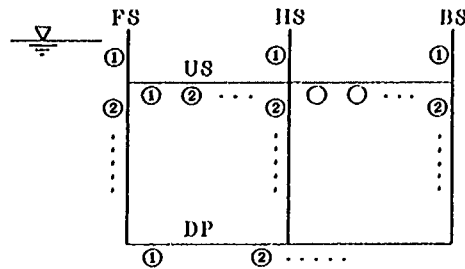
① 鉛直スリット部材の設計に用いる波力 :

$$P = 1.6 w_0 H'$$

② 水平板スリット部材の設計に用いる波力:

$$p = 0.6 w_0 H'$$

表3.10 無次元波力の一覧表 (水平板付スリット型(2))



		無次元波力: $p / w_0 H'$			
		鉛直スリット			水平板
		FS (1枚目)	HS (2枚目)	BS (3枚目)	US
PLS 3 ($h = 30\text{cm}$)	①	1.09	1.50	1.39	0.55
	②	0.52	0.32	0.29	0.51
	③	0.14	0.21	0.23	0.33
	④		0.16	0.19	0.31
	MAX	1.09	1.50	1.39	0.55
PLS 3 ($h = 27\text{cm}$)	①	1.08	1.55	1.25	0.41
	②	1.32	0.71	0.60	0.46
	③	0.14	0.20	0.22	0.27
	④		0.11	0.16	0.21
	MAX	1.32	1.55	1.25	0.46

(5) まとめ

本構造物 (PLS 3) について, 主要な実験結果をまとめると次のとおりである。

- ① 碎波条件のもとでは, 立ち上がり部が鋭い三角形の波形となる全波力が作用する。また, 波力は波高にほぼ比例して大きくなる。なお, 水平力は岸向き, 鉛直力は上向きが卓越する。
- ② 波高で無次元化した全波力 $f_x / w_0 H'$, および $f_z / w_0 H'$ はほぼ一定値をとる。また, それぞれの最大値は $f_x / w_0 H' = 0.5$, $f_z / w_0 H' = 0.35$ となる。
- ③ 部材波力は, 鉛直スリット部材, 水平板部材のいずれに対しても波高にほぼ比例して大きくなり, 水平力は岸向き, 鉛直力は上向きが卓越する。碎波条件のもとでは特に静水面上の部材に衝撃的な部材波力が作用し, 波力の増大が認められる。一方, 水中の部材に作用する部材波力は静水面上のものに比べてかなり小さい。

- ④ 3枚の各鉛直スリットに作用する部材波力は、静水面上についてはほぼ同程度である。また、水平板に作用する水平波力は岸側のもののほど小さくなる傾向がある。
- ⑤ 本構造物に作用する全水平波力は不透過性構造物に適用される合田式で算定した全水平波力の約0.6倍となった。構造物の安定性の検討においては、合田式による全水平波力に低減率 λ を乗じるものとし、 λ の値は実験結果の最大値を考慮して $\lambda=0.6$ とすることができる。
- ⑥ 設計に用いる部材波力は、実験結果により得られた最大値に基づき、鉛直スリット部材については $P=1.6w_0H'$ 、水平板部材については $P=0.6w_0H'$ とすることができる。

3.4.4 透過水平板付スリット型

透過水平板付スリット型は、波の進行方向に3列のスリット壁を有し、さらに、水面付近にスリット式の透過水平板と海底面に不透過板が配置された構造である。本構造は、天端が静水面と一致した低天端構造であるため、天端が静水面より高く突出した構造に比べて波力の低減を図ることができる。

以下では、VHS1を基本形状として、構造物の吃水深 h_1 と水深 h の比 h_1/h を0.8としたVHS2、海底面に配置された底版を撤去したVHS3について、波力の作用状況、波力特性、部材波圧について検討した結果を述べる。

(1) 全波力測定結果*

周期 $T=2.4s$ 、波高 $H'=36.4cm$ 、 $h=30cm$ の場合について、堤体模型VHS1の直前、直後の水面変動 $\eta_1 \cdot \eta_2$ 、および堤体に作用する水平力 F_x 、鉛直力 F_z の測定記録を図3.70に示す。堤体直前の水面変動 η_1 が最大となる付近で、 F_x 、 F_z は最大となる。実験中の観察によれば、波は堤体の前方10~20cmで巻き波砕波を起こす。堤体に作用する波の状態は一定しておらず、堤体に衝突する波面の状態により、 F_x 、 F_z の波形は変動する。また、本構造は没水タイプであり、波は越波するので、 F_x は衝撃的な波力を示さない。一方、 F_z については、水面付近に設置された水平板に波面が衝突するため、衝撃的な波力が作用することがわかる。

VHS1~VHS3に作用する平均水平波圧 f_x 、平均鉛直波圧 f_z と仮想通過波高 H' の関係を図3.71~3.75に示す。図中には、堤体に作用する水平力、鉛直力の把握が容易なように、 f_x 、 f_z を w_0H' で除した波圧強度を示した。また、非砕波領域を表すデータの記号は斜線で示した。

$h=27cm$ 、 $30cm$ 、 $T=1.6$ 、 2.0 、 2.4 、 $2.8s$ の場合についてVHS1（基本形状）に作用する f_x 、 f_z と波高の関係を図3.71、3.72に示した。 f_x は、 H' が大きくなるにつれて増加する。 f_x の正值の増加の割合は、 $H'>25cm$ の場合の方が $H'\leq 25cm$ の場合よりも大きい。これは $H'>25cm$ の場合、水塊が激しく堤体に衝突することに起因している。また、 $H'\leq 25cm$ の場合、周期の変化に対する f_x の違いはそれ程大きなものではなく、 f_x は $(0.35\sim 0.5)w_0H'$ 程度であるの

*執筆:小山文男(大成建設株式会社)

に対して、 $H' > 25\text{cm}$ の場合、 f_x は周期による変化が大きく、 $(0.4 \sim 0.7) w_0 H'$ の範囲に分布していることがわかる。水深 h の違いに対する f_x の正值の差異は、同一周期では、水深の小さい $h = 27\text{cm}$ の場合の方が、 $h = 30\text{cm}$ の場合よりも大きくなる。 f_x の負値は正值に比べて、 $1/2$ 倍以下である。また、周期、水深の変化に対する f_x の負値の差異は小さく、 f_x は $(0.15 \sim 0.3) w_0 H'$ である。一方、 f_z は鉛直上向き方向が $(0.2 \sim 0.7) w_0 H'$ 、鉛直下向き方向が $(0.15 \sim 0.3) w_0 H'$ 程度であり、 f_x と同じ程度の平均波圧が作用する。 f_x と同様に、 H' が大きくなるにつれて f_z は増加する。その増加の割合は、 $H' \geq 25\text{cm}$ で大きくなる傾向があるが、ある波高以上になると、逆に f_z が減少する結果が得られた。また、水深の変化に対する f_z の差異は、波高によりばらつきはあるが、 $h = 27\text{cm}$ の方が $h = 30\text{cm}$ の場合よりも f_z が $(0.15 \sim 0.2) w_0 H'$ 程度大きくなる。したがって、図3.71, 3.72より、潮位差の大きい海域に本構造物を設置する場合、この潮位差を十分考慮して堤体に作用する水平力、鉛直力を設定する必要がある。また、波の進行方向に作用する波力は、逆方向に作用する波力よりも大きいいため、波の進行方向に作用する水平力について設計検討を行えばよいことがわかる。

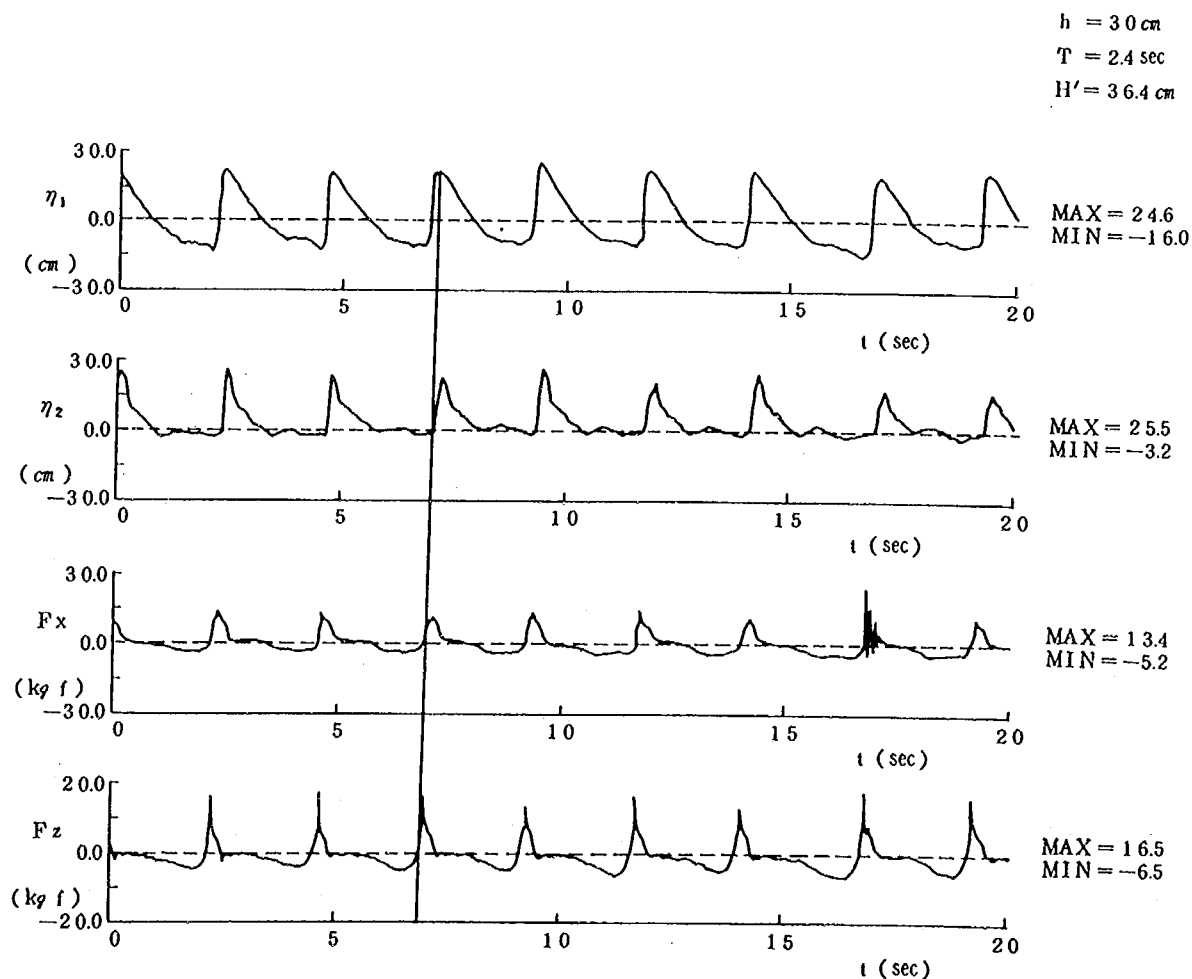


図3.70 全波力及び水位の時刻歴図 (V H S 1)

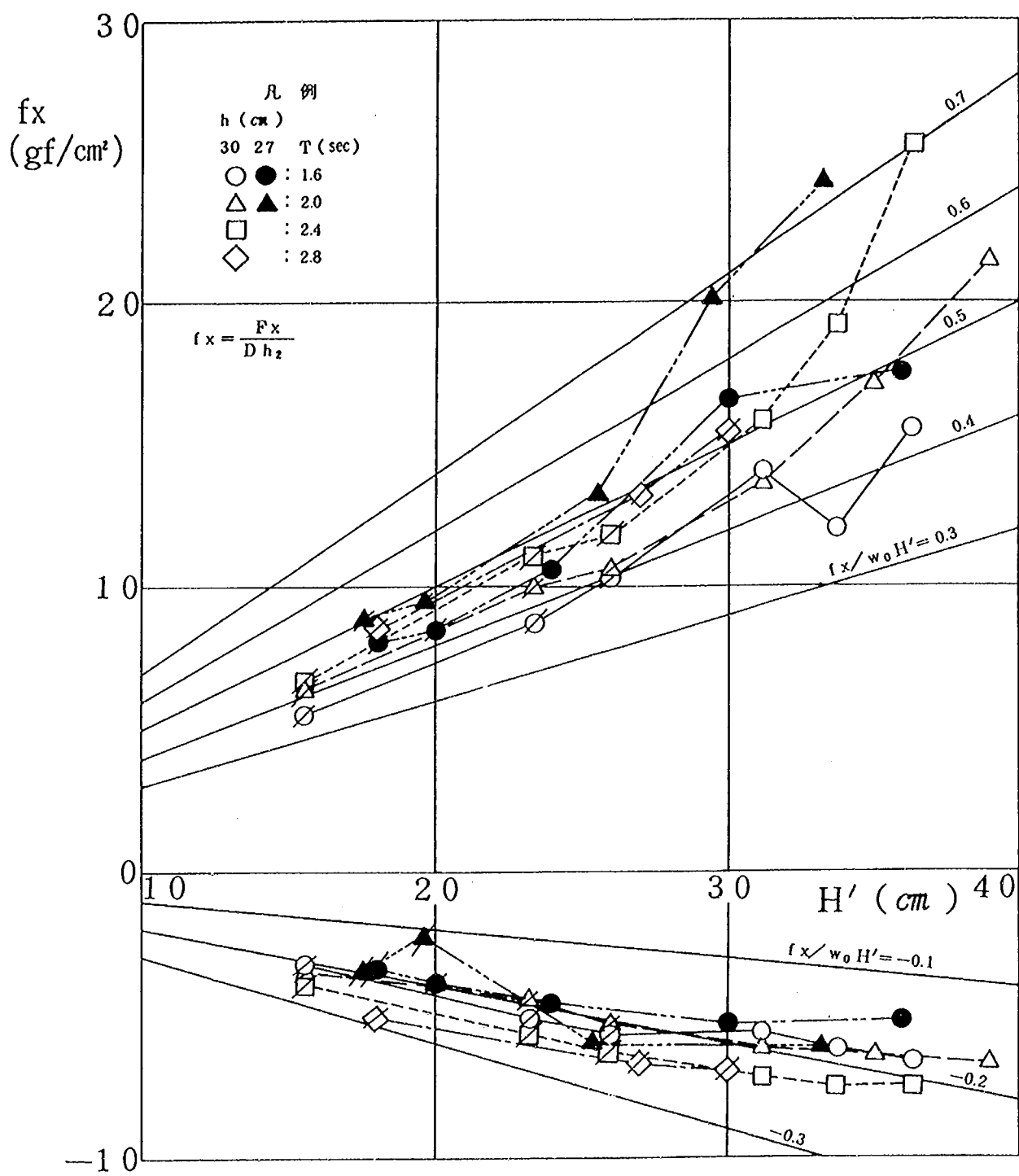


図3.71 f_x と H' の関係 (VHS 1)

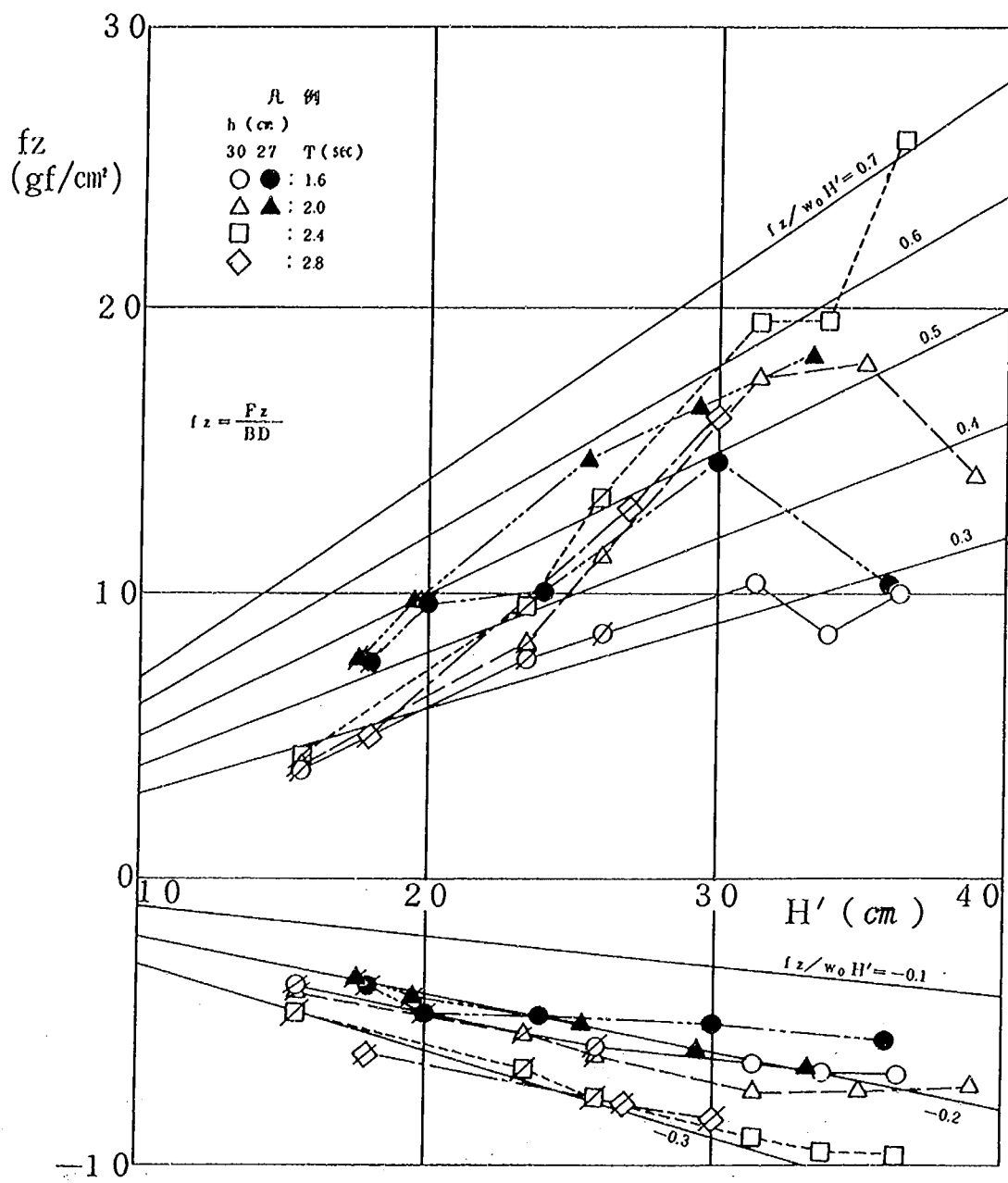


図3.72 f_z と H' の関係 (VHS 1)

$h = 30\text{cm}$, $T = 1.6, 2.0, 2.4, 2.8\text{ s}$ の場合について, VHS 2 ($h_2/h = 0.8$) に作用する f_x , f_z と波高の関係を図3.73, 3.74に示す。 f_x は, 正值, 負値のいずれも周期に対する変動が小さく, 周期特性がほとんどみられない。VHS 2 に作用する f_x は, VHS 1 と比較して $0.1w_0H'$ 程度小さい。 f_x の正值 (波の進行方向波力) は, $H' \leq 30\text{cm}$ では $(0.3 \sim 0.4)w_0H'$, $H' > 30\text{cm}$ では $(0.4 \sim 0.5)w_0H'$ である。一方, 負値は $(0.1 \sim 0.2)w_0H'$ である。また, f_z の正值は, VHS 1 の場合と同様の傾向を示しているが, その値は VHS 1 よりも $0.1w_0H'$ 程度小さく, $(0.2 \sim 0.6)w_0H'$ となる。 f_z の負値は VHS 1 と大差なく, $(0.2 \sim 0.3)w_0H'$ となることがわかる。

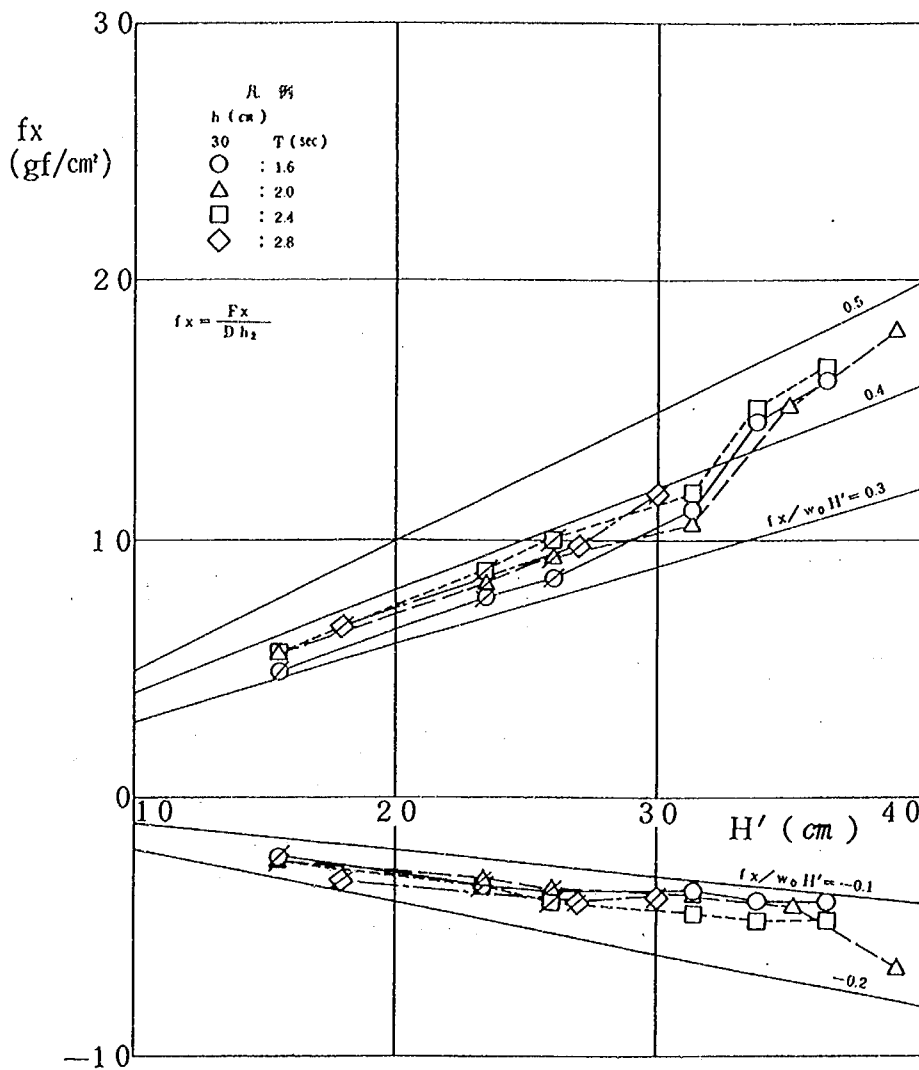


図3.73 f_x と H' の関係 (VHS 2)

