

港湾技研資料

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

No. 493

June. 1984

斜め入射波に対する曲面スリットケーソンの
反射および部材波力特性に関する実験的研究

谷 本 勝 利
吉 本 靖 俊

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. 実 験 方 法	4
2.1 実 験 概 要	4
2.2 実 験 施 設	4
2.3 反 射 率 の 測 定	5
2.4 部 材 波 力 の 測 定	14
3. 反 射 率 測 定 結 果	22
3.1 断 面 実 験 に お け る 反 射 率	22
3.2 波 向 き に よ る 反 射 率 の 変 化	24
4. 部 材 波 力 測 定 結 果	28
4.1 波 圧 の 測 定 例	28
4.2 波 向 き に よ る 部 材 波 圧 の 変 化	31
4.3 波 向 き に よ る 設 計 波 力 の 低 減 係 数	38
5. 消 波 部 不 透 過 ケ ー ソ ン に 隣 接 す る 場 合 の 波 圧	39
5.1 波 の 作 用 状 況 と 測 定 例	39
5.2 不 透 過 壁 に よ る 波 圧 の 変 化	40
6. 曲 面 ケ ー ソ ン の 安 定 性 に つ い て	43
6.1 外 力 の 算 定 法	43
6.2 安 定 計 算	44
7. む す び	46
参 考 文 献	47
主 要 記 号 一 覧	48

An Experimental Study on Wave Reflection and Wave Forces of Curved Slit Caisson Breakwaters for The Oblique Incident Wave

Katsutoshi TANIMOTO*
Yasutoshi YOSHIMOTO**

Synopsis

Hydraulic characteristics of curved slit caisson breakwaters were already investigated experimentally, and their hydraulic performance was proved to be distinguished compared with conventional caisson breakwaters. But the previous experiments were conducted in a wave channel, and only the characteristics of curved slit caisson breakwaters in a normal sea was studied. In this study, the wave reflection from this type of breakwaters and the wave forces acting on them in a oblique sea have been investigated by a series of experiments in a wave basin, using irregular waves and regular waves of several wave directions.

The reflection coefficient of curved slit caisson breakwaters for oblique incident waves mostly depends on the apparent width of the wave dissipating parts of caissons which is measured along the incident wave direction. It becomes minimum when the ratio of this width to the wave length corresponding to the significant wave period is $0.10 \sim 0.25$.

The impulsive wave pressure occurs in the wave chamber of this caisson when the angle of wave incidence is equal to 0. But for the oblique incident waves, the impulsive wave pressure becomes remarkably small and only the ordinary wave pressure acts on the structural members of wave dissipating parts. The ordinary wave pressure at the upper part of the wave chamber without partition walls decreases gradually as incident waves become oblique. However, the wave pressure at the lower part of the wave chamber with partition walls does not decrease so much as that of the upper part due to the influence of partition walls. The wave pressure at the front wall of the wave dissipating part and the uplift pressure which are not influenced by the impulsive wave pressure in the wave chamber decrease gradually in proportion to the angle of wave incidence.

Based on the experimental results, the followings are suggested for the design wave pressure; The pressure at the upper part of the wave chamber can be reduced by $0.5(1+\cos^2\theta)$ according to the incident wave angle θ when the partition walls of the wave chamber do not exist. The pressure at the lower part of the wave chamber with the partition walls and at the front wall can be reduced by $0.5(1+\cos\theta)$. The design wave pressure acting on the sides of a curved slit member is considered to be $0.5w_0H_I$.

A curved slit caisson which is located adjacently to the ordinary caisson is also tested. The wave forces on a curved slit member are proposed as follows. When the resultant force on the curved slit member acts outward, the wave pressure at the upper end is considered as 2 times that of the usual case. When the resultant force acts inward, the wave pressure at the lower end is considered as 1.6 times that of the usual case.

* Chief of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division

** Member of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division

斜め入射波に対する曲面スリットケーソンの 反射および部材波力特性に関する実験的研究

谷 本 勝 利*
吉 本 靖 俊**

要 旨

曲面スリットケーソンの水理特性については、これまで断面実験による調査研究が行われてきて、その水理学的有効性が証明された。しかし、斜め入射波に対しては未だ実験が行われておらず、その反射および部材波力特性が未解明であった。そこで、本研究は、斜め入射の不規則波に対する反射特性、および斜め入射の規則波に対する部材波力特性を実験により明らかにし、波向きによる設計波力の低減係数を示すものである。また、通常のケーソン堤に隣接する場合についてもその影響について検討を行うものである。

曲面スリットケーソンの反射率は、隔壁に影響されない条件では波の入射方向からみた見掛けの消波部幅によってはば決まり、透過壁厚も含めた見掛けのケーソン消波部幅が波長の10~25%のとき反射率は極小となる。

曲面スリットケーソンの部材波力特性は、入射角 θ が 0° のときには遊水室内で衝撃波圧が発生するが、斜め入射波になると衝撃波圧は発生しにくくなり波圧は急に減少する。遊水室背後壁上段のように隔壁の影響を受けないところでは、入射角が 0° のときの波圧に対する比(波圧低減係数)は、隔壁の影響を受けるところと比較して小さくなる。

一方、消波部外側の前面スリット壁や底板下面では、通常の混成堤と同様に波向きにより波力は徐々に低減する傾向を示している。

以上の結果を基に、斜め入射波に対する部材設計波力の低減係数として、衝撃波圧を受ける遊水室内の隔壁が存在しないところでは、 $0.5(1+\cos^2\theta)$ を考えることができ、隔壁の影響を受けるところでは斜め入射波としての波力低減効果はうすれるが、通常のケーソン堤と同様に $0.5(1+\cos\theta)$ で波力を低減することができる。遊水室外についても同様に低減できる。また、曲面スリット部材側面には、たえず $0.5w_0H_I$ の波力が作用するものとする。曲面スリットケーソンが通常のケーソンに隣接する場合で、合力が遊水室内から外側に働くときのスリット部材上端の波力強度は、通常の設置形態で $\theta=0^\circ$ のときの波力強度の2倍となることもある。また、逆に合力が遊水室内へ作用するときの曲面スリット部材下端の波力強度は1.6倍となることもあり、設計にあたってはこれについて十分留意する必要がある。

1. まえがき

近年、反射率および越波量を低減する機能を有し、波力を軽減できる防波堤の建設が進められている。そのひとつは、直立消波ケーソンであり、Jarlan¹⁾がはじめに提案して以来、各種の直立消波ケーソンが開発され、多くの調査研究がなされてきた。著者らも1/4円形状の曲面スリット部材からなる透過壁と遊水室を有する曲面スリットケーソンを開発し、その水理特性について多くの実験を行い、その水理学的有効性を報告している²⁾。

さらに、そのなかで消波性能の面からのスリット構造の決定法、基本および部材設計における波力条件の与え方も提案しており、実際の設計が可能な段階に達している。

しかし、斜め入射波による実験はいまだ行われておらず、斜め入射波に対する曲面スリットケーソンの諸特性は未解明のままとなっている。ただ、斜め入射波に対する設計波力としては、以下のように与えている。すなわちケーソンの安定性を検討する上での波力は、通常の混成堤の場合を準用し、 $0.5(1+\cos\theta)$ を波圧の作

* 水工部 防波堤研究室長

** 水工部 防波堤研究室

用高さ、および波圧に乗じて波向き補正を行うが、部材波力については曲面スリットケーソンが衝撃波圧という複雑な現象を伴うものであるため、実験によって確認する以外は特に波向き補正を行わないというものである。

そこで、本研究は、斜め入射波に対する反射および部材波力特性を実験により解明しこれを報告するとともに、部材の設計に用いる部材波力について波向きを考慮した設計波圧の低減係数を提案するものである。

また、通常のケーソンに隣接して曲面スリットケーソンが設置された場合や、曲面スリット部材が破損したときに消波部内を完全に埋め込んだ形で修復された場合には、斜め入射波になるほど上手側の曲面スリットケーソンに衝撃的な波圧が作用することが考えられる。そこで、このような不透過壁に隣接する曲面スリットケーソンの部材波力の変化を調べ、部材設計のための波力を検討する。