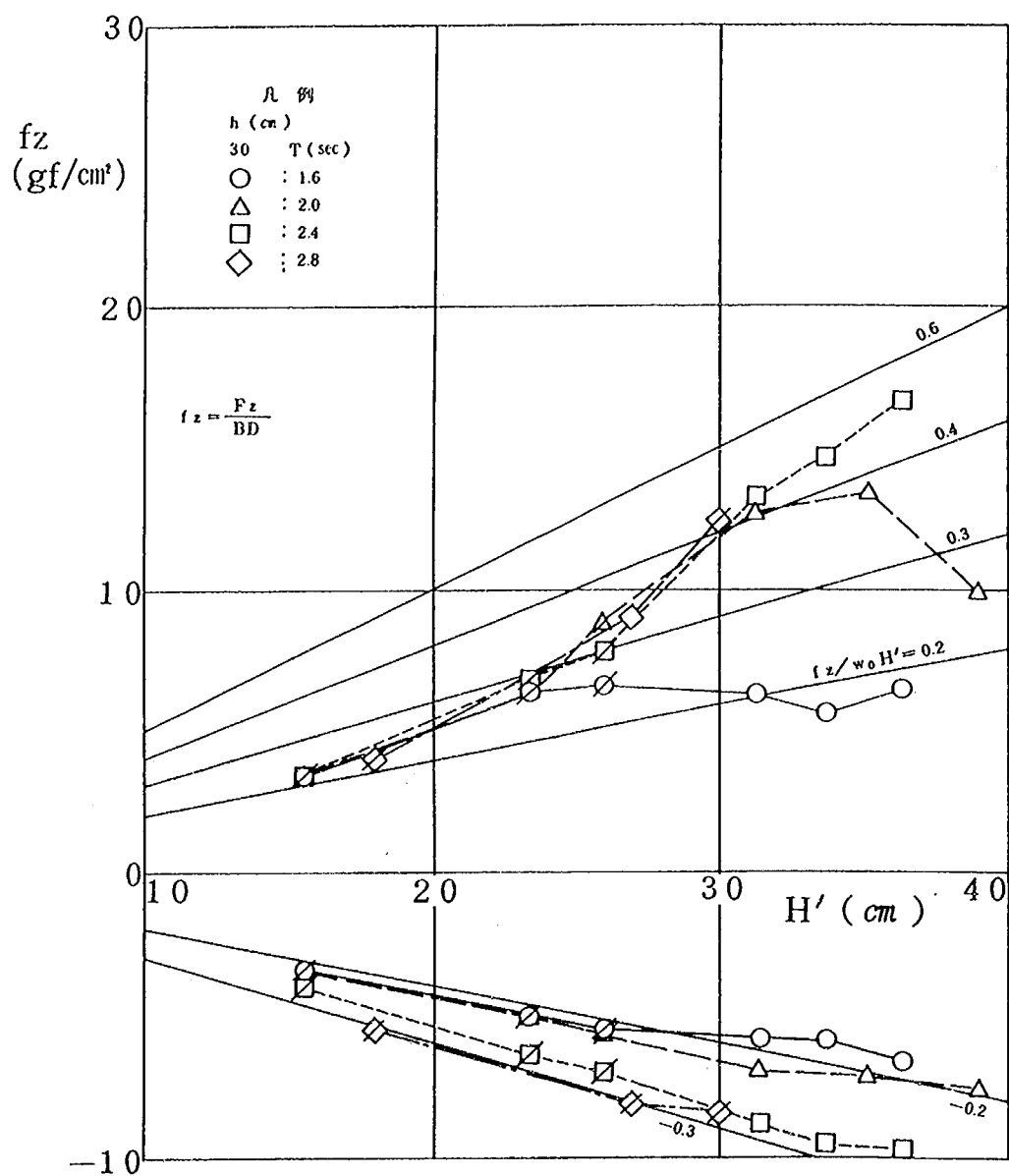


図3.74 f_z と H' の関係 (VHS 2)

次に、VHS 3に作用する波力について述べる。VHS 3は、VHS 1の底版のみを撤去したタイプであり、VHS 3に作用する f_x は、VHS 1に作用する f_x とほぼ同じであるため省略した。 $h = 30\text{cm}$ 、 $T = 1.6, 2.0, 2.4, 2.8\text{s}$ の場合について、VHS 3に作用する f_z と各波高の関係を図3.75に示す。 f_z は、VHS 1に作用する f_z と大差ない。したがって、本構造物は底版の有無にかかわらず、作用波力は変化しないと考えてよい。

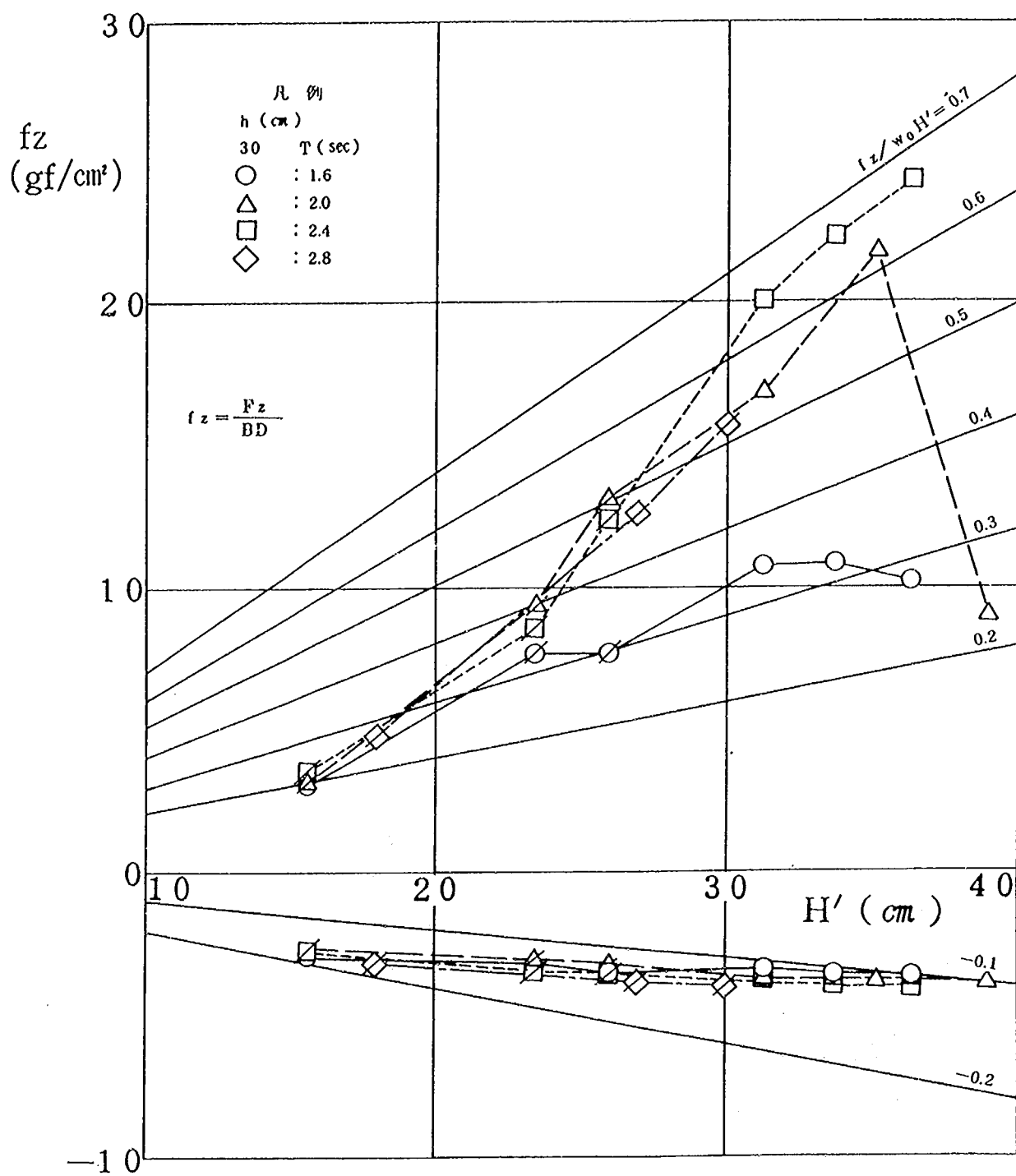


図3.75 f_z と H' の関係 (VHS 3)

また、VHS1に作用する波の進行方向の平均水平波力強度 f_x/w_0H' 鉛直上向き方向の平均鉛直波力強度 f_z/w_0H' の最大値と相対幅 B/L の関係を図3.76, 3.77に示す。 B/L が大きくなると、 f_x/w_0H' 、 f_z/w_0H' は減少する。その減少率は、波高が大きくなるにつれて増加する。また、 B/L が小さくなるにつれて、波高に対する f_x/w_0H' 、 f_z/w_0H' の変動が大きくなる。 f_x/w_0H' と f_z/w_0H' を比較すると、 f_z/w_0H' の方が波高の変化による差異が大きい。

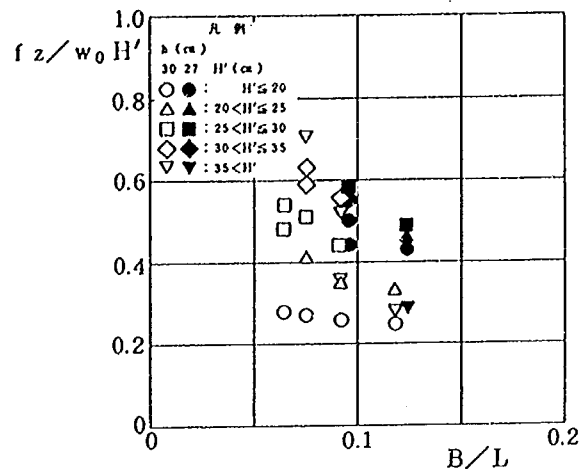
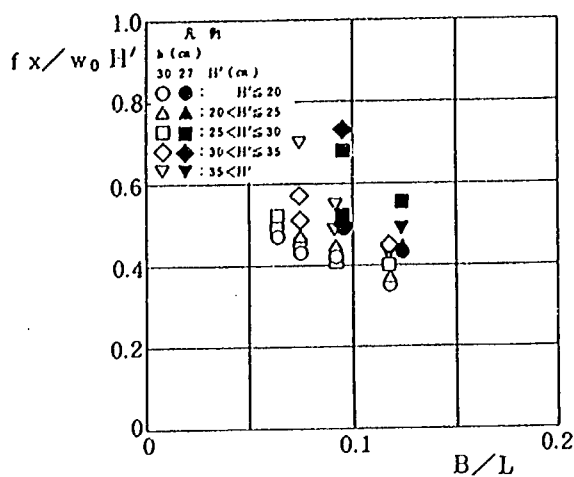


図3.76 f_x/w_0H' と B/L の関係 (VHS1) 図3.77 f_z/w_0H' と B/L の関係 (VHS1)

本構造物は、水平力、鉛直力を同時に受けるため、水平方向と鉛直方向の同時刻の波力を調べることは、設計上重要である。VHS1について、全鉛直波力が最大になる時の平均水平波力強度 f_x' と最大平均水平波力 f_x の比 f_x'/f_x と相対幅 B/L の関係を図3.78に示す。実験を行った B/L の範囲では、 f_x'/f_x は0.4～1.0の広い範囲に分布している。また、波高 H' の変化に対する f_x'/f_x の変動は不規則である。これは、波が堤体に作用する状況により、同時波力がかかなりばらつくことを意味しており、設計上はこのばらつきを十分考慮する必要がある。一方、水深 h の変化に対しては、水深の小さい $H=27\text{cm}$ の方が水深 $h=30\text{cm}$ よりも f_x'/f_x が大きい傾向がある。

同様に、VHS1について、全水平波力が最大になる時の平均鉛直波力 f_z' と最大平均鉛直波力 f_z の比 f_z'/f_z と相対幅 B/L の関係を図3.79に示す。実験を行った B/L の範囲では、 f_z'/f_z は0.2～0.9の広い範囲に分布しており、 f_x'/f_x よりもばらつきが大きい。波高 H' が大きくなると f_z'/f_z も大きくなる傾向がある。

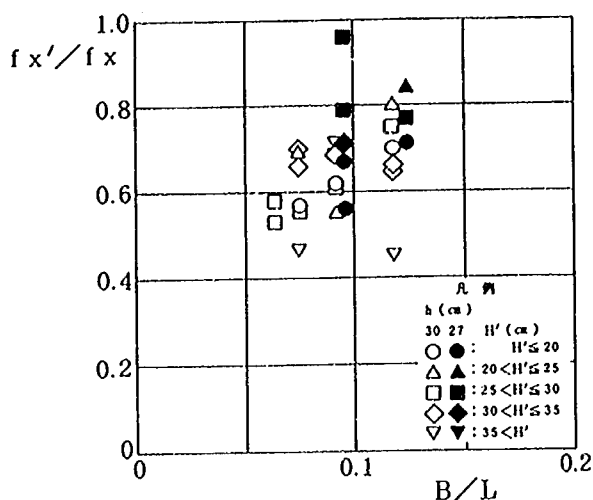


図3.78 $f_{x'}/f_x$ と B/L の関係(VHS1)

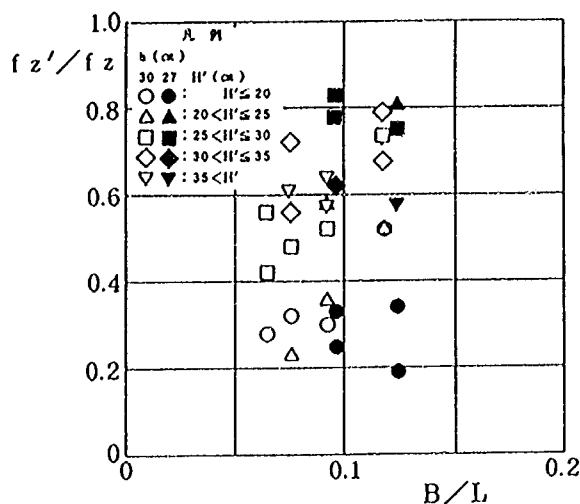


図3.79 $f_{z'}/f_z$ と B/L の関係(VHS1)

(2) 部材波圧の測定結果*

部材波圧の時刻歴を図3.80に示す。実験条件は水深30cm，実験波周期2.4 s，波高36.4cmである。図には堤体の前面と後面の水位波形 η_1 ・ η_2 と鉛直スリット前壁（FS1），中間壁（HS1），後壁（BS1）と水平スリット前室部（US1），後室部（US4）と底版（DP1-DP2）の部材波圧を示した。ただし，底版の鉛直力は揚圧力を負とする。

部材波力の実験結果を整理すると，水平力は波の進行方向の波力が，また，鉛直力は揚圧力が大きいので以下の検討はこの方向の波力に着目して検討する。

FS1，US1，US4の最大波力は前面水位が最高のときほぼ同時に発生する。これに対してHS1，BS1，（DP1-DP2）の最大波力は約0.15 s遅れて発生する。

FS1の波形は，鋭い立上り部の衝撃的な波力とこれに続く平らな腰掛部からなるが，HS1やBS1の波形は腰掛部のみで波力も小さい。写真3.1(b)によると堤体の直前における波形は，波の頂部が前方に打込む寸前の状態であることが分かる。一般に，構造物のやや前方で碎けるときに最大の波圧が発生するが，FS1における波圧の鋭い立上り部はこれが原因と考えられる。一方，写真3.1(c)によると，堤体に衝突した後の波は堤体上に落下せず背後の水域に

*執筆:国栖広志 五洋建設株式会社 技術研究所

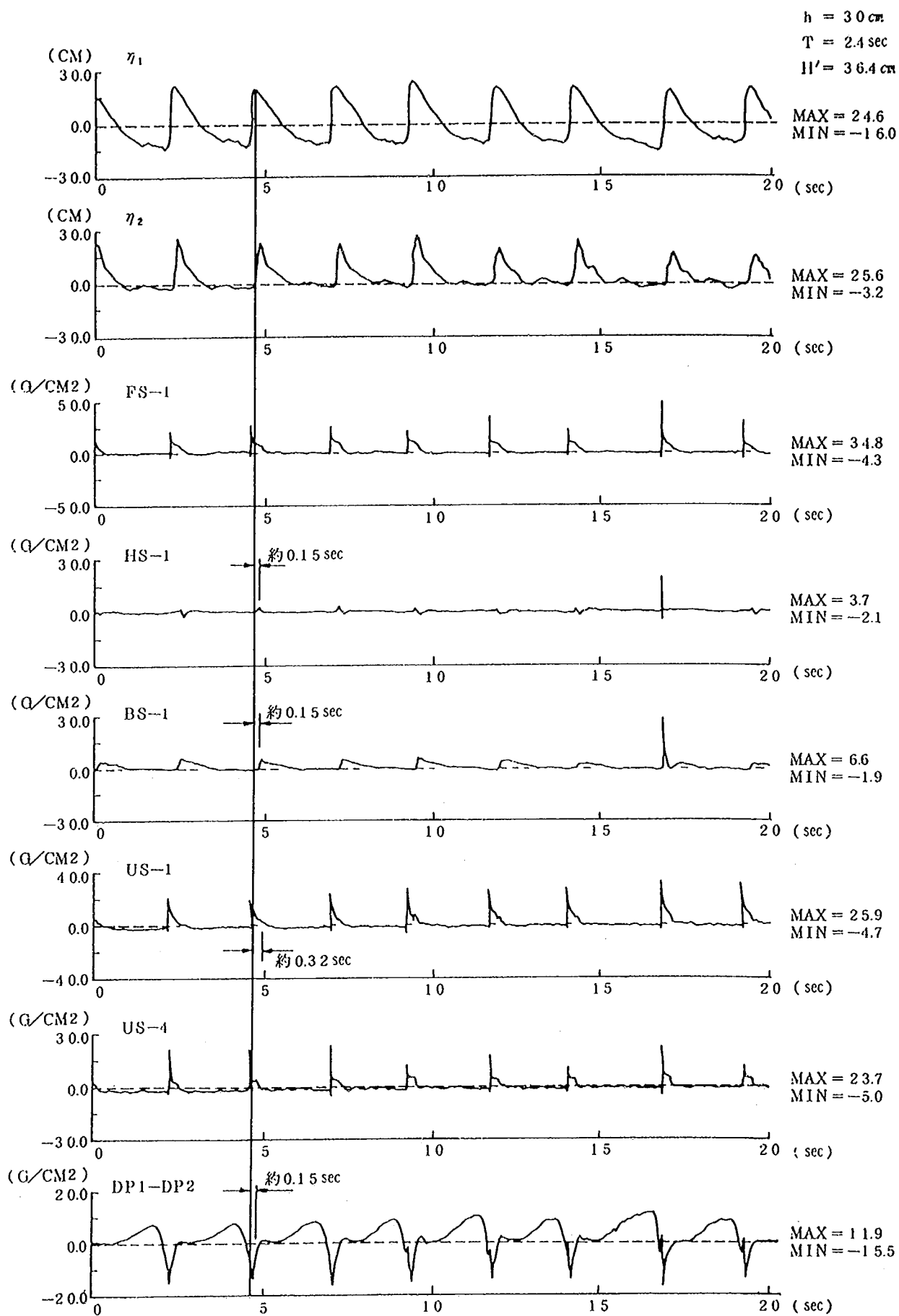


図3.80 部材波力および水位の時刻歴波形 (V H S 1)

打込む。このためH S 1やB S 1の部材には衝撃圧は作用せず腰掛部のみの小さな波力となる。ただし、条件によって波は堤体上に打込む場合もあり、H S 1、B S 1の部材にも鋭い立上り部を有する衝撃的な波力が作用する。

水平スリット壁のU S 1とU S 4の波力は、F S 1と同様衝撃圧が作用する。U S 1の波力は鋭角の三角波形で、作用時間は図に示すように約0.33 sとやや長いが鋭い立上りの部分では1/100 s以下と非常に短い。

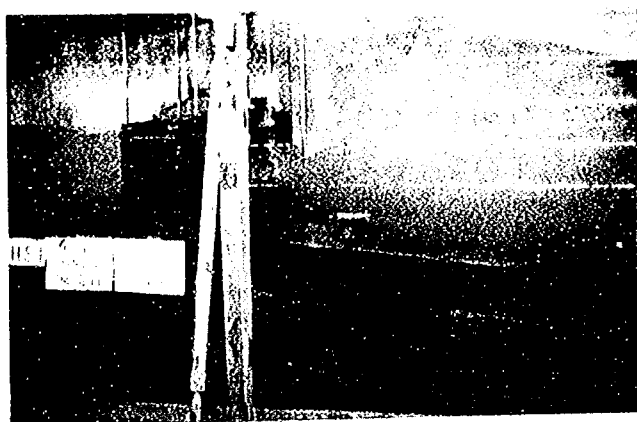
U S 1とU S 4の波力をさらに詳しく比較するとU S 1は前傾三角形型であり、U S 4は立上り部とこれに続く平らな腰掛部からなる。目視観察によると引き波時V H S 前室部の水位は、水平スリット壁下端より約3 cm低くなり、スリット壁との間に空隙が生じる。この状態において波が入射すると、前室部の水面は波の上昇に伴いスリット壁下面をたたき、前傾三角形の大きな衝撃圧が発生する。

一方、V H S 後室部の水面は水平スリット板下端まで低下するがスリット壁との空隙は小さい。このため、U S 4の波力は波が上昇を開始する瞬間には急激に増大するが、スリット壁の水没と同時に急激に減少するためU S 1に比較して小さい。

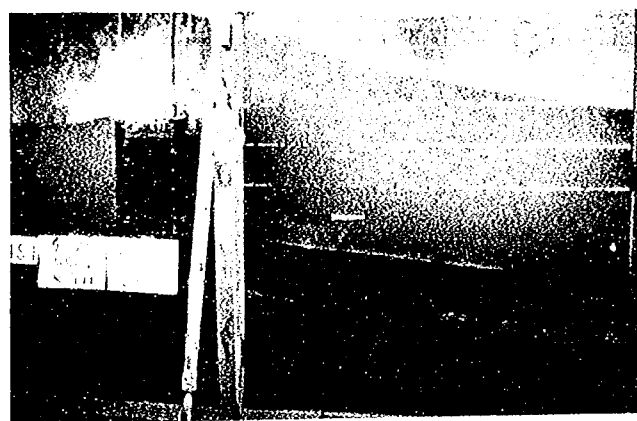
底版には衝撃的な揚圧力は発生せず、その最大値の発生時刻はF S 1の最大値より約0.15 s遅れる。

鉛直スリット前面壁に対して、上か

$$h = 30\text{cm}, \quad T = 2.4\text{sec}, \quad H' = 36.4\text{cm}$$



① 衝突前



② 衝突直前



③ 衝突直後

写真3.1 波の作用状況 (V H S 1)