本実験は、縮尺が1/40と小縮尺であるということ、および平面実験という実験精度を考慮して、波圧についてはその絶対値を考察するよりは斜め入射波となることにより、波圧は入射角度が 0° のときと比べてどうなるか、という波圧の変化に重点をおくものである。ただ、斜め入射波になることにより、はじめて発生する波力、例えば曲面スリット部材両側面や隔壁に作用する波力については、その大きさも示し、設計波力を提案する。

2. 実験方法

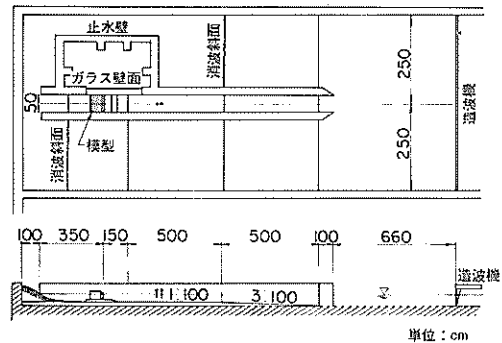
2.1 実験概要

本研究における実験は昭和56年度から始まり、同年度ではまず初めに不規則波に対する反射特性を調べる実験を3種の消波ケーソンを対象として断面水路にて行った(断面実験)。続いて、この実験結果を基に最も消波特性が優れた曲面スリットケーソンについて、斜め入射の不規則波に対する反射特性に関する実験を平面水槽にて行った(平面実験)。昭和57年度には同様に斜め入射の規則波に対して、同ケーソンの部材波力特性に関する平面実験を行うと同時に、不規則波に対する反射特性の追加実験も行った。さらに、昭和58年度には、曲面スリット部材が破損されて消波部が完全に埋め込まれた形で修復された消波部不透過ケーソンを想定し、これによる曲面スリットケーソンの部材波力特性に対する影響を調べる実験を行った。

2.2 実験施設

(1) 断面水路

消波ケーソンの反射特性に関する断面実験は、当研究所の中型平面水槽内に設けられた仮設の断面水路を用い



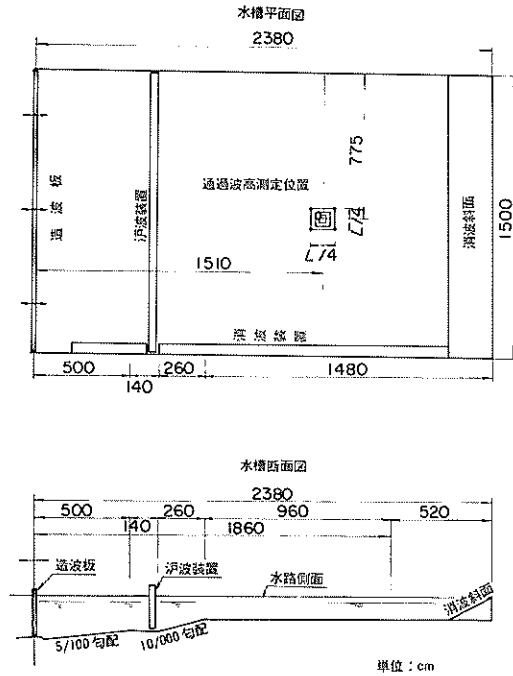
図一 1 断面水路(中型平面仮設水路)

た。当水路は、中型平面水槽(30m×20m×1m)の一部を幅5mで仕切った仮設水路であり、図一1に示すように造波板の中立位置より6.6m離れた地点から内水路を設けており、この中に模型を設置する。内水路両側は、約1:3勾配の碎石面の上を模型用の消波ブロックで被覆した消波斜面である。ここに入射した波は斜面上で砕波して減衰し、ここからの反射の影響は小さい。また、内水路に置かれた模型からの反射波は、内水路を出ると同時に回折により分散するため、これによる造波板からの再反射の影響も軽減される。水路床は造波板中立位置から7.6~12.6mの区間を3/100勾配、つづいて17.6mの5m区間を1/100勾配としてあり、残りの部分は水平床となっている。模型設置地点は約3mにわたり観測用ガラス壁となっており、その外側を止水壁で囲んである。