ら順に3段目までの部材波圧 (FS1, FS2, FS3) を図3.81～図3.83に示す。図から前面壁の部材波圧は上段で最も大きく下段に従って小さくなることが明らかである。FS1とFS2の部材波力は波高 H' が30cm以下の非砕波の状態では少なく、波高 H' が30cm以上の砕波が作用すると急激に大きくなる。写真3.1(a)によると、引き波時堤体前面の水位は上から3段目のスリット下端まで低下しスリット壁が露出する。しかし、波が堤体に作用する状態において2段目と3段目のスリットの間隙より冲向きの噴流が発生し3段目のスリットは水没した状態となる。このためFS1やFS2のように水面から露出した部材で波力は大きくFS3のように水没した部材では衝撃圧を緩衝するため著しく小さくなる。

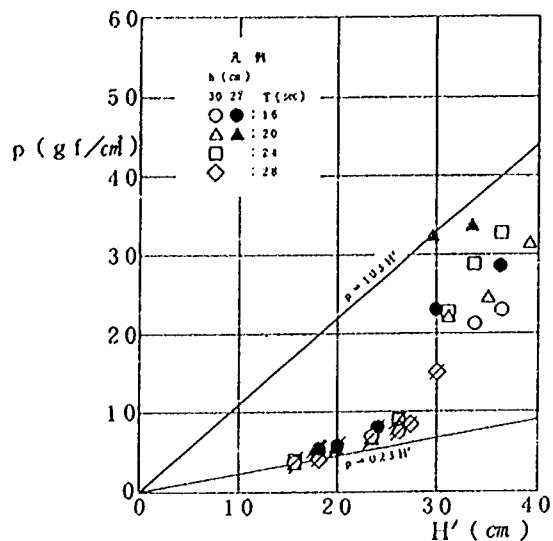


図3.81 pと H' の関係 (VHS1 : FS1)

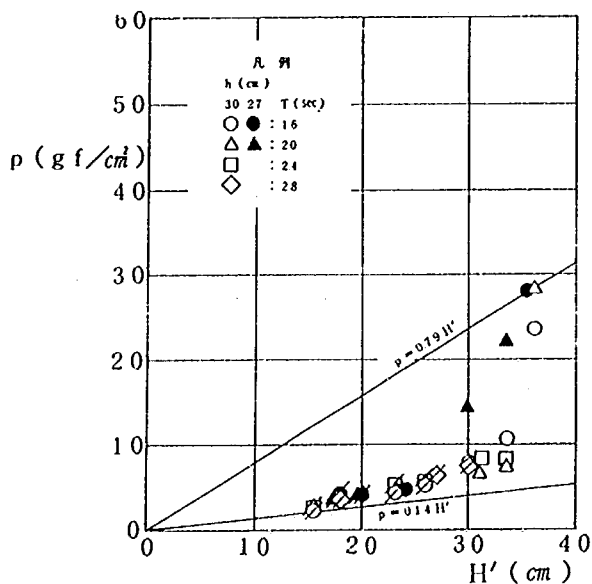


図3.82 pと H' の関係 (VHS1 : FS2)

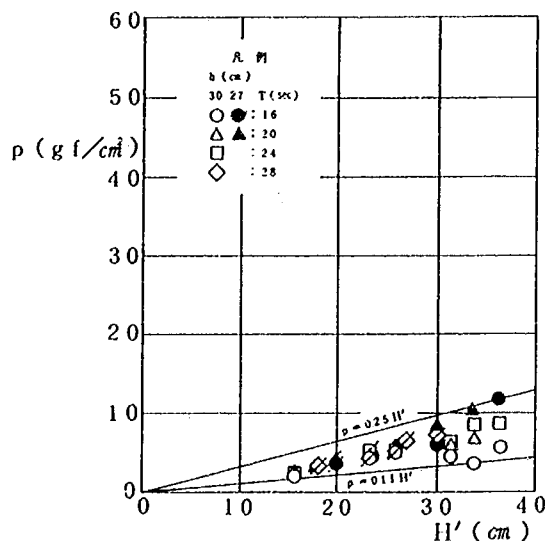


図3.83 pと H' の関係 (VHS1 : FS3)

鉛直スリット前壁、中間壁、後壁の最上段の部材波力を相互に比較するために、中間壁、後壁の最上段の部材波力を図3.84, 3.85に示す。ただし前壁の部材波力は既に図3.81に示した。これによると、最上段の部材にはほぼ同程度の大きな衝撃力が作用することが分かる。図には示さなかったが、中間壁や後壁の2段目以下のスリット壁部材は常に没水状態であるため前述した波力の緩衝効果により波力は小さい。

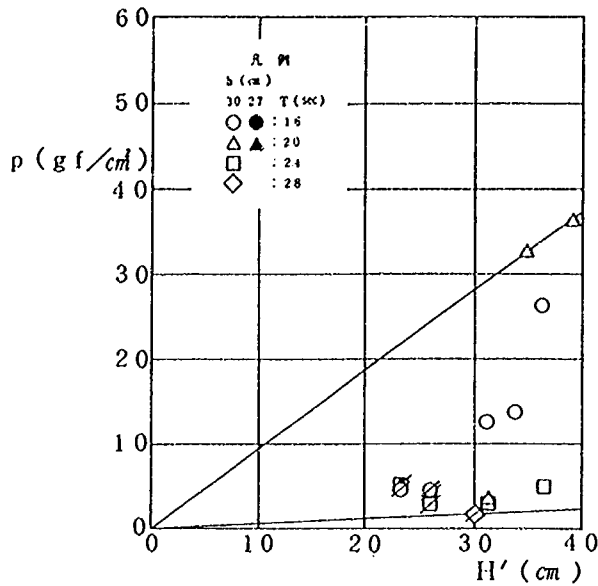


図3.84 p と H' の関係 (VHS1 : HS1)

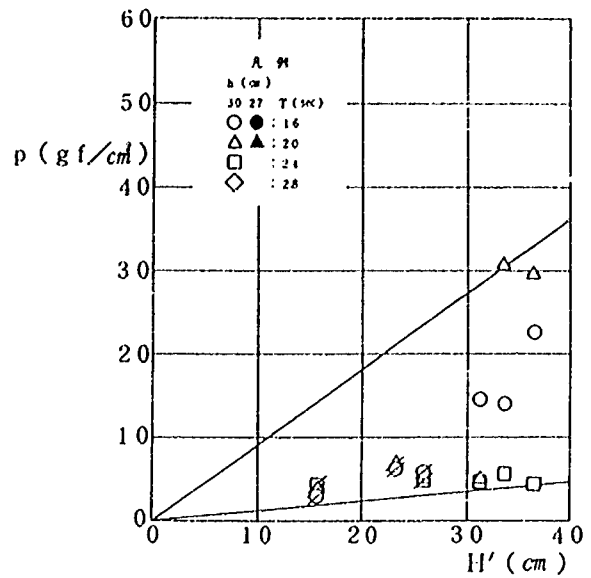


図3.85 p と H' の関係 (VHS1 : BS1)

水平スリット板に作用する揚圧力は、前述のごとく水位が上昇するとき衝撃力が発生するため全ての部材で大きい。ここでは、代表例として揚圧力が最も大きくなるUS2部材波力を図3.86に示した。

底版前端部の鉛直波力は図3.87に示すように波力は10kgf/cm²以下と水平スリット板と比較すると小さく、碎波が堤体に作用してもこの部材には衝撃的な波力が発生することはない。

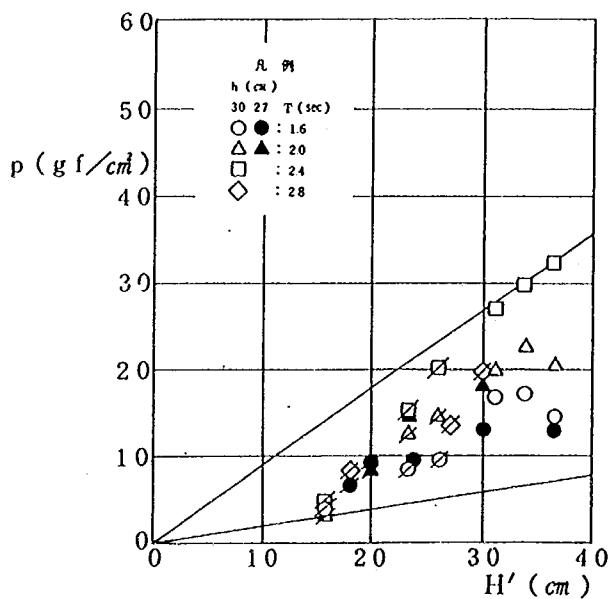


図3.86 p と H' の関係 (VHS1 : US2)

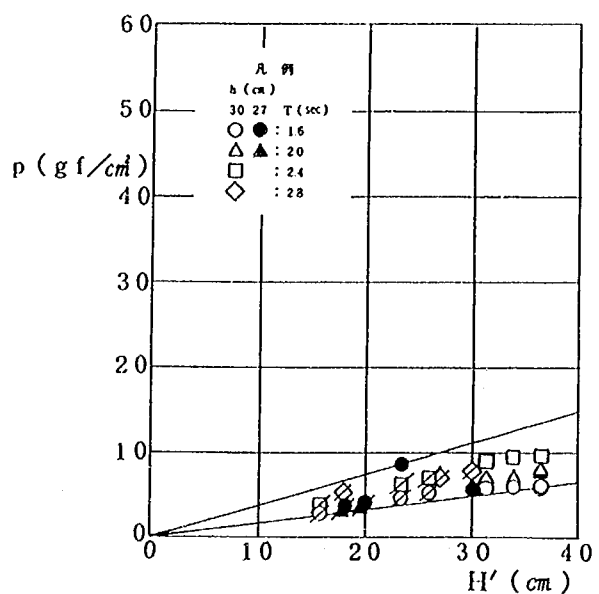


図3.87 p と H' の関係 (VHS1 : DP1-DP2)

(3) 安定性の検討に用いる波力

VHS 1型に関して、合田波力式の計算値と水平波力の実験値の比を図3.88に示す。実験ではVHS 1型模型を用いて水深 h が27cmと30cmのときの波力特性について検討した。堤体の天端は30cmの水位と一致しており、27cmでは水面より3cmだけ模型が突出している。 $h = 30\text{cm}$ の場合の波力は、碎波領域においても1データを除いて合田波力式の0.4~0.6倍と比較的小さい。一方、水深27cmの場合の波力は合田波力式の0.5~0.8倍と30cmの場合に比較して約15~20%大きく、碎波領域での増大が顕著である。以上より、VHSの天端高を静水面より突出させると H/h が1.0以上の碎波領域において波力の増大が認められることから、設計における波力の適用には十分な注意が必要である。

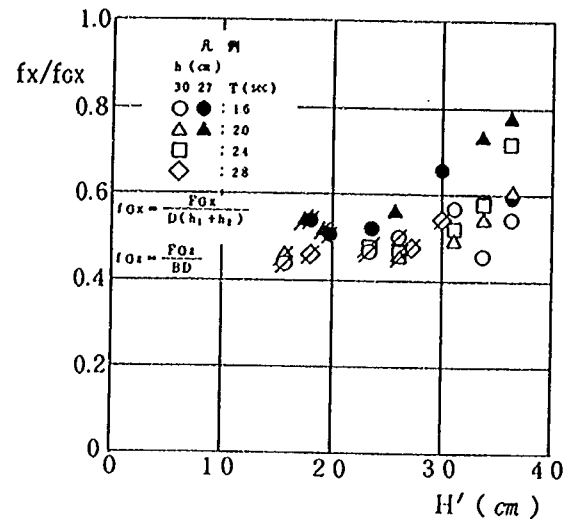


図3.88 f_x/f_{GX} と H' の関係 (VHS1)

VHS 2型の波力特性はVHS 1型とよく似ており吃水深の違いによる大きな差は認められなかった。

全水平波力が最大となる時の部材波力の分布と、全鉛直波力が最大となる時の部材波力の分布を図3.89, 3.90に示す。

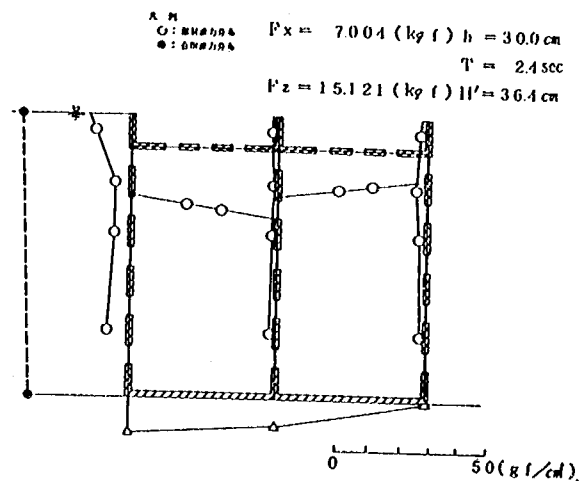
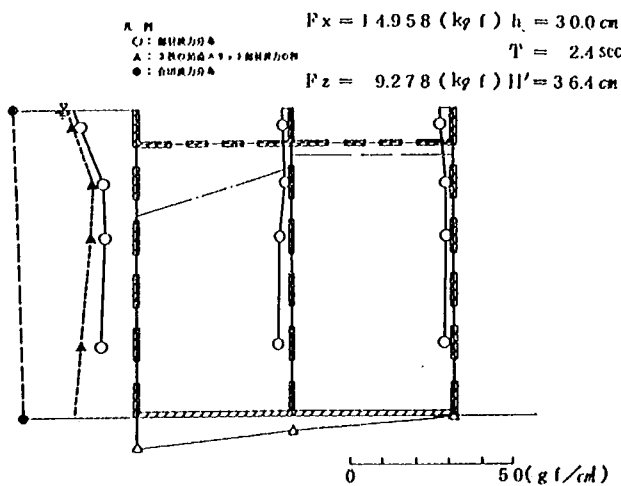


図3.89 全水平波力最大時の波力分布 (VHS 1) 図3.90 全鉛直波力最大時の波力分布 (VHS 1)

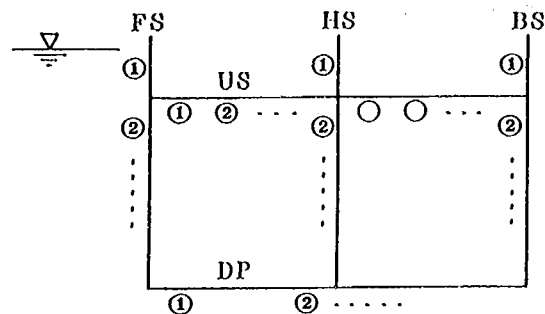
図には、合田波力式の計算結果を破線で示し、鉛直スリット前壁、中間壁、後壁における各段の波力の合計値を点線で示す。図3.89より、全水平波力が最大となる時の鉛直スリットに作用する部材波力は前壁で大きいものの、中間壁、後壁では非常に小さい。すなわち、全水平波力のほとんどは前壁で発生する。また、波力の合計値は合田式から算定した波力分布に比べて小さい。

(4) 部材の設計に用いる波力

無次元波力の一覧表を表3.11に示す。波力は鉛直スリット前壁では上部の2枚が中間部と後壁では最上部の1枚で大きく、他の部材では比較的小さい。水平スリットの揚圧力は4枚とも大きい。底版に作用する揚圧力は水平スリット壁に比較してかなり小さい。

水平方向部材波力は堤体の天端が水面から露出すると全体的に約10～20%大きくなる。

表3.11 無次元波力の一覧表（水平板付スリット型(2)）



		無次元波力： $P / w_0 H'$				
		FS	HS	BS	US	DP
模型名 ($h=30\text{cm}$) VHS1	①	0.91	0.94	0.87	0.69	0.29
	②	0.73	0.18	0.15	0.87	0.35
	③	0.25	0.14	0.15	0.67	0.31
	④	0.27	0.14	0.15	0.65	
	MAX	0.91	0.94	0.87	0.87	0.35
模型名 ($h=27\text{cm}$) VHS1	①	1.03	-	-	0.58	0.22
	②	0.79	0.26	0.22	0.61	0.18
	③	0.33	0.14	0.15	0.59	0.26
	④	0.29	0.14	0.15	0.52	
	MAX	1.03	0.26	0.26	0.61	0.26
模型名 ($h=30\text{cm}$) VHS2	①	0.90	0.77	0.75	0.50	
	②	0.70	0.21	0.17	0.61	
	③	0.28	0.11	0.14	0.61	
	④	0.21	0.11	0.14	0.65	
	MAX	0.90	0.77	0.75	0.65	

(5) まとめ

- ① 全水平力は堤体天端高が静水面と一致したとき合田波力式の0.6倍以下であり，堤体天端高が静水面より露出したとき0.5～0.8倍とやや大きくなる。
- ② 全水平力は前面鉛直スリットに働く部材波力の合力にほぼ一致する。
- ③ 鉛直スリット前壁と水平スリット部材の最大波力は前面水位が最高のときにほぼ同時に発生する。また，その他の部材の最大波力は約0.15 s 遅れて発生する。
- ④ 鉛直スリット前壁最上段と2段目，中間壁，後壁の最上段の部材には大きな波力が作用する。
- ⑤ 水平スリット壁の全ての部材には底版に比べて大きな揚圧力が作用する。
- ⑥ 部材波力は H'/h が1.0以上の碎波が作用するときに大きい。

3.5 まとめ

ここでは各構造物ごとの全波力および部材波力の特性に基づき，構造タイプによる波力特性の違いについてまとめる。波力実験から得られた全波力の平均値および部材波力の最大値を表3.12に示し，以下に全波力，部材波力に分けて述べる。

3.5.1 全波力

(1) 全水平波力

表3.12に示した高潮位条件での無次元平均水平波力強度 f_x/w_0H' の値より，各タイプ別に平均値を求めると，スリット型では0.57，水平板付スリット型では0.37，透過水平板付スリット型では0.42となり，スリット型，透過水平板付スリット型，水平板付スリット型の順で f_x/w_0H' が小さくなっている。これは，全水平波力の値が鉛直スリットの空隙率 ϵ_v の値に関係しているためである。複数の鉛直スリットの空隙率の平均値は，スリット型では0.2，透過水平板付スリット型では0.26，水平板付スリット型では0.37であり，この順で f_x/w_0H' は小さくなる。表中括弧内に示した数値は，低潮位の平均水平波力強度の値であるが，スリット型を除く構造タイプについては低潮位の平均水平波力強度が高潮位のものよりも若干大きくなる傾向がある。

(2) 全鉛直波力

無次元平均鉛直波力強度 f_z/w_0H' は，水平板あるいは底版を有する構造タイプの方が，水平板も底版も有しない構造タイプに比べて大きくなる。表3.12より，水平板も底版も有しないSL1では $f_z/w_0H'=0.07$ と他の構造タイプに比べて小さい。これに対して底版のみを有するSL2では $f_z/w_0H'=0.20$ とやや大きくなる。また，水平板付スリット型および透過水平板付スリット型では $f_z/w_0H'=0.21\sim0.45$ である。なお，高潮位と低潮位の場合を比較するとスリット型は変化しないが，水平板付スリット型では低潮位の方が減少する傾向がある。

表3.12：波力実験結果一覧表

相互比較項目		スリット型		水平板付スリット			透過水平板付スリット型		
		SL1	SL2	PLS1	PLS2	PLS3	VHS1	VHS2	VHS3
構造物形状寸法	構造物幅： B/h	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0
	天端高： h_1/h	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0	0	0
	吃水比： h_2/h	0.8	1.0	1.0	1.0	0.8	1.0	0.8	1.0
	鉛直スリット枚数： N	3	3	3	2	3	3	3	3
	空隙率： ϵ_V1	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.26	0.26	0.26
	： ϵ_V2	0.2	0.2	0.4	—	0.25	0.26	0.26	0.26
	： ϵ_V3	0.1	0.1	0.4	0.4	0.25	0.26	0.26	0.26
水平板空隙間底版	水平板空隙間： ϵ_H	—	—	0.1	0.1	0.2	0.16	0.16	0.16
	底版	無	有	無	無	無	有	有	無
全波力（平均値）	無波次元力								
	f_x/w_0H	0.56	0.57(0.56)	0.39(0.41)	0.33	0.40(0.44)	0.46(0.53)	0.36	0.44
	f_z/w_0H	0.07	0.20(0.20)	0.45(0.38)	0.44	0.24(0.21)	0.41(0.43)	0.30	0.41
	位相								
	f_x'/f_x	0.59	0.75(0.72)	0.47(0.65)	0.46	0.61(0.71)	0.63(0.74)	0.69	0.53
波減力係数	f_z'/f_z	0.52	0.69(0.72)	0.31(0.48)	0.21	0.34(0.39)	0.53(0.55)	0.49	0.34
	$\lambda (=f_x/f_{GX})$	0.61	0.63(0.63)	0.43(0.44)	0.37	0.43(0.47)	0.51(0.60)	0.52	0.48
部材波力（最大値） $\left[\frac{P}{w_0H} \right]$	1枚目スリット（FS）	1.30	2.71(2.90)	1.51(1.08)	1.13	1.09(1.32)	0.91(1.03)	0.90	—
	2枚目スリット（HS）	1.02	1.23(0.92)	—	—	1.50(1.55)	0.94	0.77	—
	3枚目スリット（BS）	0.63	0.95(0.68)	1.38(1.15)	1.18	1.39(1.25)	0.87	0.75	—
	水平板（US）	—	—	0.89(0.74)	0.78	0.55(0.46)	0.87(0.61)	0.65	—
	底版（DP）	—	0.78(0.72)	—	—	—	0.35(0.26)	—	—

注）（ ）内の数値は、低潮位の実験結果を示す。

(3) 位相

f_x'/f_x および f_z'/f_z の値は、全水平波力と全鉛直波力の位相のずれを代表する数値と考えられる。表3.12より、どの構造タイプについても f_x'/f_x および f_z'/f_z の平均値は1.0より小さくなっており、全水平波力と全鉛直波力との位相のずれがみとめられるようであるが、実験結果で示したようにデータのばらつきが大きいので詳細な検討はできない。

(4) 波力低減係数

表3.12より、全水平波力の測定値と計算値との比 f_x/f_{GX} は、鉛直スリットの平均的な空隙率 ϵ_v が大きくなるに従い小さくなる。各構造タイプ別に高潮位条件に対する平均値を計算すると、スリット型（ $\epsilon_v=0.2$ ）では $f_x/f_{GX}=0.62$ 、透過水平板付スリット型（ $\epsilon_v=0.26$ ）では $f_x/f_{GX}=0.50$ 、水平板付スリット型（ $\epsilon_v=0.37$ ）では $f_x/f_{GX}=0.41$ である。また、どの構造タイプについても、低潮位条件の f_x/f_{GX} の値は高潮位条件の値より若干大きくなる傾向にある。

3.5.2 部材波力

どの構造タイプについても、静水面上の部材波力は水中の部材波力に比べてかなり大きい。各構造タイプについて静水面付近の部材に作用する部材波力を表3.12に示す。これより、高潮位条

件で鉛直スリット部材 (F S, H S, B S) に作用する部材波力の最大値は、スリット型では $P/w_0 H' = 2.71$, 水平板付スリット型では $P/w_0 H' = 1.51$, 透過水平板付スリット型では $P/w_0 H' = 0.94$ である。また、水平板付スリット型および透過水平板付スリット型で、水平板 (U S) に作用する部材波力は $P/w_0 H' = 0.55 \sim 0.89$, スリット型および透過水平板付スリット型で、底板 (D P) に作用する部材波力は $P/w_0 H' = 0.35 \sim 0.78$ となる。

3.6 あとがき

本研究により、重複波領域から碎波領域までの広範囲の波浪条件のもとで、乱れと反射を利用した消波構造物に作用する全波力および部材波力の特性が明らかになった。ただし、これらの波力特性は室内実験により得られたものであるから、今後は現地での波力観測を行い、波力の算定法を確立する必要がある。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所海岸研究室：海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(1), 土木研究所資料, 第2454号, 173p., 1987.
- 2) 建設省土木研究所海岸研究室：海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(4), 土木研究所資料, 第2577号, 232p., 1988.
- 3) 建設省土木研究所海岸研究室：海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(3)－第1グループF.S. 調査報告書－, 土木研究資料, 第2511号, 168p., 1987.
- 4) 建設省土木研究所海岸研究室：海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(5)－皆生海岸F.S. 調査報告書－, 土木研究資料, 第2609号, 285p., 1988.
- 5) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No248, 24p., 1976.
- 6) 谷本勝利・高橋重雄・金子忠男・塩田啓介・小蔵紘一郎：円柱に働く衝撃碎波力に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第25巻, 第2号, pp.29～88, 1986.
- 7) 谷本勝利・高橋重雄・吉本靖俊：衝撃応答波形からの外力推定法について, 港湾技研資料, No474, 24p., 1983.
- 8) 合田良実・原中祐人：衝撃碎波圧に関する一実験, 港湾技研資料, No32, pp. 3～18, 1967.
- 9) 谷本勝利・小島朗史・鈴木論司：二重横スリット消波ケーソンの部材に働く波力について, 港湾技研資料, No416, pp. 3～29, 1982.

付章1 波力測定における衝撃応答に関する検討

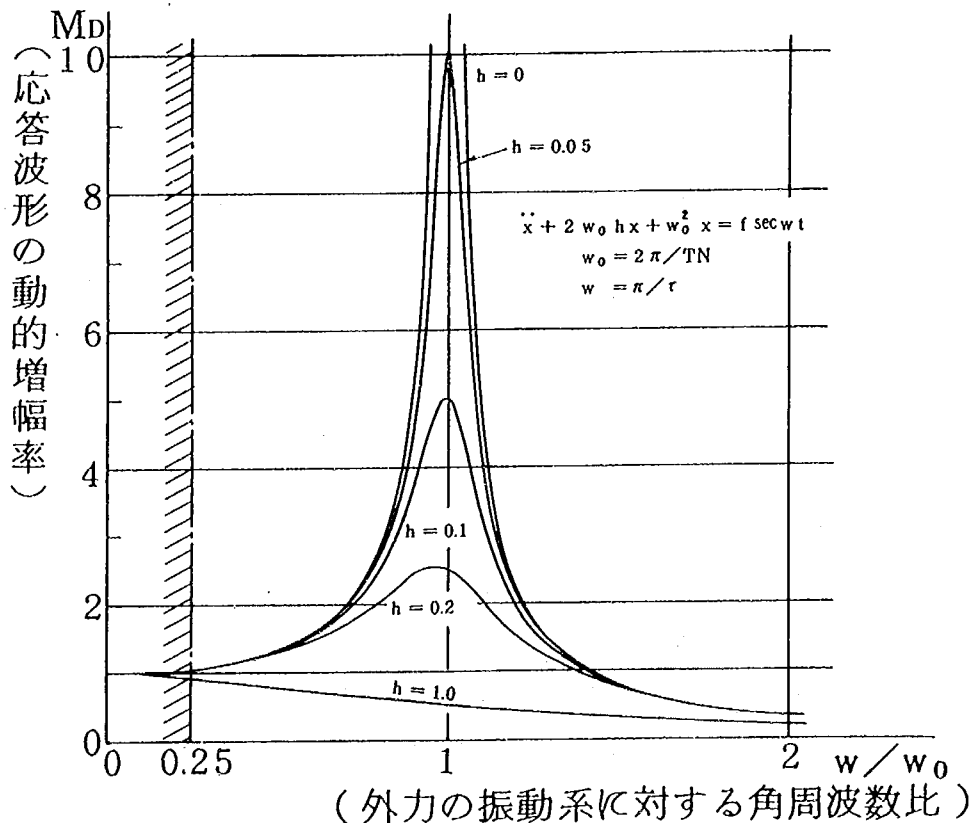
(1) カットオフ周波数による全波力の測定値の相違

動的外力を測定する場合には、測定系の動的特性に応じた衝撃応答が問題となる。測定された外力の応答波形から元の作用外力を精度よく推定する際には、次の条件下に限られることがこれまでの研究によって明らかになっている¹⁾。

$$\tau / T_N \geq 2.0 \quad (\text{付1.1})$$

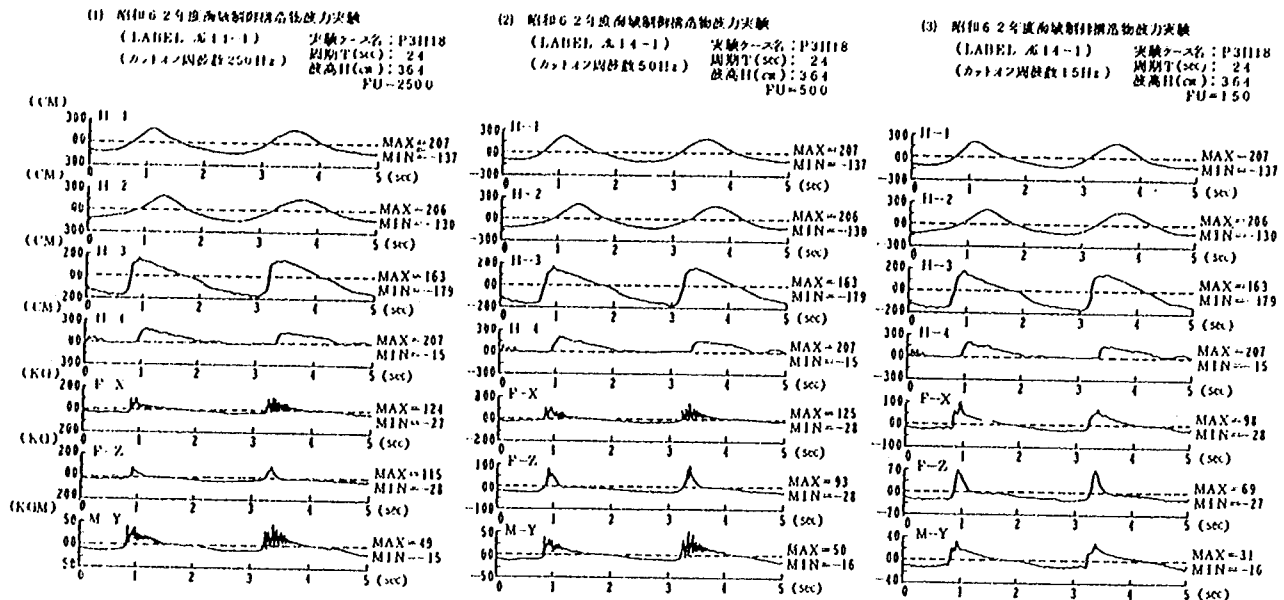
ただし、 τ ：外力の作用時間、 T_N ：固有振動周期である。

正弦的外力が作用した場合の変位応答曲線を付図1.1に示す。これは、横軸に外力の角周波数 ω と振動系の角周波数 ω_0 との比をとり、応答波形の最大値と元の波形の最大値との比 M_D 、すなわち、応答波形の増幅率を示したものである。これより、 $\omega / \omega_0 \leq 0.25$ のとき $M_D \approx 1.0$ となり、応答波形から元の外力を推定することが可能である。これと式(付1.1)の条件とは一致している。本実験では、構造物模型の固定部の固有振動数 f_M は、水中で約18Hzであり、式(付1.1)から全波力の作用時間 τ_M が約0.1s以上のものについては外力を精度よく推定できると考えられる。ただし f 、 τ については模型(Model)の意味より添字_Mをつけた。また、このとき応答波形には測定系の固有振動の影響が現れるため、約18Hz以上の成分波をカットする必要がある。



付図1.1 正弦波外力が作用した場合の変位応答曲線

堤体模型に作用する全波力の時刻歴波形の一例を付図1.2に示す。これより、 18Hz 以上の成分波をカットした場合の波形は他の2つの場合に比べて滑らかな波形が得られていることが分かる。ただし、データサンプリング時間間隔が $\Delta t = 0.002\text{s}$ であるため、分解能 f_M は 250Hz ($f_N = 1/2\Delta t$) となる。



付図1.2 カットオフ周波数による全波力の時刻歴応答波形 (PLS 3)

付表1.1: 全波力の実験結果

(PLS3, $h=30\text{cm}$, $T=2.4\text{sec}$, $H'=36.4\text{cm}$)

	カットオフ周波数		
	15Hz	50Hz	250Hz
F_x (kgf)	6.59 (1.0)	8.23 (1.25)	9.10 (1.38)
F_z (kgf)	8.17 (1.0)	9.94 (1.22)	12.92 (1.58)

上記の結果をまとめると付表1.1となる。括弧内の数値は、 15Hz で成分波をカットした場合の波力を1.0としたときの各波力の割合である。これより、カット周波数を大きくすると、波力の値は20~60%程度大きく見積もられることが分かる。 50Hz 以上をカットした場合では約20%大きくなる。

* () 内の数値: 15Hz カットの場合を1とした波力の割合

(2) カットオフ周波数による部材波力の測定値の相違

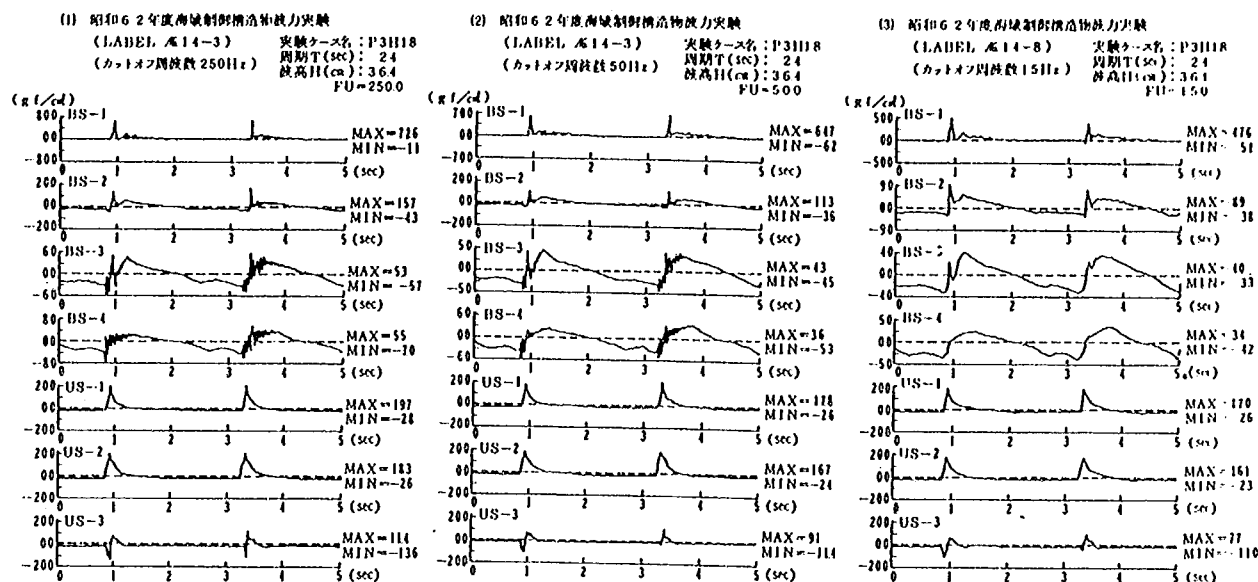
部材波力を応答波形から推定する場合の条件も全波力の場合と同様に式 (付1.1) で与えられる。本実験では、各部材の固有振動数 f_B は水中で 100Hz 程度であるから、式 (付1.1) より部材波力を精度よく推定できる範囲は、部材波力の作用時間 τ_B が約 0.02s 以上の場合に限られる。

次に、部材の固有振動の影響を取り除くための最適なカットオフ周波数は、文献1)より固有振動数の約55%とするのが適当であることが示されている。これより、本実験結果から部材

波力を求める場合には 50Hz の成分波をカットするのが適当であると考えられる。

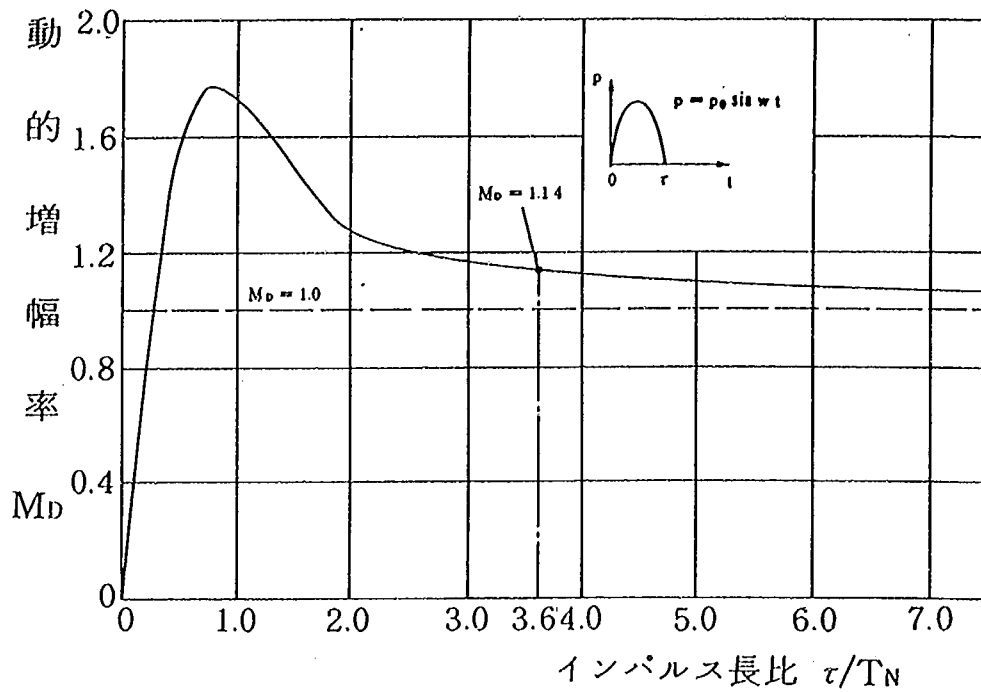
部材波力の測定結果の一例を付図1.3に示す。ただし、カットオフ周波数をそれぞれ 250Hz 、 50Hz 、 15Hz とした結果を示した。(1)では、部材の固有振動数の影響が顕著に現れている。

次に、(2)では、BS-1、US-1、US-2、US-3の波形は滑らかになっている。ここで、部材波力の最大値を示すのはBS-1の第2波目であり、 $p = 64.7\text{gf/cm}^2$ である。このときの波力の立ち上がり部分の作用時間は $\tau \approx 0.05\text{s}$ である。BS-1の部材の水中固有振動数は測定結果より 72Hz となっており、 $\tau/T_N = 3.6$ である。

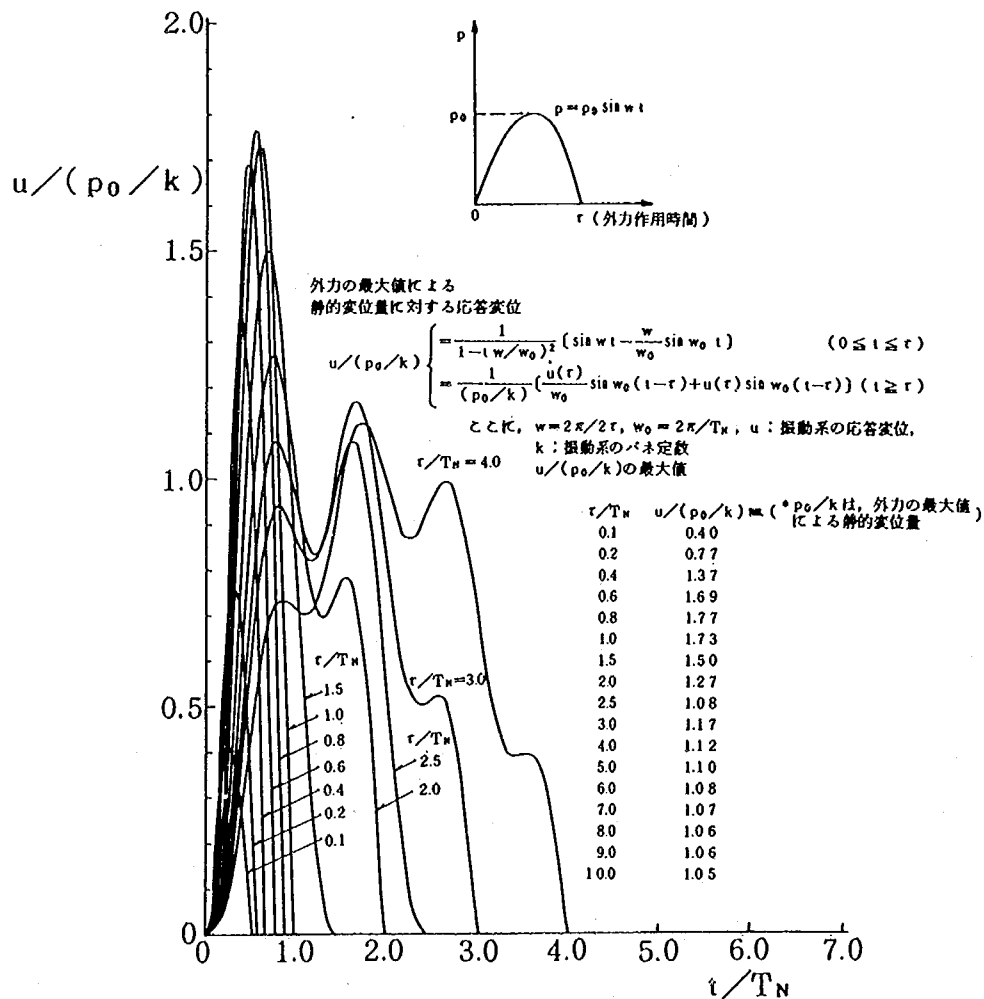


付図1.3 カットオフ周波数による部材波力の時刻歴応答波形 (PLS 3)

半正弦的外力が作用する場合の τ/T_N と動的増幅率 M_D との関係を付図1.4に示す。BS-1の部材の場合、 $\tau/T_N \geq 3.6$ であるから、付図1.4より実験で得られた応答波形の最大値は元の作用外力の波形の最大値の約1.1倍以内と考えられる。付図1.4に示した関係をさらに前述した最適なカットオフ周波数について検討するために、半正弦的外力が作用したときの応答波形の時間的变化を付図1.5に示す。これより、 $\tau/T_N \geq 2.0$ のとき応答波形には振動系の固有振動の影響が現れていることが分かる。付図1.4はこれらの最大値をプロットしたものであり、外力を推定する場合には固有振動の影響を取り除く必要がある。ここでは詳細な検討を避けるが、この場合の最適なカットオフ周波数は文献1)によれば固有振動数の約55%となる。カットオフ周波数をこのように選定すれば、動的増幅率 M_D は付図1.4に示す値よりもさらに1.0に近い値となり、精度よく外力を推定できると考えられる。



付図1.4 半正弦波外力が作用する場合の変位応答スペクトル



付図1.5 半正弦波外力が作用したときの時刻応答波形の数値計算結果

主な測点の応答波形の動的増幅率

M_D を付表1.2に示す。これらの値は、付表1.3(2)の場合について算定したものであるが、どの部材も $M_D \approx 1.0$ となる。なお、波浪条件を変化させても、カットオフ周波数を50Hzとすれば、動的増幅率 M_D はほぼ1.0となった。

カットオフ周波数をさらに小さくした場合、すなわち付図1.3(3)ではBS-1の第2波の部材波力の最大

値が47.6gf/cm²となり、元の外力の約30%低く推定されることになる。したがって、カットオフ周波数を50Hz程度に止めておくのがよいと考えられ、必要以上にカットオフ周波数を小さくすることは測定可能な条件下での外力を低く推定することになるので避けるべきである。

付表1.2：主な部材の応答波形の動的増幅率
(PLS3, h=30 cm, T=2.4sec, H'=36.4cm)

部 材	τ (sec)	τ / T_N	M_D
FS-1	0.10	7.2	1.07
HS-1	0.07	4.8	1.10
BS-1	0.05	3.6	1.15
US-1	0.20	19.3	1.03
US-2	0.25	21.9	1.02
US-3	0.10	8.4	1.06
US-4	0.10	8.6	1.06

付表1.3：部材波圧に対する測定系の固有振動の影響
(VHS3, h=30 cm, T=2.4sec, H'=36.4cm)

部 材	p / p_{fix}		
	15Hzカット	50Hzカット	250Hzカット
FS-1	0.95 (25.06/26.44)	0.99 (42.04/42.32)	1.51 (82.48/54.78)
HS-1	1.18 (2.54/2.15)	1.61 (3.75/2.33)	2.03 (5.74/2.83)
BS-1	1.39 (6.99/5.00)	1.44 (7.48/5.19)	1.03 (8.74/8.50)
US-1	1.05 (22.66/21.55)	1.06 (26.45/24.85)	0.97 (36.52/37.81)
US-2	1.06 (22.73/21.40)	0.96 (32.98/34.48)	0.94 (45.04/47.93)
US-3	1.13 (14.41/12.78)	1.25 (26.60/21.27)	1.13 (36.58/32.45)
US-4	1.38 (13.79/9.93)	1.42 (27.21/19.19)	1.03 (49.37/47.79)

* () 内数値：本実験で測定された部材波圧／剛結条件下で測定される部材波圧

(3) 模型全体の固有振動が部材波力の測定に与える影響

本研究では構造物の安定性の検討を行う必要があるため、三分力計を介して模型を固定して全波力の測定を行った。固定部には細心の注意を払ったが、測定系全体の固有振動数は約18Hzと比較的小さい。そこで、模型全体の固有振動が部材波力の測定結果に与える影響を検討する。

本実験の固定方法により測定される部材波力を p とし、下部を水路床に固定して模型全体の変位をより小さくする方法により測定される部材波力を p_{fix} とする。主要な部材について $p /$

P_{fix} の測定結果を付表1.3に示す。これより、検出される部材波力が比較的大きいときには $P/P_{fix} \approx 1.0$ となっているが、そうでない部材（HS-1, BS-1）については P/P_{fix} が1.0に比べてやや大きくなっている。これは、作用する部材波力が小さい場合に系全体の固有振動により付加的な力が作用するためと考えられる。前述した付図1.3を参照すると、検出されるべき部材波力が大きくなるほど系全体の固有振動による付加的な部材波力の割合は小さくなっていることが分かる。主に議論の対象となるのは、部材波力が大きい部材であるから、そのような部材については測定系の固有振動の影響はほぼ無視して良いと考えるのが妥当である。ただし、部材波力が比較的小さい場合には、カットオフ周波数を 50Hz としても約50%大きく見積もられることに注意しておく必要がある。

以上の検討から、本実験のデータ整理では解析対象は部材波力に関するものが合力に関するものより圧倒的に多いことも考慮し、全ての測点についてカットオフ周波数を 50Hz とした。なお、本来合力の測定データの解析では、カットオフ周波数を 15Hz 程度とするのが妥当であるが、 50Hz のカットオフ周波数を用いても問題はないと考えられる。

(4) まとめ

以下に本実験の衝撃応答に関する検討より得られた主要な結論をまとめる。

- ① 本研究で波力を精度よく測定できる範囲は、全波力について $\tau \geq 0.1\text{s}$ 、部材波力について $\tau \geq 0.02\text{s}$ と考えられる。
- ② 実験結果の解析においては、カットオフ周波数を 50Hz 程度とするのが適当である。これにより、対象とする波力を比較的良好な精度で推定できる。なお、このときの動的増幅率は約1.1である。
- ③ 部材波力が比較的小さい場合には模型全体の固有振動の影響により約50%大きめに部材波力を見積もることになるが、主要な部材についてはその影響はほぼ無視できる。

参考文献

- 1) 谷本勝利・高橋重雄・吉本靖俊：衝撃応答波形からの外力推定法について，港湾技研資料，No474，24p.，1983.