当水路の造波機は、低慣性直流電動機で駆動するピストン型造波機であり、水路全幅にわたって一様に造波することができる。

(2) 平面水槽

斜め入射波に対する反射および部材波力特性に関する実験は中型平面水槽にて行った。当平面水槽は図一2に示すように全長30m、全幅15m(前述の仮設水路部を除く)、深さ1mである。造波板中立位置より6.4m~9.0mの区間は1/10の斜面となっており、そこより水槽端部までの14.8mは水平床となっている。水槽端部は、勾配約1:2の碎石斜面である。造波板前方6.2mの地点には浪波装置としてステンレス製浪波網(4mmメッシュ、径0.95mm)が約1.5cm間隔で6枚鉛直に並べられており、造波板からの再反射の影響を減少させると同時に、短周期の波ほど顕著である擾乱波を減少させている。堤体に入射角を持たせるように堤体を設置する場合には、反射波が水槽側面に向って進行するため、片



図一 2 中型平面水槽

側の側壁にはステンレスくずで製作した消波装置（幅約 1 m）を並べ、側壁からの再反射を減少させている。造波機は仮設水路の造波機と同型の造波機が 3 台設置されており、入力信号に対してこれらが同期して駆動し波峯線方向に一樣な波を発生させることができる。

2.3 反射率の測定

(1) 実験ケースと構造条件

反射率については、断面実験と平面実験を行い、それぞれの実験ケースは表一に示す通りである。すなわち断面実験では、3種の消波ケーソン（縦スリットケーソン

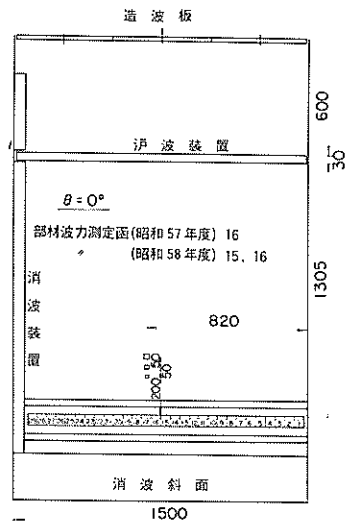
表一 1 反射率測定実験ケース

実 験	消波ケーソン	水深h (cm)	マウンド
反射実験	曲面スリットケーソン	46.25	高マウンド
		54.25	低マウンド
	縦スリットケーソン	46.25	低マウンド
	2重縦スリットケーソン	46.25	低マウンド
	平面実験 $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$	曲面スリットケーソン	46.25
48.25			低マウンド
54.25			低マウンド

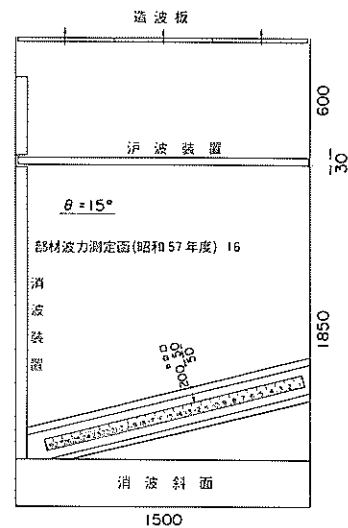
ン、2重縦スリットケーソン、曲面スリットケーソン）を対象として、水深およびマウンド高を変えた5ケースについて実験を行った。一方、平面実験では、曲面スリットケーソンのみを対象とし、図一3(1)~3(5)に示すように波の入射角が 0° の他に、堤体の法線方向をかえることにより、 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ の合計5種類の入射角度について、それぞれの水深、マウンド高を変えた4ケースの実験を行った。

表一2は、以上の実験ケースにおける構造諸元を示すものであり、表中の記号は図一4に示している。

水深hは、4.625 cm、4.825 cm、5.425 cmの3種類を採用した。



図一3(1) 模型の配置 ($\theta = 0^\circ$)



図一3(2) 模型の配置 ($\theta = 15^\circ$)

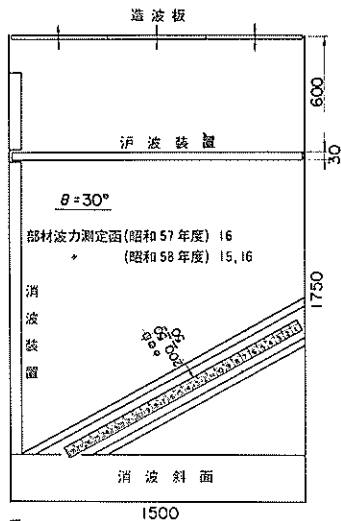


図-3(3) 模型の配置 ($\theta = 30^\circ$)