付章2 合田式中の係数 α_2 について

合田式中の係数 α_2 は次式で表され、一般に波圧強度に対するマウンドの効果を表す係数として知られている¹⁾。

$$\alpha_2 = \min \left[\frac{h_b - d}{3 h_b} \left\{ \frac{H_D}{d} \right\}^2, \frac{2d}{H_0} \right] \quad (\text{付2.1})$$

$$\text{ここに, } h_b = h + 5.0 H_{1/3} \tan \theta \quad (\text{付2.2})$$

h : 構造物設置水深

$H_{1/3}$: 有義波高

d : マウンド上の水深

H_D : 最高波の波高であり、構造物が碎波帯より沖側に位置する場合は構造物設置水深での最大波高、岸側にあつては水深 h_b での最大波高

一方、港湾の施設の技術上の基準・同解説の参考文献に挙げられている合田の論文によれば、 α_2 は碎波する場合の衝撃碎波圧を間接的に取り入れたもので、急勾配斜面上ではたとえマウンド厚が薄くとも強い碎波圧が生ずることに対しては、係数 α_2 を考慮することによりその傾向を表すことができると説明している²⁾。したがって、碎波条件の実験結果より波力の増大が認められる場合には係数 α_2 を考慮して合田式による波力を計算するのが妥当であると判断される。

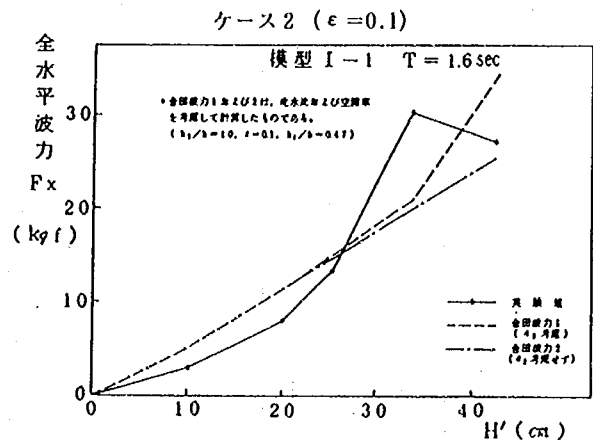
本研究では、土研の実験結果に碎波条件下での波力の増大が認められる（付図2.1）。また、共同研究第1グループの実験結果にも若干波力の増大が認められるようである。共同研究第1グループの実験結果に対して、土研の実験結果でこのようになり波力の増大が認められるのは、土研の使用した模型の天端高 h_1 がG1の模型の h_1 に比べて大きく、静水面上の部材に作用する強い碎波圧の影響を受けるためと考えられる。いずれ

にしても、両者の碎波条件下での実験結果に波力の増大が認められるので、本研究では合田式による波力の計算を行う場合に α_2 を考慮することとする。

本研究では、研究対象構造物がマウンドを有しないことと実験では規則波を用いていることなどの理由から α_2 を求める場合に式（付2.1）および式（付2.2）をそのまま適用することはできないが、各変数の特性を考慮することにより以下のように計算することができる。

① 波高 H_D

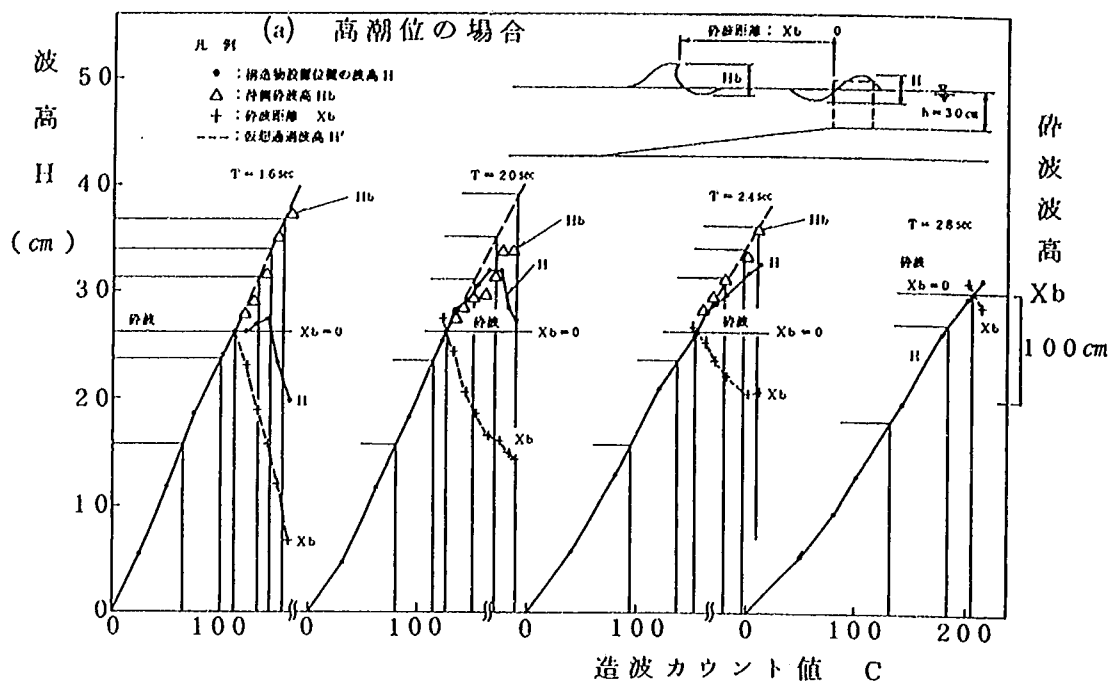
波高の検定結果を付図2.2, 2.3に示す。ここ



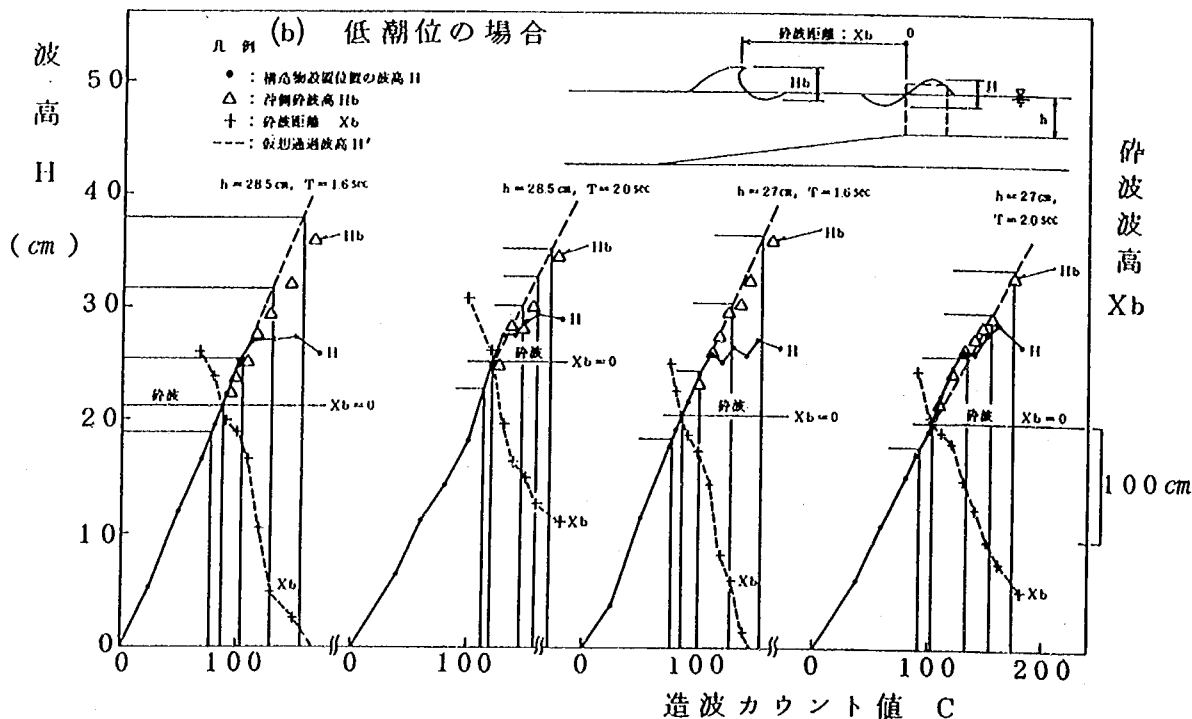
付図2.1 土木研究所の波力実験結果

(ケース2, $h=30\text{cm}$, $T=1.6\text{sec}$)

に、仮想通過波高 H' とは非碎波条件における波高 H とカウント値 C の関係を直線的に伸ばしたもので、非碎波条件では模型設置位置での波高、碎波条件では沖側碎波波高 H_b に相当する波高と考えられる³⁾。実験に用いる波浪条件に対する最高波高 H_D はこの仮想通過波高 H' にほぼ等しいと考えられるので、各カウント値 C に対する仮想通過波高 H' を図より求めて式 (付2.1) の H_D に代入する。



付図2.2 波高の検定結果 (高潮位の場合)



付図2.3 波高の検定結果 (低潮位の場合)

② 砕波水深 h_b

波高の検定の際、模型前面から沖側砕波位置までの距離 X_b を測定しており、その結果は前出の付図2.2, 2.3に示されている。実験に用いる波浪条件における砕波水深を h' 、砕波距離を X' とし、 X_b とカウント値 C の関係より内挿して X' を求め、次式により h' を算定する。

$$h' = h + X' \tan \theta \quad (\text{付2.3})$$

α_2 の計算のための h_b は式 (付2.2) からは直接求められないが、砕波条件における最高波高 H_D を算定する際の水深に対応すべきものであるから、この h' を式 (付2.1) の h_b に代入する。なお、非砕波条件の場合は $h' = h$ となる。

③ マウンド上の水深 d

実験対象となっている構造物はマウンドを有しないため、マウンド厚は 0 となり、 $d = h$ となる。

④ $2d/H_D$ について

この項は式 (付2.1) の第 2 項であり、この計算を行っても $2d/H_D > 1.5$ となるのに対して第 1 項は 1 オーダ小さな値なので、明らかに式 (付2.1) の第 1 項から α_2 が求まること分かる。

⑤ α_2 の算定式

以上の検討から、 α_2 は式 (付2.1) の各変数を書き換えることによって次式で算定される。

$$\alpha_2 = \frac{h' - h}{3 h'} \left\{ \frac{H'}{h} \right\}^2 \quad (\text{付2.4})$$

付表2.1: α_2 の計算結果

h = 30 cm						h = 28.5 cm						h = 27 cm					
No.	T(s)	H'(cm)	X'(cm)	h'(cm)	α_2	No.	T(s)	H'(cm)	X'(cm)	h'(cm)	α_2	No.	T(s)	H'(cm)	X'(cm)	h'(cm)	α_2
1	1.6	15.6	—	—	—	1	1.6	18.9	—	—	—	1	1.6	18.0	—	—	—
2		23.4	—	—	—	2		21.0	—	—	—	2		20.0	—	—	—
3		26.0	—	—	—	3		25.2	31	31.6	0.03	3		24.0	34	30.4	0.03
4		31.2	74	37.4	0.07	4		31.5	160	44.5	0.15	4		30.0	138	40.8	0.14
5		33.8	112	41.2	0.12	5		37.8	193	47.8	0.24	5		36.0	210	48.0	0.26
6		36.4	164	46.4	0.17												
7	2.0	15.6	—	—	—	6	2.0	22.5	—	—	—	6	2.0	17.6	—	—	—
8		23.4	—	—	—	7		25.0	—	—	—	7		19.6	—	—	—
9		26.0	—	—	—	8		30.0	94	37.9	0.09	8		25.5	56	32.6	0.05
10		31.2	72	37.2	0.07	9		32.5	118	40.3	0.13	9		29.4	106	37.6	0.11
11		35.1	100	40.0	0.11	10		35.0	131	41.6	0.16	10		33.3	136	40.6	0.17
12		39.0	119	41.9	0.16												
13	2.4	15.6	—	—	—												
14		23.4	—	—	—												
15		26.0	—	—	—												
16		31.2	41	34.1	0.04												
17		33.8	54	35.4	0.06												
18		36.4	56	35.6	0.08												
19	2.8	18.0	—	—	—												
20		27.0	—	—	—												
21		30.0	—	—	—												

式 (付2.4) の各数値を波高検定結果 (付図2.2および2.3) より読み取った値及び α_2 の小数点以下第2位までの計算結果を付表2.1に示す。

参考文献

- 1) 社団法人 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1979.
- 2) 合田良実：防波堤の設計波圧に関する研究，港湾技術研究所報告，第12巻，第3号，pp. 31～69，1973.
- 3) 谷本勝利・高橋重雄・金子忠男・塩田啓介・小藏紘一郎：円柱に働く衝撃碎波力に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第25巻，第2号，pp. 29～87，1986.

記号一覧

B	: 構造物の岸沖方向の幅 (cm)
D	: 構造物の法線方向の幅 (cm)
ϵ	: 構造物のスリット壁の空隙率
h_1	: 構造物の天端高 (cm)
h_2	: 構造物の吃水深 (cm)
h	: 水深 (構造物設置水深) (cm)
H	: 入射波高 (構造物設置水深) (cm)
H_o	: 換算沖波波高 (cm)
H_b	: 碎波波高 (測定値) (cm)
H_{bo}	: 構造物設置位置での碎波波高 (測定値) (cm)
h_b	: 碎波水深 (測定値) (cm)
X_b	: 構造物前面から沖側碎波位置までの距離 (測定値) (cm)
H'	: 仮想通過波高 (cm)
h'	: 碎波水深 (代表値) (cm)
X'	: 構造物前面から沖側碎波位置までの距離 (計算値) (cm)
T	: 波の周期 (cm)
L	: 波長 (構造物設置水深) (cm)
L_o	: 波長 (沖波) (cm)
η_1	: 構造物前面 (沖側) の水位 (cm)
η_2	: 構造物後面 (岸側) の水位 (cm)
F_x	: 全水平波力 (測定値) (gf)
F_z	: 全鉛直波力 (測定値) (gf)
$F_{x'}$	: 全鉛直波力最大時の全水平波力 (測定値) (gf)
$F_{z'}$	: 全水平波力最大時の全鉛直波力 (測定値) (gf)
f_x	: 平均水平波力強度 (gf/cm ²) $f_x = F_x / [D (h_1 + h_2)]$
f_z	: 平均鉛直波力強度 (gf/cm ²) $f_z = F_z / [B D]$
$f_{x'}$	: 全鉛直波力最大時の平均水平波力強度 (gf/cm ²) $f_{x'} = F_{x'} / [D (h_1 + h_2)]$
$f_{z'}$	: 全水平波力最大時の平均鉛直波力強度 (gf/cm ²) $f_{z'} = F_{z'} / [B D]$

F_{GX} : 合田式による全水平波力 (gf)

F_{GZ} : 〃 全鉛直波力 (gf)

f_{GX} : 〃 平均水平波力強度 (gf/cm²)

$$f_{GX} = F_{GX} / [D (h_1 + h_2)]$$

f_{GZ} : 〃 平均鉛直波力強度 (gf/cm²)

$$f_{GZ} = F_{GZ} / [B D]$$

λ : 合田波力に対する波力の低減係数

P : 波力強度 (gf/cm²)

ただし, $P = P_{down} - P_{up}$ における P_{down} および P_{up} などは波圧と呼ぶ。

第4章 スリット式構造物に作用する 波力に関する実験（土木研究所）

建設省土木研究所構造研究室	室	長	横山	功一
	研	究	井上	純三
			伊関	英彦
海岸研究室	室	長	宇多	高明
	研	究	村井	禎美
			山本	幸次
			館	克彦
			部外研究員	

表4. 1 実験ケース

模 型 ケース	スリット 枚数	空隙率	天端高 hc (cm)	スリット 間隔 (cm)	スリット 形状
1	1	0	14	—	横
2	1	0.1	14	—	横
3	1	0.2	14	—	横
4	1	0.3	14	—	横
5	1	0.4	14	—	横
6	1	0.2	27	—	横
7	2	0.2	14	41.0	横
8	3	0.2	14	20.5	横
9	1	0.2	14	—	縦

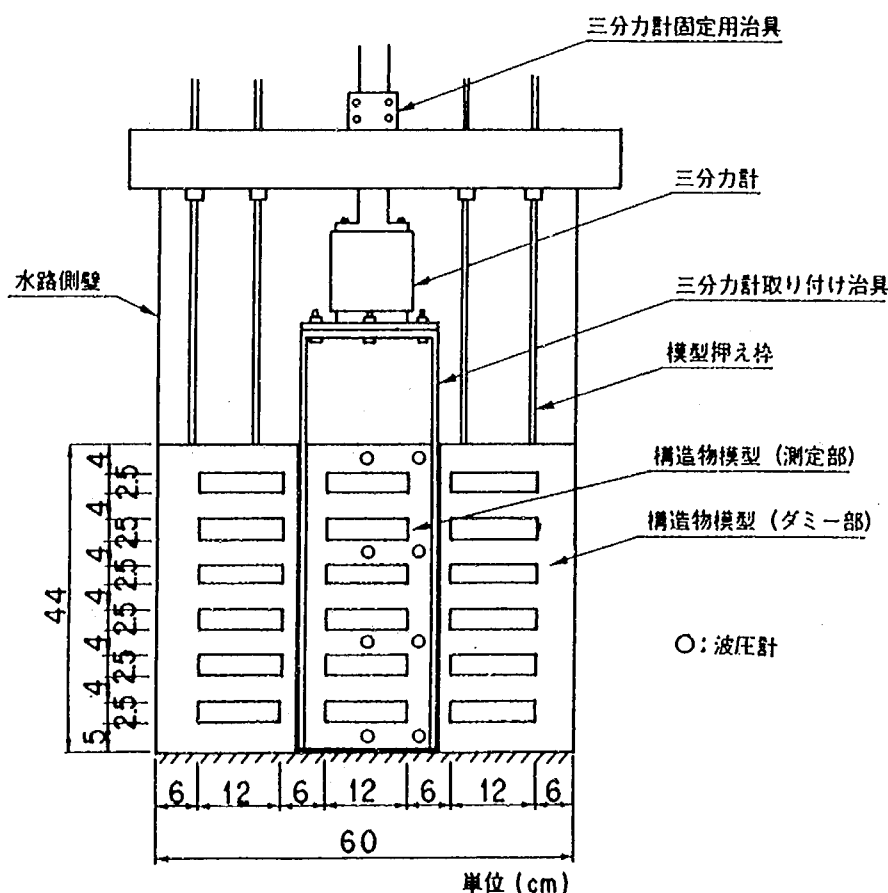


図4.2 模型設置状況

波高は容量式波高計により測定した（図4.1参照）。波高計①，②で計測した水位変動から入射波高と反射波高を，波高計⑥，⑦で計測した水位変動から透過波高を算出し，これらより反射率，透過率を計算した。また波高計③により碎波波高を，波高計④，⑤により模型直前（沖側），直後（岸側）の波高を測定した。波力に関しては，三分力計を取り付け治具により固定し，測定部全体に作用する水平波力（ F_x ）と鉛直波力（ F_z ）を測定した。使用した三分力計の許容荷重は50kgfである。また，500gf/cm²，200gf/cm²の波圧計を柱部材，スリット部材の表裏に取り付けた。測点は模型天端，静水面，底面に各1点，および静水面と底面の中間に1点配置した。

測定システムを図4.3に示す。波高計，動ひずみアンプからの出力はデジタルデータレコーダにより収録し，さらに主要な測点についてはペン書きレコーダを用いてリアルタイムで出力させた。

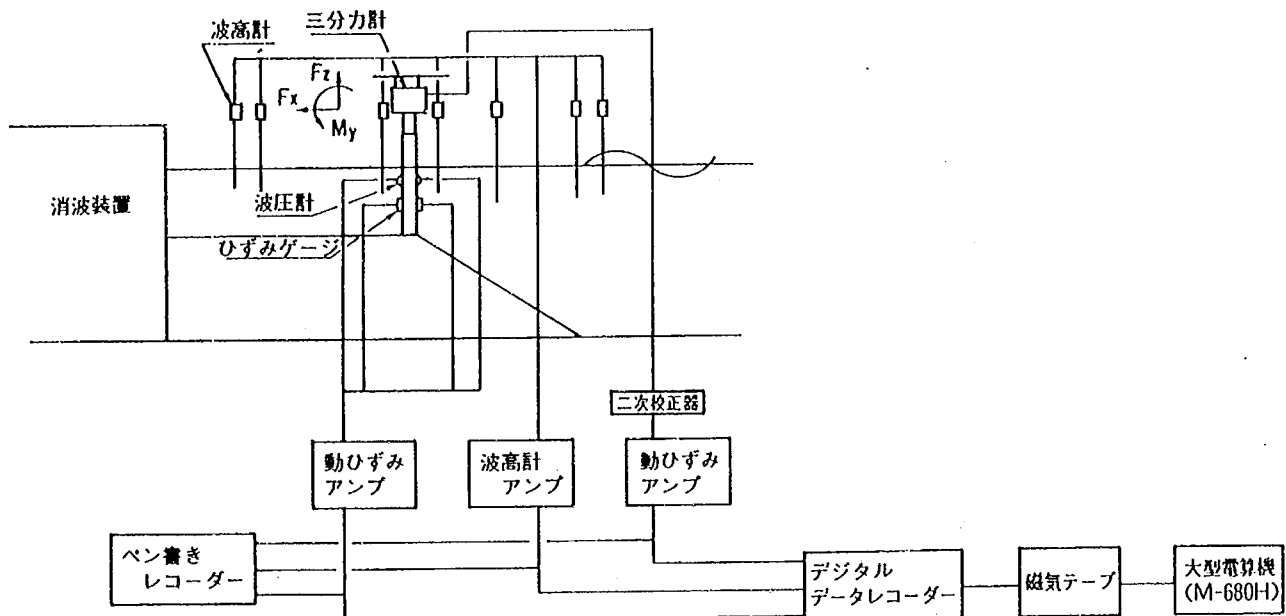


図4.3 測定システム

実験フローを図4.4に示す。波力測定は模型設置位置で安定した波形が得られる時点から始め，約20秒間データを収録した。サンプリング間隔は，作用時間が極端に短い衝撃波力を測定するためにできるだけ短くする必要がある。今回の実験ではデータ収録容量の制約上，2msとした。解析対象とする波は，データ収録開始時から消波装置の反射波の影響が入らない間に測定された波（有効波）とした。設定周期と有効波の波数の関係を表4.2に示す。

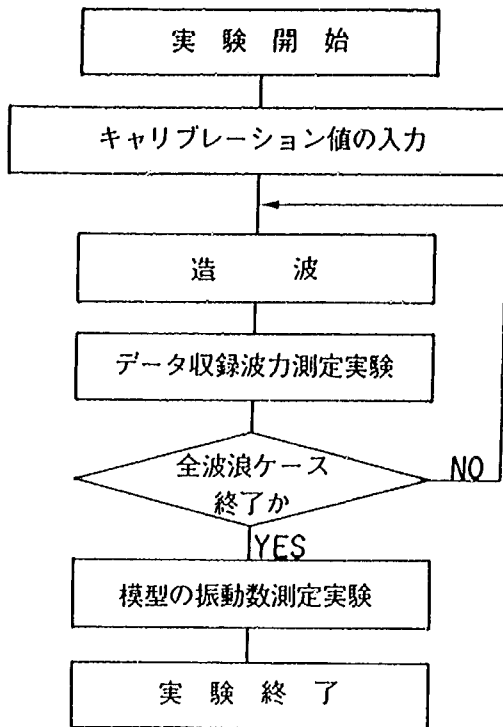


図4.4 実験フロー

模型位置における波浪検定結果の1例 ($T=1.6s$) を図4.5に示す。縦軸は模型位置における波高 H ，模型位置から碎波位置までの水平距離 X_b であり，横軸はストロークの設定値 e である。重複波領域の H は e にほぼ正比例する。しかし， $e=110$ 付近で碎波が生じ，それ以上 e が増加しても H はあまり増加せず，さらに e を大きくすると H は減少する。これは，碎波位置 X_b が波高の増加に従って沖へ移動し，碎波後の波が模型位置に到達するからである。また，この時の碎波波高 H_b と e の関係は重複波領域における H と e の関係とほぼ同じである。そこで，実験データの整理にあたっては，碎波以前の波については検定時の波高 H をそのまま用い，碎波後の波については碎波以前の H と e の正比例の関係を外挿して求めた仮想通過波高 H' を用いることにする。

表4.2 設定周期と有効波数との関係

設定周期 (s)	有効波数
1.6	11
2.0	8
2.2	7
2.6	6

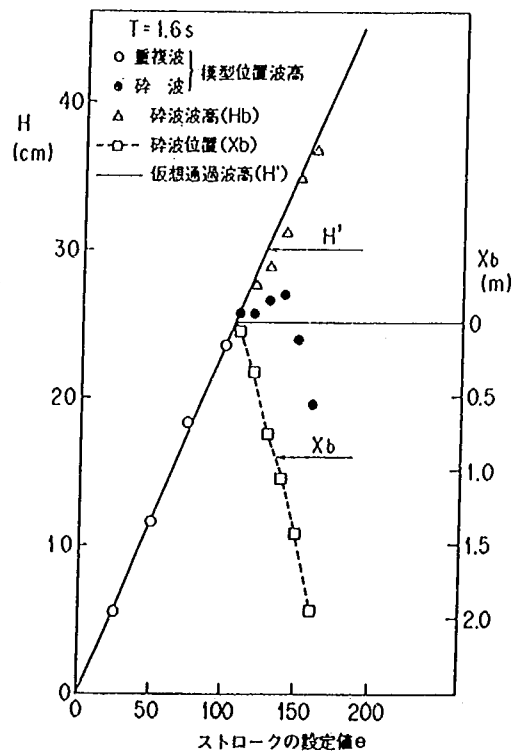


図4.5 波浪検定結果

重複波作用時の入射波高は，10，20cmの2ケースとした。また波浪検定時に模型位置で碎波が作用する場合の入射波高として25.2cm ($T=1.6s$)，25.7cm ($T=2.0s$)，26.4cm ($T=2.2s$)の3ケースを選んだ。また，各周期において最大波力の作用する場合と，それより H' を大きくし，

波力が減少する場合についても実験した。

衝撃的な波力は作用時間が短く、かつ重複波の波力と比較して作用する力が大きい。そのため衝撃力の測定は測定系の振動を問題としなければならない。つまり、測定系が外力に対して応答しなかったり、共振を起こしたりすると真の外力を測定することにはならず、この場合データの取り扱いが問題となる。今回の実験では、電算処理時にローパスフィルターを用いて測定系の振動による影響を取り除いた。そのため振動数測定実験では模型の振動特性を調べるために水中において模型を打撃した。得られた振動波形データを用いてスペクトル解析を行い、模型の固有振動数を調べた（表4.3）。この固有振動数を参考とし、振動による影響をカットするようにフィルター値を定めた。また波圧に関しても全体力と対応させるため、同じフィルター値を用いた。

表4.3 模型別水中固有振動数

C A S E	水中固有振動数 (Hz)
1	14.8
2	16.5
3	20.9
4	19.7
5	19.7
6	17.5
7	18.2
8	14.9
9	13.7

4.3 実験結果

4.3.1 波力に及ぼす波浪条件の影響

ケース3における1波ごとの最大水平波力 $F_{x\max}$ と仮想通過波高 H' の関係を図4.6に示す。重複波の作用する場合には、波高が高いほど、また周期が長いほど波力が増大する。 $T=2.0, 2.2$ s の場合には、それぞれ $H'=36.7, 35.0$ cm の波浪条件で $F_{x\max}$ は極大となる。両波浪条件とも模型に巻波砕波が作用する場合である。また、 H' が最大波力を生じさせる波高より高くなると、模型に砕波後の波が作用するため波力は低減する傾向を示す。更に、砕波作用時の方がデータのばらつきは小さい。

最大水平波力 ($F_{x\max}$) が砕波作用時に大きくばらつく原因は、模型沖側の水位波形 (η)、水位の時間変化割合 ($d\eta/dt$) 及び水平波力 (F_x) の時刻歴より説明できる (図4.7参照)。重複波の作用する $H'=20$ cm の場合と、砕波の作用する $H'=36.7$ cm の場合とを比較する

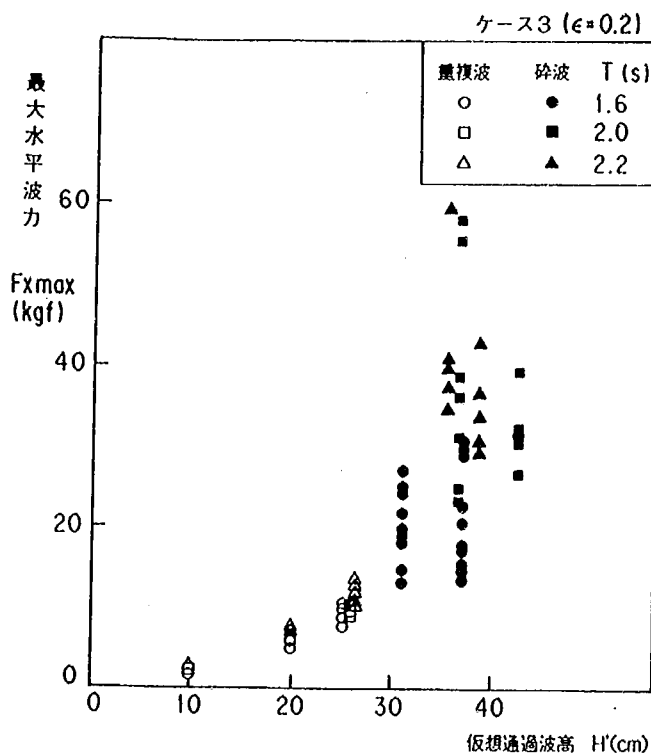
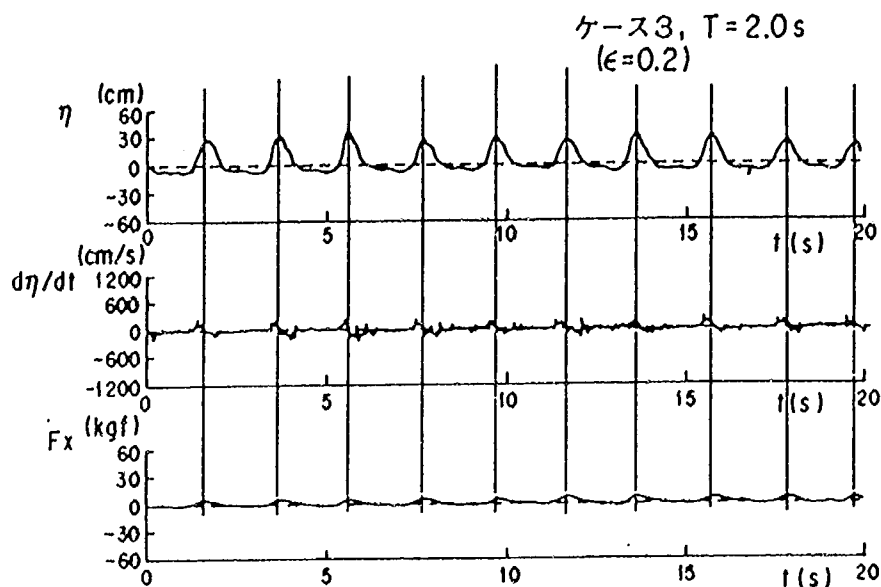
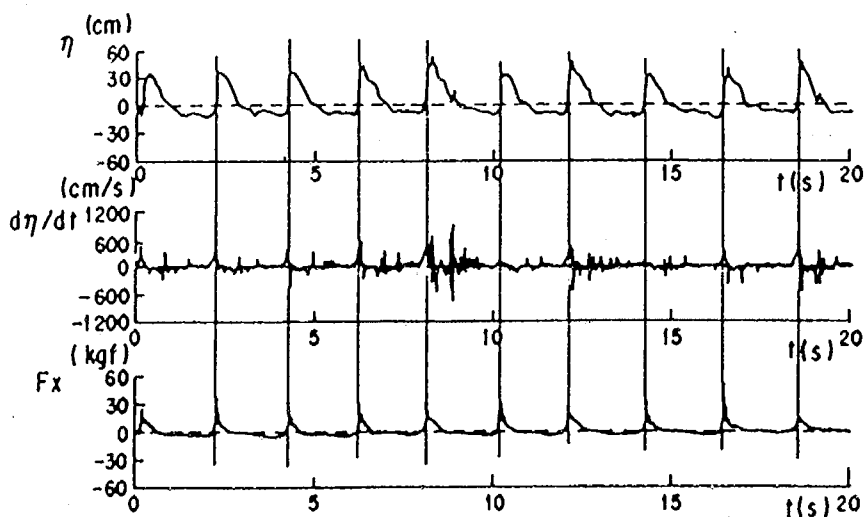


図4.6 $F_{x\max}$ と H' の関係

と、後者の場合、 $d\eta/dt$ が大きく、パルス状の衝撃力が生じたことが分かる。さらに、目視による観察では、衝撃力作用時には、模型に巻波砕波が作用しており、また巻波砕波の形状や砕波位置は1波ごとによりかなり変化した。そのため波力の最大値が大きくばらついたと考えられる。



(a) 重複波 ($H'=20\text{cm}$)



(b) 最大波力の作用する場合 ($H'=36.7\text{cm}$)

図4.7 模型沖側水位 (η), 水位の時間変化割合 ($d\eta/dt$)
および水平波力 (F_x) の時刻歴

以上のように、データにはかなりのばらつきがあるので、以下では1波ごとの最大水平波力の平均値 $\bar{F}_{x_{max}}$ を用いて検討を行った。

4.3.2 波力に及ぼす構造諸元の影響

(1) 空隙率と最大波力の関係

各ケースの H' と $\bar{F}_{Xmax}$ の関係を図4.8に示す。

ケース1で砕波が作用する場合は、三分力計の容量を越える波力が発生したためデータは取得できなかった。ケース1～5の順に ϵ は0から0.1間隔で0.4まで増加する。このことを考慮して図4.8を参照すると、 ϵ が増加するほど水平波力が低減することが分かる。次に、ケース1に対する水平波力の相対割合を知るためにケース1を基準としたときの各ケースの水平波力比と H' の関係を図4.9に示した。各ケースの波力比は、周期には依存せず、仮想通過波高が高いほど大きくなる。すなわち、波力に対し波の非線形効果の影響が表われている。更に、波力比は ϵ の増加に従い空隙率相当分以上の低減を示す。この原因として、 ϵ の増加に伴い模型岸側、沖側の水位差が小さくなることや、スリット付近での渦の形成に起因した圧力状況が変化することなどが挙げられる。

次に、最大の水平波力 F_X が生ずるケースの波圧分布について考察する。水平波力 F_X と模型前面スリットに作用する波圧 P の時刻歴の1例を図4.10に示す。各波圧計の位置は静水面上12, 0, -12.5, -27.45cmである。巻波砕波が作用しているため静水面上12cm位置での波圧の変化が著しく、最大値が50gf/cm²と大きな衝撃波力が作用している。更に、波圧と波力の最大値の発生する時刻はほぼ同時であることが分かる。

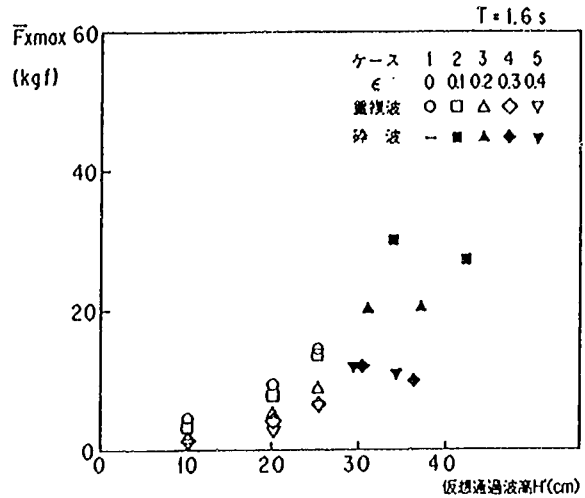


図4.8 $\bar{F}_{Xmax}$ と H' の関係

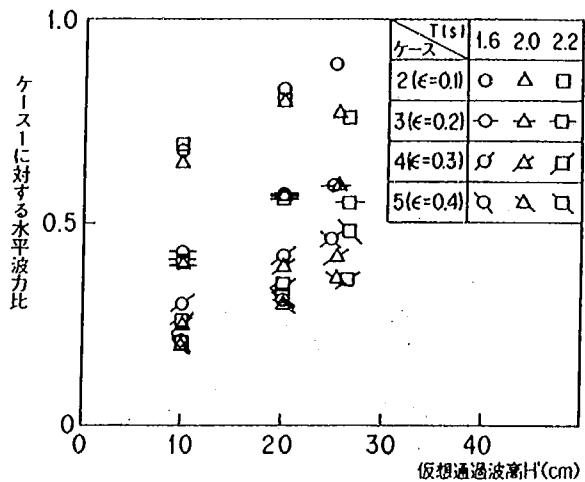


図4.9 ケース1に対するケース2～5の水平波力比と H' との関係

ケース2, $T = 1.6\text{s}$, $H' = 33.8\text{ cm}$
 $(\epsilon = 0.1)$

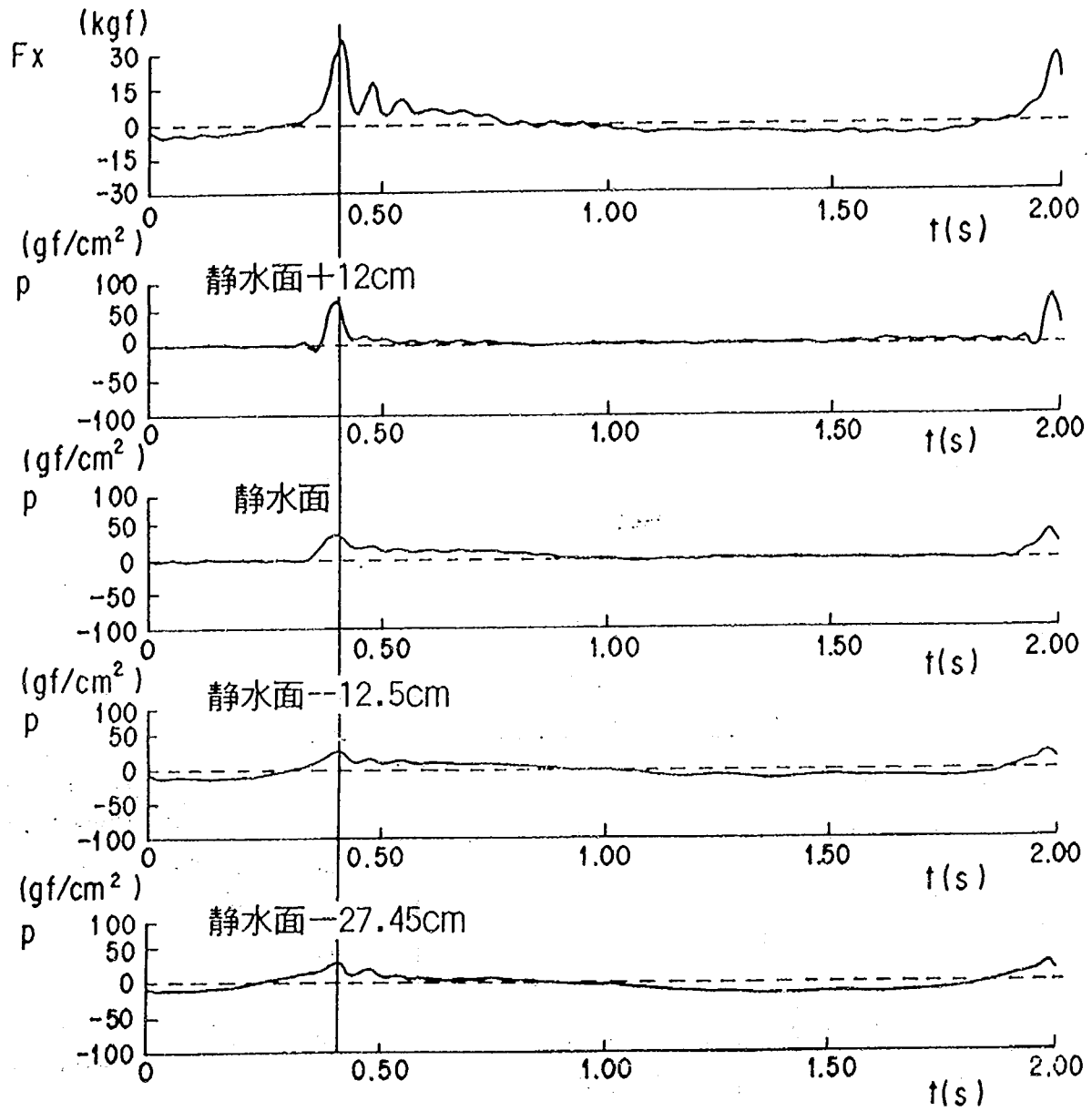


図4.10 水平波力 (F_x) と模型前面スリット部に作用する波圧 (p) の時刻歴

水平波力最大時における模型沖側と岸側の波圧の差圧鉛直分布をスリットと柱（幅6 cm）の場合について図4.11に示す。スリットと柱の差圧鉛直分布はほとんど変わらない。これはスリット、柱の部材がいずれも空隙により生ずる乱れの範囲内にあるため、構造による差異が表われなかったためと考えられる。重複波の作用する場合（ $H'=10, 20\text{cm}$ ），差圧は静水面付近で最大となる。この分布形は合田式による波圧分布と同様な形である。一方，碎波が作用する場合，静水面より上で差圧が最大値をとる。巻波碎波の作用する場合，碎波に伴い水塊が静水面より上の部分に衝突することが目視により観察された。この水塊の衝突が，衝撃圧を引き起こす。以上より，設計に用いる波圧分布は，重複波の作用する場合には静水面で最大値を持つ合田式と同じ形の分布形を，また巻波碎波の作用する場合には静水面より上で最大値を取り，静

水面以下で合田式と同じまたは一定値を持つ分布形を用いることが考えられる。ただし，静水面より上において部材に衝撃力が作用しているが，この外力に対して，各部材がどのように応答しているかは明らかではない。したがって各部材の応力の計算においては，衝撃力に対する応答性について検討する必要がある。