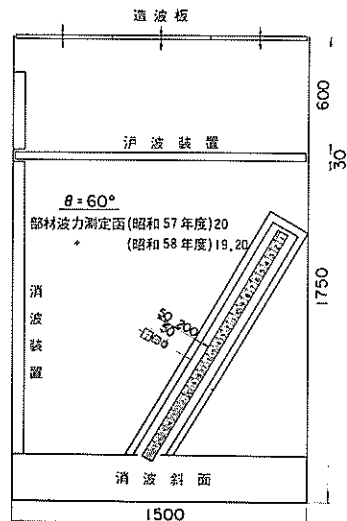


図-3(5) 模型の配置 ($\theta = 60^\circ$)

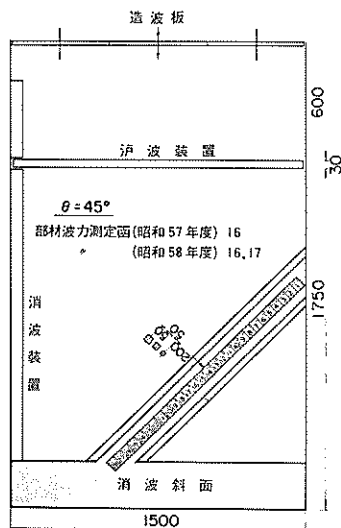


図-3(4) 模型の配置 ($\theta = 45^\circ$)

マウンド高 h_M は、18.75 cm (低マウンド) と 25.00 cm (高マウンド) の 2 種類としたが、高マウンドは水深 46.25 cm の場合のみ採用した。マウンドの法肩幅

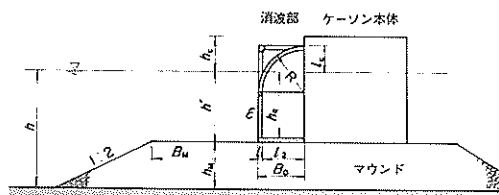


図-4 記号の表示

は、4.25 cm の 1 通りであり、法面勾配は 1 : 2 である。マウンドは、写真-1(1), 1(2) に示すように砕石を用いて形成したが、法面部は砕石をじゃかごに入れ、これを並べて形成した。マウンド形成後の水平精度は、模型設置後の天端高で測定すると所要天端高の ± 2 mm 以内におさまっている。

ケーソン本体天端高は、水深 46.25 cm の静水面上 + 12.5 cm であり、曲面スリット部材上端より 2.5 cm 高くなっている。

(2) 模型

本実験で対象とした消波ケーソンは、断面実験では①

表-2 水深及び構造諸元 (各消波ケーソン共通)

水深 h (cm)	マウンド						ケーソン本体天端	
	ケース名	h_M (cm)	h' (cm)	B_M (cm)	h'/h	B_M/h	h_c (cm)	h_c/h
46.25	高マウンド	25.00	21.25	42.50	0.459	0.919	18.75	0.405
	低マウンド	18.75	27.50	42.50	0.595	0.919	12.50	0.270
48.25	低マウンド	18.75	29.50	42.50	0.611	0.881	10.50	0.218
54.25	低マウンド	18.75	35.50	42.50	0.654	0.783	4.50	0.083

表-3 消波ケーソン諸元

消波ケーソン	水深 h (cm)	マウンド	l_c (cm)	$\frac{l_c}{R(B_0)}$	h_q (cm)	$\frac{h_q}{h}$	B_0 (cm)	l_1 (cm)	l_2 (cm)	$\frac{B_0}{h}$	$\frac{l_1}{h}$	$\frac{l_2}{h}$	ϵ
縦スリットケーソン	46.25	低マウンド	10.00	0.500	23.50	0.508	20.00	2.50	17.50	0.432	0.054	0.378	0.250
2重縦スリットケーソン	46.25	低マウンド	10.00	0.500	22.50	0.486	20.00	1.50	18.50	0.432	0.032	0.400	0.250
曲面スリットケーソン ($R=14.5$ cm) ※断面実験, 平面 実験とも同模型	46.25	高マウンド	16.25	1.121	8.75	0.189	15.00	1.00	14.00	0.324	0.022	0.303	0.250
		低マウンド	10.00	0.690	15.00	0.324	15.00	1.00	14.00	0.324	0.022	0.303	0.250
	48.25	低マウンド	8.00	0.552	17.00	0.352	15.00	1.00	14.00	0.311	0.021	0.290	0.250
	54.25	低マウンド	2.00	0.138	23.00	0.424	15.00	1.00	14.00	0.276	0.018	0.258	0.250