重複波の作用する場合のデータに関し，合田式による波圧分布と水平波力最大時の差圧鉛直

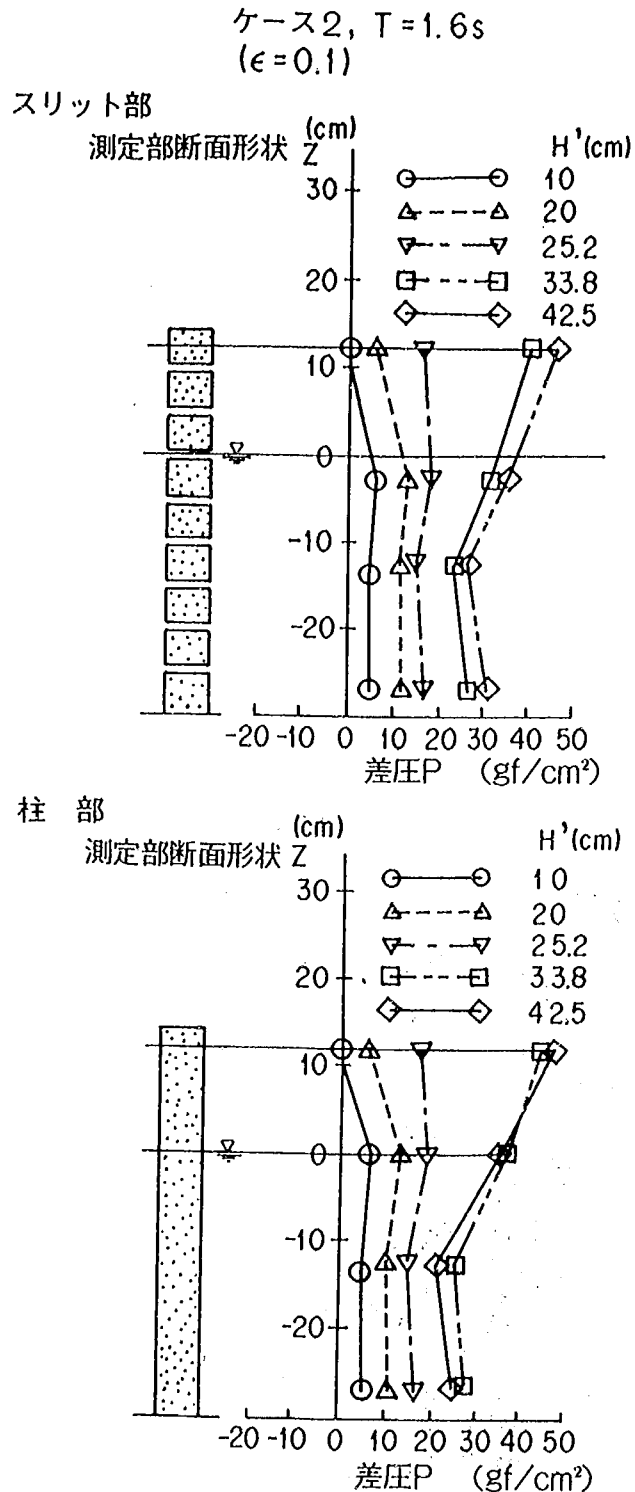


図4.11 水平波力最大時の差圧鉛直分布

分布の関係を整理した (図4.12)。波圧分布は空隙率 ϵ が変化してもいずれも静水面付近で極大値が得られている。この点は、合田式とよく一致する。また ϵ が大きくなると、差圧はほぼ単調に減少することがわかる。一方、模型位置で碎波が作用する場合について調べると (図4.13 参照)、静水面下では空隙率の増加にしたがい差圧の低減が見られるが、静水面上12cmでは、逆に空隙率が増加するほど差圧が大きくなっている。この原因はケース1, 5 ($\epsilon = 0, 0.4$) の模型沖側水位 η と静水面上12cmにおける波圧 P の時刻歴から説明できる (図4.14)。まずケース1の η の変化は緩やかで、 P は双峰型の時刻歴を示す。双峰型の時刻歴は重複波において波高の高い場合に発生する¹⁾。一方、ケース5の η の変化は急激で P には衝撃成分が卓越している。

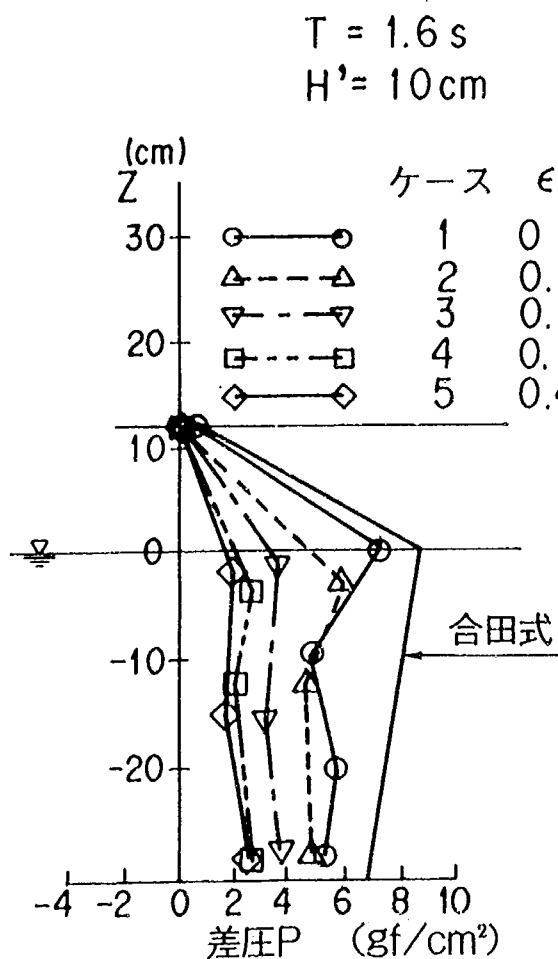


図4.12 水平波力最大時の差圧鉛直分布
(重複波の作用する場合)

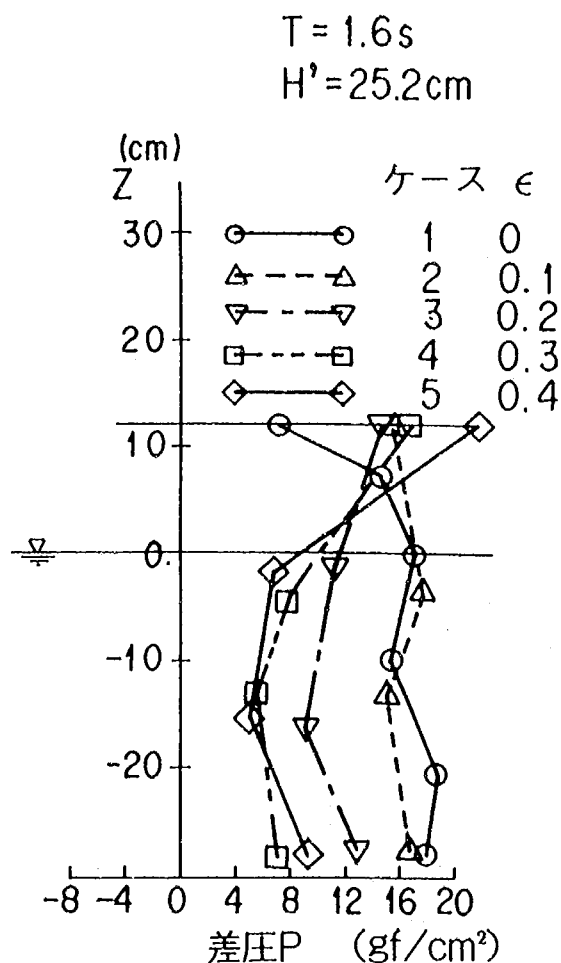


図4.13 水平波力最大時の差圧鉛直分布
(模型位置で碎波する場合)

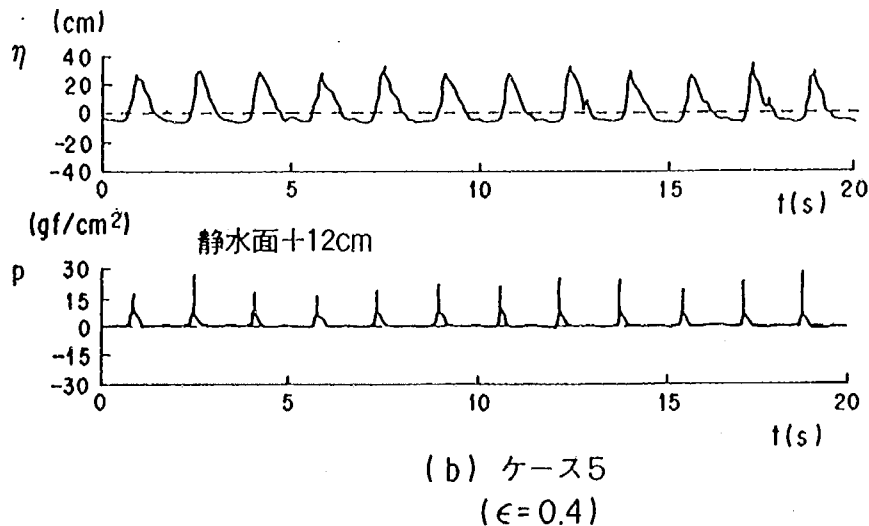
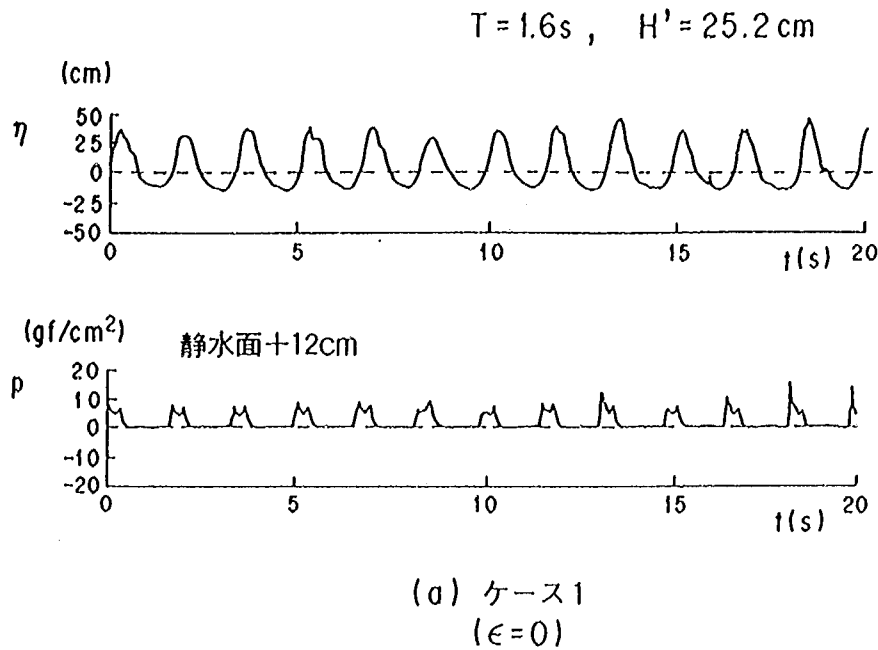


図4.14 模型沖側水位 (η) と静水面上12cmに位置する測点の波圧 (p) の時刻歴

(2) 天端高と波力の関係

最大波力が発生するケースにおいて、高天端模型の水平波力と各測点の差圧の時刻歴を図4.15に示す。静水面より上で測定された波圧は変化が著しく、最大値の大きな衝撃力が作用している。さらに静水面上25cmにおける差圧が最大となる時間は、水平波力が最大となる時間より約0.04 s 遅れている。この原因は、巻波砕波による水塊が静水面上約10cmにおいて衝突した後、静水面上25cmに打ち上がるのに時間を要するためである。水平波力が最大となる時間と各部材波力が最大となる時間にずれがあるため、部材設計にあたっては水平波力最大時の設計波圧を用いることができない。つまり部材設計にあたっては、時刻に無関係に各部材に作用する最大波圧を考慮する必要がある。

ケース6, $T = 1.6s$, $H' = 34.6cm$

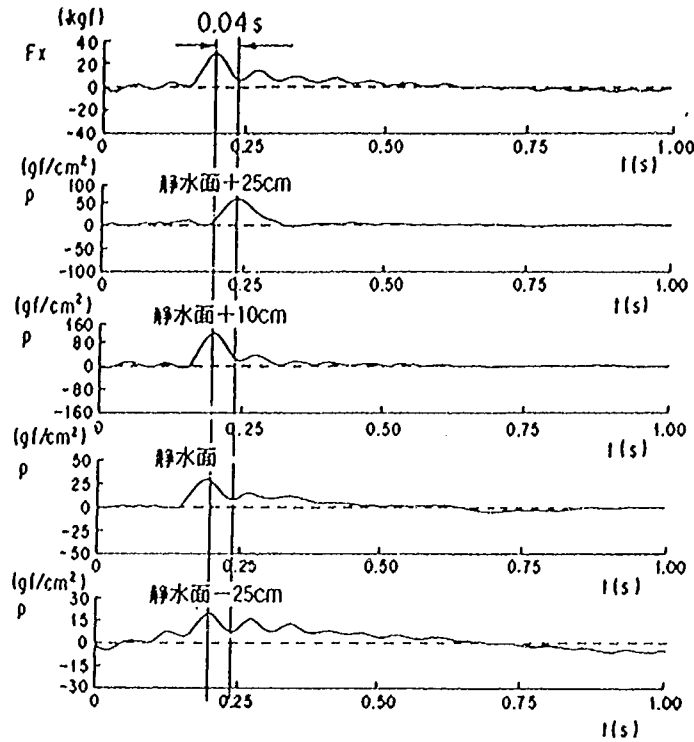


図4.15 水平波力 (η) と波圧 (p) の時刻歴 (高天端模型)

次に最大波力の作用する場合における実験値と合田式による波圧分布を図4.16に示す。実験値は波圧が静水面より上で最大値を取るのに対し、合田式では静水面で最大値を取り、静水面上は Z が大きくなるにしたがい波圧が低減する形となる。このため天端の高い場合には、合田式による設計では波力を過小に評価してしまうことになる。

ケース6, $T = 1.6s$, $H' = 34.6cm$

(3) スリット形状と波力の関係

横、縦スリット模型における $\bar{F}_{x_{max}}$ と H' の関係を図4.17に示す。 $\bar{F}_{x_{max}}$ は重複波の作用する場合において縦スリット模型の方が横スリット模型より若干大きいですが、碎波が作用する場合は有意な差は見られない。この実験から、碎波が作用する場合には、スリット形状の波力への影響は考慮する必要がないと言える。

(4) スリット枚数と波力の関係

1, 2, 3 枚スリットの水平波力 $\bar{F}_{x_{max}}$ と H' の関係を図4.18に示す。重複

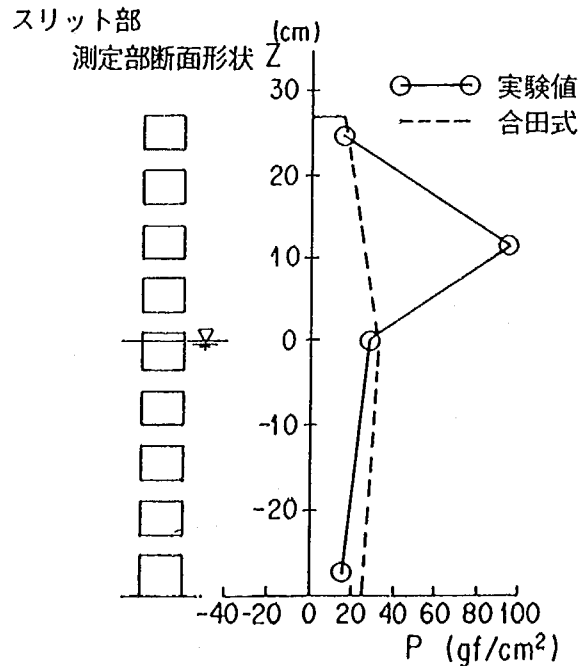


図4.16 実験と合田式による波圧分布の比較 (高天端模型)

波の作用する場合、1, 2枚スリット模型の $\bar{F}_{x\max}$ はほぼ同じ値を取るが、3枚スリット模型では中間スリットの存在のため、これらに比較して $\bar{F}_{x\max}$ は30~50%大きくなる。沖側スリットと岸側スリットの間隔 B_1 を波長 L で割った相対幅 B_1/L は $1/6 \sim 1/4$ である。入射波を単一正弦波に近似したとき、沖側スリット位置で水位が最大るとき $1/4$ 波長ずれた位置では水位は0となる。また $1/6$ 波長ずれた位置でも水位は十分低い。このことから、沖側スリットに最大波力の作用する時、岸側スリット位置における水位は低く、これが岸側スリットに働く波力を小さくさせたと考えられる。一方、沖側スリットと中間スリットの間隔 B_1 から相対幅 B_1/L を求めると $1/12 \sim 1/8$ となり、岸側スリットと中間スリットとの間を波が伝播する時の位相のずれは小さい。この点より、沖側スリットに最大波力が作用する時、中間スリットにもかなり強い波力が作用したと考えられる。一方、砕波が作用する場合、 $\bar{F}_{x\max}$ はスリット枚数に独立となる。

最大波力の発生するケースにおいて、2, 3枚スリット模型の前面水位 η 、水平波力 F_x 、および各スリットの静水面位置における差圧 P の時刻歴を図4.19に示す。2枚スリット模型において η がほぼ最大値を取る時間に、衝撃的な波力が作用し、同時に沖側スリットにも衝撃的な差圧が作用している。岸側スリットに作用する最大差圧は沖側スリットによる波力の低減のため沖側スリット最大差圧に比べ15%となっている。更に岸側スリットの差圧 P は、衝撃力による1つのピークと、その後比較的緩やかな2つ目のピークを持つ。1つ目のピークは沖側スリットを通過した水塊が岸側スリットに衝突するため生ずる。また2つ目のピークは水塊衝突後に岸側スリット位置で生ずる水位上昇のため発生する。3枚スリット模型においては、 η の立ち上がりが急となった瞬間に最大波力が発生し、沖側スリットの差圧も最大値をとる。また中間、岸側スリットに作用する最大差圧は沖側スリットに作用する最大差圧に比べ約20%と小さ

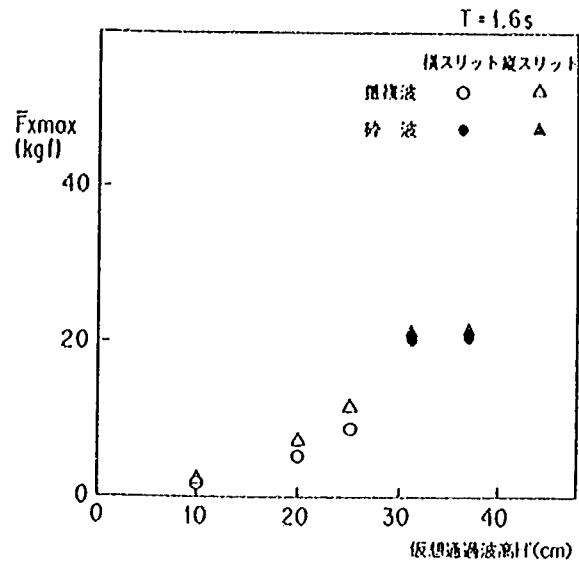


図4.17 $\bar{F}_{x\max}$ と B_1/L との関係

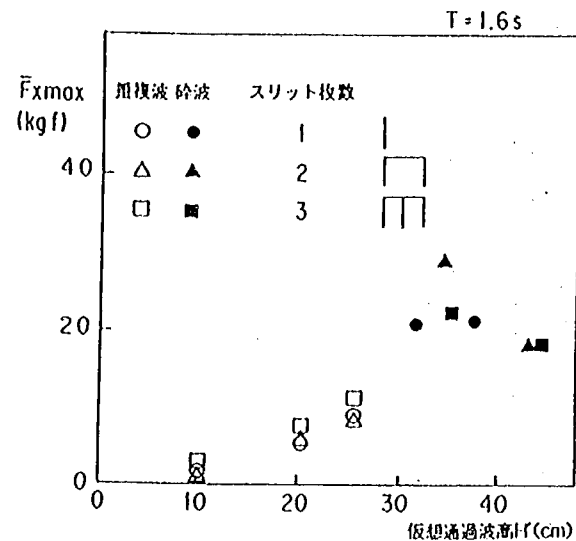
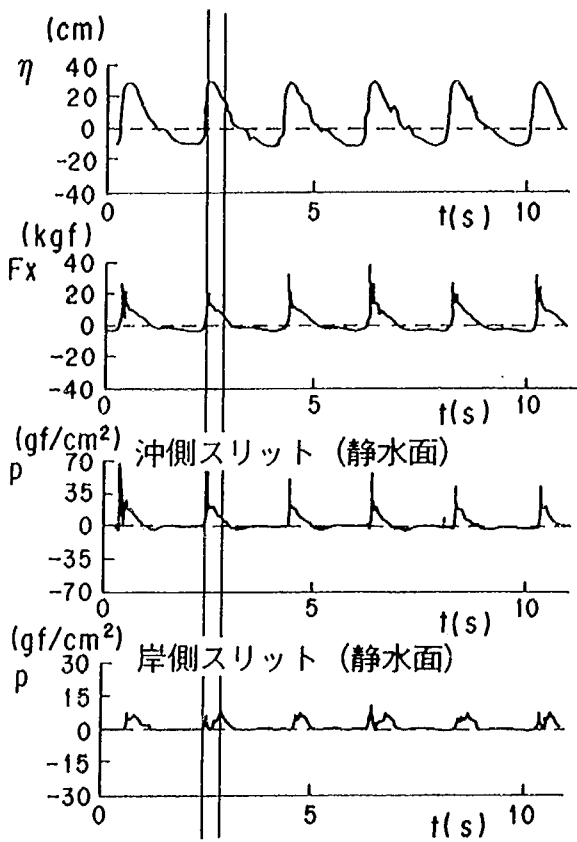
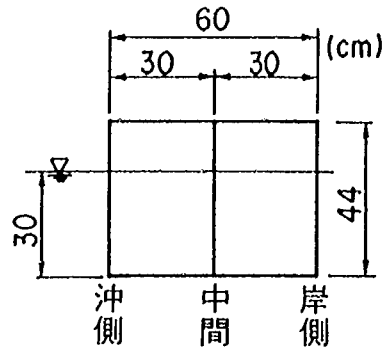
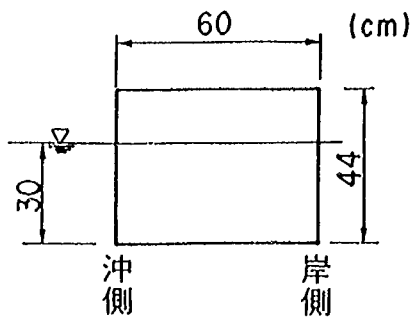
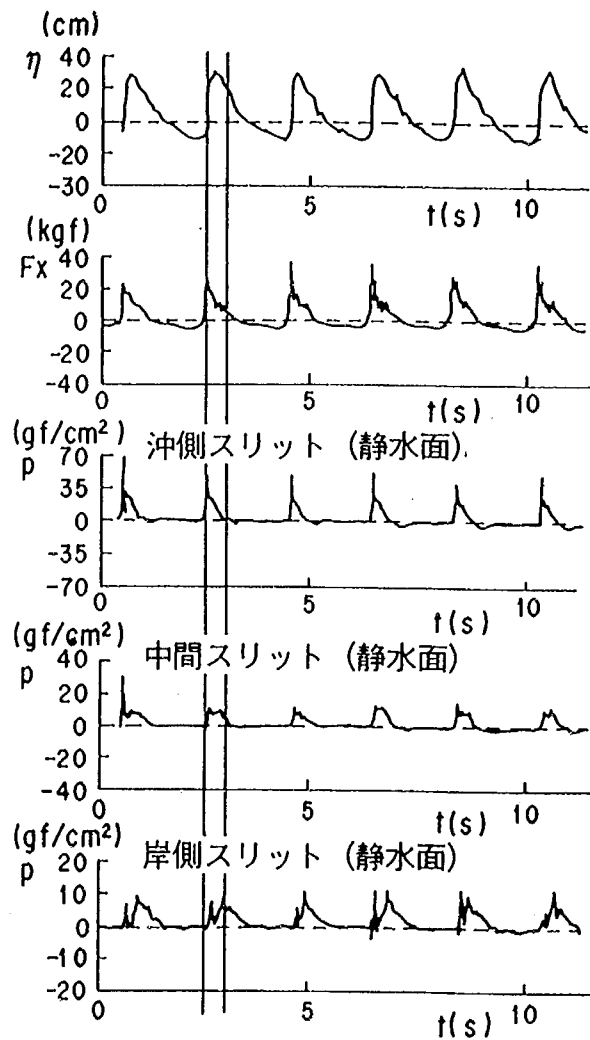


図4.18 $\bar{F}_{x\max}$ と B_1/L との関係

$$T = 2.0s, H' = 38.2cm$$



(1) 2枚スリット模型



(2) 3枚スリット模型

図4.19 模型沖側水位 (η), 水平波力 (F_x) ならびに
各スリット静水面波圧 (p) の時刻歴

い。岸側スリットの差圧は水塊の衝突による衝撃圧の発生と、水位上昇による2つ目の緩やかなピークを持っている。中間スリットに作用する差圧は沖側スリットに最大値の作用する瞬間に立ち上がり始め、時間的にはほぼ一定した値を取った後、緩やかに減少する。沖側スリットに水塊が衝突した後、沖側スリットと中間スリット間の遊水部において、瞬間的に水位上昇が生じ、その後、中間スリットと岸側スリット間の遊水部における水位上昇が時間的に遅れて緩やかに発生していることが目視により観察された。このため、中間スリットの沖、岸側において一定量の水位差が時間的に継続したため、一定した差圧値が見られたと考えられる。

重複波の作用する時、水平波力 F_x の最大となる時の差圧分布を図4.20に示す。3模型とも沖側スリットに作用する差圧は分布形に若干の違いが見られるが、値はほとんど変わらない。さらに岸側スリットに作用する差圧は沖側に比べてほとんど無視できる大きさである。3枚スリット模型において中間スリットに作用する差圧は沖側スリットに対し約30%となっている。このことは3枚スリット模型の $\bar{F}_{x_{max}}$ が1、2枚スリット模型に比べ約30%大きくなっていたことと一致する。

$$T = 2.0s, \quad H^1 = 20cm$$

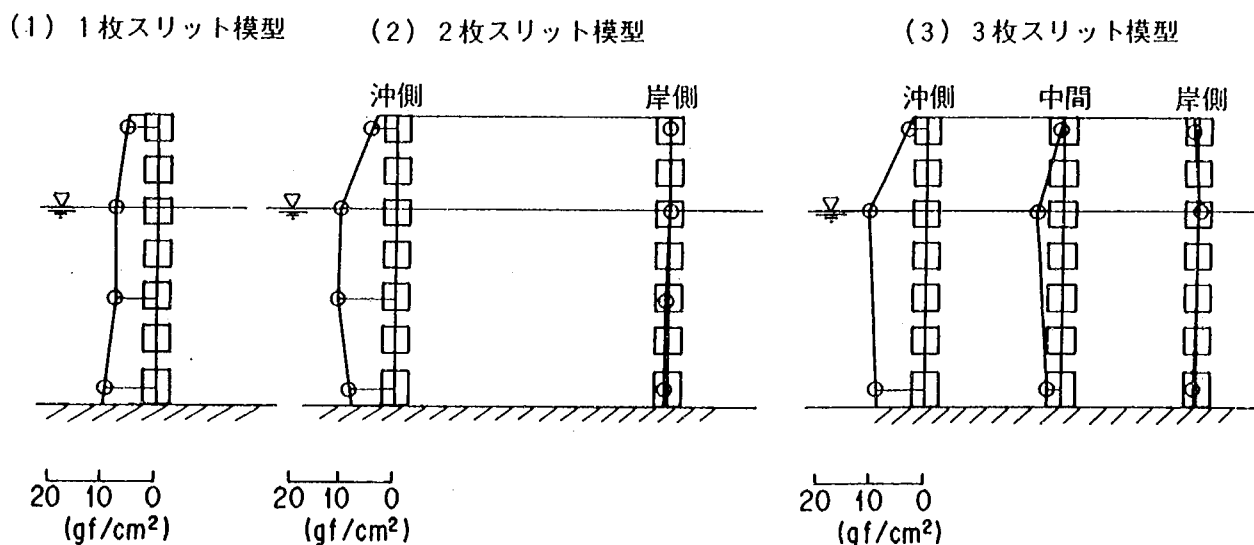


図4.20 水平波力最大時の差圧鉛直分布（重複波の作用する場合）

次に、水平波力 F_x が最大となる時の差圧分布を図4.21に示す。スリット枚数が1～3枚と変わっても、沖側スリットに作用する差圧の分布形、波圧値はほとんど変わらず、また岸側スリットに作用する差圧は非常に小さい。更に、中間スリットに作用する差圧は沖側スリットの差圧の約10%を占めるにすぎない。今回の実験に用いた模型の天端高は $h_c = 14cm$ と高いため、碎波の作用下で、 F_x が最大となる時の波力は最も沖側のスリットに集中し、中間、岸側スリットに作用している波力は F_x にほとんど影響を与えていないことが分かる。

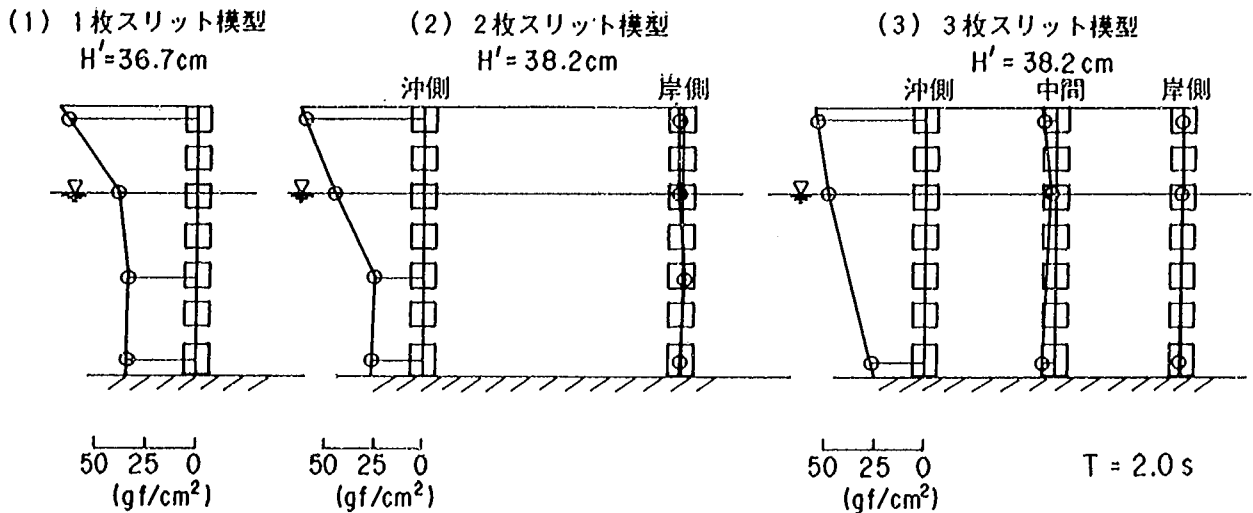


図4.21 水平波力最大時の差圧鉛直分布（最大波力の作用する場合）

4.3.3 合田波力との比較

合田式²⁾は不透過な直立壁や混成堤に作用する波圧の算定式である。そのため透過性構造物に適用することには問題がある。またこの式を衝撃砕波の作用する条件において使用する場合、十分な検討が必要とされている。このような問題点があるが、合田式は重複波から砕波まで連続的な波力の算定が可能なることから、参考のため、実験値との比較を行うこととした。

スリット壁に作用する波力算定値 F_{XG} は、合田式から空隙率分を差し引いて求めた（式(4.1)）。また、合田式を用いた計算の際、波高としては重複波の作用する場合には模型位置の波高 H_1 を、砕波の作用する場合には砕波波高 H_b を用いた。

$$F_{XG} = (1 - \epsilon) \cdot F_{XG, \text{WALL}} \quad (4.1)$$

$F_{XG, \text{WALL}}$: 直立壁に作用する合田式による波力算定値

ϵ : 空隙率

実験値と波力算定値との比 $\bar{F}_{Xmax}/F_{XG}$ との仮想通過波高 H' との関係を図4.22に示す。重複波

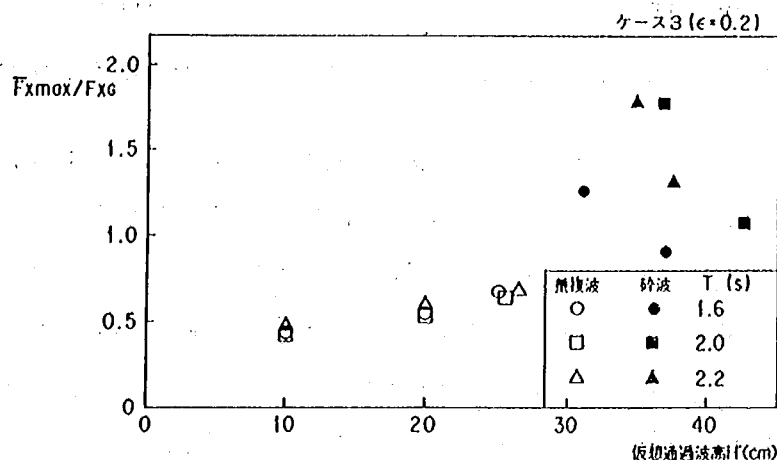
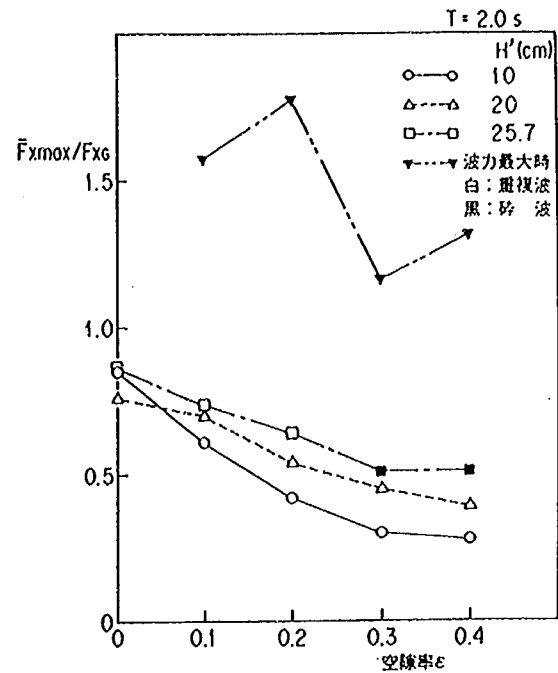


図4.22 $\bar{F}_{Xmax}/F_{XG}$ と H' との関係

の作用する場合において各模型の $\bar{F}_{Xmax}/F_{XG}$ は波高が高くなるにしたがい若干の増加が見られるが、周期にはほとんど依存しない。また碎波の作用する場合、 $\bar{F}_{Xmax}/F_{XG}$ は1を大きく越えている。特に最大波力が作用する場合、合田式を大きく越えてしまう。例えば $T=2.0$ 及び 2.2 s の場合、 $\bar{F}_{Xmax}/F_{XG}$ は約1.8となる。このように、斜面勾配が急で、衝撃力の作用する場合には、合田式では波力を過小に評価してしまうことになる。今後、このような衝撃力に対する構造物の応答性（動的応答倍率）について調査し、設計波力としてとりまとめる必要があろう。最大波力が作用する場合より H' がさらに高くなると、模型には碎波後の波が作用し、 $\bar{F}_{Xmax}/F_{XG}$ は低減する。



$\bar{F}_{Xmax}/F_{XG}$ と空隙率 ϵ との関係を図4.23に示す。

重複波の作用する場合、 ϵ の増加にともない $\bar{F}_{Xmax}/F_{XG}$ は減少する。また最大波力の作用する場合、 $\bar{F}_{Xmax}/F_{XG}$ は、ばらつきは大きいものの、全体として ϵ が増加するにつれ減少傾向となっている。重複波の作用する場合の $\bar{F}_{Xmax}/F_{XG}$ を一覧表として表4.4にまとめた。 $\bar{F}_{Xmax}/F_{XG}$ は、 ϵ が増加すると波浪条件ごとのばらつきが大きくなる。これは ϵ が増加するほど、模型岸側の水位変動の影響やスリットによるエネルギーロスの効果が増大するためである。

重複波の作用する場合におけるスリット式構造物に作用する波力 F_E は、合田式を空隙率分低減させ、更に低減率 λ を乗じて求める方法が考えられる。

表4.4 $\bar{F}_{Xmax}/F_{XG}$ の一覧表（重複波作用時）

T		1.6 s			2.0 s			2.2 s			最大値
ケース	H'	10.0cm	20.0cm	25.2cm	10.0cm	20.0cm	25.7cm	10.0cm	20.0cm	26.4cm	
実験値 ／ 合田 波力	1 ($\epsilon=0$)	0.81	0.76	0.90	0.85	0.73	0.86	0.90	0.84	0.99	0.99
	2 ($\epsilon=0.1$)	0.62	0.70	0.89	0.61	0.65	0.74	0.69	0.75	0.88	0.89
	3 ($\epsilon=0.2$)	0.43	0.54	0.67	0.42	0.53	0.64	0.46	0.59	0.68	0.68
	4 ($\epsilon=0.3$)	0.34	0.45		0.30	0.41		0.33	0.42		0.45
	5 ($\epsilon=0.4$)	0.29	0.39		0.28	0.36		0.29	0.45		0.45

$$F_E = \lambda \cdot (1 - \epsilon) \cdot F_{XG, WALL} \quad (4.2)$$

λ :低減率

各ケースにおいて、 $\bar{F}_{Xmax}/F_{XG}$ の最大値から求めた低減率 λ を表4.4中に示す。 λ は ϵ が0より0.2となると急激に減少するが、それ以上大きくなっても λ の減少割合は小さいことが分かる。

4.4 まとめ

本実験から得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- ① スリット式構造物に作用する水平波力は、空隙率 ϵ の増加に伴い空隙率相当分以上の低減を示す。これは、スリットの岸側と沖側の水位差の減少や、スリット付近での渦の形成に起因した圧力低下のためである。
- ② スリット式構造物に重複波の作用する場合の波圧は、空隙率 ϵ の変化にかかわらず静水面付近で最大値を持つ分布形となる。また碎波の作用する場合には、静水面より上において水塊が衝突するため衝撃圧が発生し、静水面より上で最大値を持つ分布形となる。
- ③ 縦スリットと横スリット模型に作用する波力は、重複波の作用する場合、縦スリットの方が横スリットより若干大きくなるが、碎波の作用する場合、有意な差は見られない。
- ④ 重複波の作用する場合、1, 2枚スリット模型に作用する波力はほぼ同じであるが、3枚スリットでは1, 2枚スリットに比べて波力は約30~50%大きくなる。これは主として各スリットの間隔と波長との関係に依存する。また碎波の作用する場合、波力は最も沖側のスリットに集中するためスリット枚数に独立となる。
- ⑤ スリット式構造物に作用する波力の実験値と合田式による波力算定値との比 $\bar{F}_{Xmax}/F_{XG}$ は、重複波の作用する場合、合田式による算定値に対し空隙率相当分以上の低減を示す。これに対し碎波の作用する場合には、波浪条件によって $\bar{F}_{Xmax}/F_{XG}$ は約1.8倍となり、合田式では波力を過小に評価してしまうことになる。

参考文献

- 1) 岩垣雄一・榎木 亨：海岸工学，共立出版，463p.，1979.
- 2) 合田良実：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，273p.，1975.

記号及び変数一覧

T	: 周期 (s)
H_b	: 碎波波高 (cm)
X_b	: 模型位置から碎波位置までの距離 (cm)
H'	: 仮想通過波高 (cm)
L	: 波長 (cm)
B_1	: 沖側スリット, 岸側スリット間隔 (cm)
B_2	: 沖側スリット, 中間スリット間隔 (cm)
e	: ストロークの設定値
η	: 模型沖側の水位 (cm)
$d\eta/dt$	: 模型沖側の水位の時間的变化割合 (cm/s)
h_c	: 天端高 (cm)
h_b	: 碎波水深 (cm)
ϵ	: 空隙率
F_x	: 水平波力 (kgf)
P	: 波圧 (kgf/cm ²)
F_z	: 鉛直波力 (kgf)
$F_{x_{max}}$	: 最大水平波力 (kgf)
$\bar{F}_{x_{max}}$	: 平均最大水平波力 (kgf)
F_{XG}	: 合田式により求めたスリット壁に作用する波力 (kgf)
$F_{XG, WALL}$	: 合田式により求めた直立壁に作用する波力 (kgf)
F_E	: スリット式構造物に作用する波力の算定値 (kgf)
H_D	: 合田式の計算に用いる波浪検定時の波高 重複波領域; H_1 (cm) 碎波領域; H_b (cm)
λ	: 波力低減率

第5章 あとがき

本報告書では、乱れと反射を利用した海域制御構造物について、その波力特性を明らかにした。今回は1/10勾配の斜面を設けて実験を行ったため、実験時の砕波形態は巻波砕波であり、構造物には衝撃的な波力が作用した。しかしながら模型の固定法等に問題が残されていたために、短い時間に作用する衝撃力の測定は完全ではなかった。衝撃力は特に部材の設計に重要であるために、今後部材の設計法も含めて更なる検討が必要である。また、本実験で扱わなかった他の海域制御構造物の波力特性についても検討していく必要がある。

(資料)

土木研究所資料No2609：海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(5)

皆生海岸F.S.調査報告書

はじめに

1. まえがき
2. 研究の目的
3. 研究体制
4. 皆生海岸の概要
5. フィージビリティ・スタディのための計画条件
6. 乱れと反射を利用した構造物（第1グループ）
7. レンズマウンド型（東洋建設(株)）
8. 複列透過性潜堤（日本テトラポッド(株)）
9. 斜板消波潜堤（大成建設(株)・(株)間組・東急建設(株)）
10. ハイブリッド式構造物（新日本製鉄(株)・戸田建設(株)）
11. 複合消波型構造物（(株)大林組）
12. 根入れ式鋼板セル（住友金属工業(株)・東亜建設工業(株)）
13. あとがき

土木研究資料No2577：海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(4)

はじめに

1. まえがき
2. 研究の目的
3. 研究体制
4. 海域制御構造物の開発の現状と特徴（土木研究所）
5. 海域制御構造物に作用する波力の特性（土木研究所）

6. 不規則波作用下での海域制御構造物の消波効果（土木研究所）
7. 乱れと反射を利用した海域制御構造物の波力に関する水理模型実験（第1報）（第1グループ）
8. 水平板付スリット型海域制御構造物に関する実験的研究（三井建設(株)）
9. 不規則波作用下での水平板付スリット型海域制御構造物の消波効果（三井建設(株)）
10. 斜板消波潜堤の安定性に関する研究（大成建設(株)・(株)間組・東急建設(株)）
11. 斜板消波潜堤の洗掘に関する実験的検討（土木研究所）
12. 根入れ式鋼板セルを用いた海域制御構造物に関する実験的検討（住友金属工業(株)・東亜建設工業(株)）
13. 複合消波機能を有する海域制御構造物に関する実験的検討(3)（(株)大林組）
14. ハイブリッド式消波構造物の水理特性に関する研究（新日本製鐵(株)・戸田建設(株)）
15. 駿河湾海洋技術総合研究施設周りの洗掘実態（土木研究所）
16. 湘南海岸の地理的、海岸工学的諸条件に関する検討（土木研究所）
17. あとがき

土木研究資料No2511：海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(3) 第1グループF. S. 調査報告書

1. はじめに
2. F. S. のための計画条件
 - 2.1 構造タイプ
 - 2.2 設計条件
 - 2.3 施工条件
3. 設計・施工検討
 - 3.1 スリット型（ブロックと杭）
 - 3.2 多重スリット型（ブロックと杭）
 - 3.3 水平板付きスリット型1（ブロックと杭）
 - 3.4 水平板付きスリット型2（ブロックと杭）
 - 3.5 水平板付きスリット型3（ブロックと杭）
 - 3.6 スリット型（ケーソンと杭）
 - 3.7 透過水平板付きスリット型（ケーソンと杭）
 - 3.8 中詰型（ケーソンと杭）
 - 3.9 改良空気密閉型（ブロックと杭）

4. 設計・施工法の比較

4.1 ブロック構造の設計・施工法の比較

4.2 ケーソン構造の設計・施工法の比較

5. 今後の課題

6. あとがき

土木研究資料No2510：海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(2)

はじめに

1. まえがき
2. 研究の目的
3. 研究の体制
4. 複列潜堤の透過および反射に関する研究 —— (日本テトラボッド(株)) ——
5. 空気潜袋式没水型海域制御構造物の水理特性 —— ((株)間組) ——
6. 複合消波機能を有する海域制御構造物に関する実験的検討(2) —— ((株)大林組) ——
7. 球面浅瀬式没水型消波構造物の消波特性 —— (東洋建設(株)) ——
8. 根入れ式鋼板セルを用いた海域制御構造物に関する実験的研究
—— (住友金属工業(株)・東亜建設工業(株)) ——
9. 多孔式消波板を用いた有脚式消波構造物に関する研究(2) —— (戸田建設(株)) ——
10. フレキシブルマウンドの波浪制御効果に関する検討 —— (清水建設(株)) ——
11. 斜板消波潜堤に関する研究 —— (大成建設(株)) ——
12. 円形消波潜堤に関する研究 —— (大成建設(株)) ——
13. あとがき

土木研究資料No2454：海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(1)

はじめに

1. まえがき
2. 研究の目的
3. 研究体制
4. 海域制御構造物 2次元消波実験 —— (土木研究所) ——
5. 消波構造物の消波効果からみた分類 —— (土木研究所) ——
6. 乱れと反射を利用した海域制御構造物に関する実験 —— (第1グループ) ——
スリット型 海域制御構造物 清水建設(株)
平面トラス型 飛鳥建設(株)

水平板付きスリット型	〃	三井建設(株)
透過水平板付きスリット型	〃	五洋建設(株)
改良空気密閉型	〃	清水建設(株)
中詰式	〃	大成建設(株)

7. 複合消波機能を有する海域制御構造物に関する実験 —— (株)大林組 ——
8. 多孔式消波板を用いた有脚式消波構造物に関する実験 —— (戸田建設(株)) ——
9. ハイブリッド式波浪制御構造物に関する実験 —— (新日本製鉄(株)) ——
10. 数値計算による海域制御構造物の静穏域創出効果 —— (土木研究所) ——
11. あとがき

図表一覧

付録

海域制御構造物の開発に関する
共同研究報告書(6)
－波力実験報告書－

I S S N 0386 - 5878
土木研究所資料第2658号
昭和63年7月(1988)

要 旨

スリット式の海域制御構造物を中心に、重複波から砕波領域の波浪条件のもとで波力実験を行い、構造物に作用する全体波力、部材波力を求めた。砕波形体は巻き波である。これよりスリット式、透過水平付スリット式海域制御構造物に作用する波力の特性が明らかになった。

キーワード：海洋開発，海域制御構造物，砕波，全体波力，
部材波力，共同研究

郵便はがき

40円切手
をはって
下さい。

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地
建設省土木研究所

海岸研究室
構造研究室
行 行

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

○

土木研究所資料第2658号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住 所)

氏 名

印

○