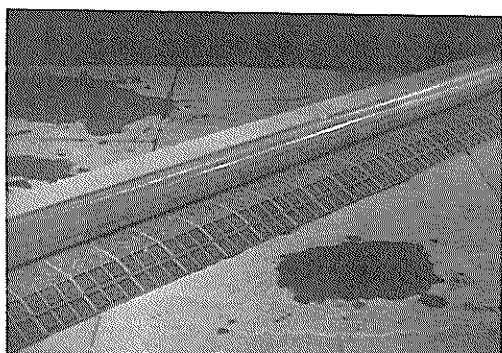


写真-1(1) 模型の設置 (低マウンド)

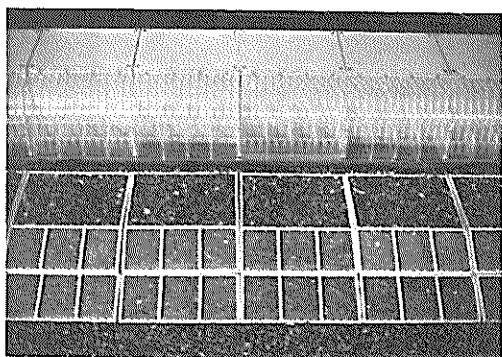


写真-1(2) 模型の設置とマウンド (高マウンド)

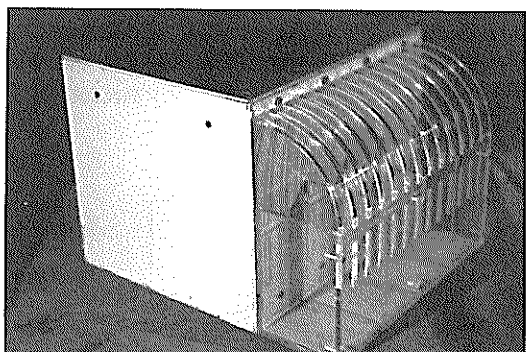


写真-2 曲面スリットケーソン模型

曲面スリットケーソン, ②縦スリットケーソン, ③2重縦スリットケーソンの3種であり, 斜め入射波に対する平面実験では①曲面スリットケーソンのみである。表-3にこれらのケーソンについて諸元を示す。なお表中の記号は前出図-4を参照のこと。

①曲面スリットケーソン(写真-2, 図-5, 6参照)

当ケーソン消波部模型はアクリル合成樹脂製であり, 底板から曲面スリット部材上端までの高さは375mm, 法線方向模型幅は480mm, 前面壁厚を含めた消波部幅は150mmである。前面壁および曲面スリット壁厚は10mmであるため, 遊水室幅は140mmとなる。また, 曲面スリット壁の曲率半径は145mmであり, 曲面スリット部材幅 a は27.7mm, 開口部幅 s は9.2mmである。したがって, 式(1)で定義される開口比 ϵ は25%である。

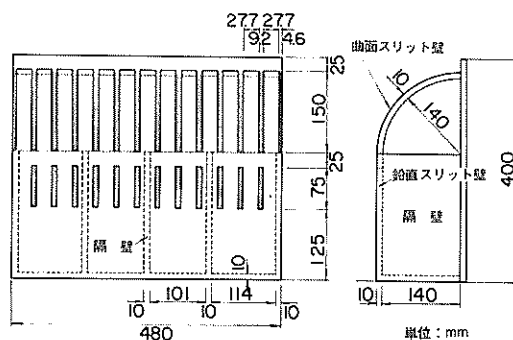


図-5 曲面スリットケーソン消波部模型

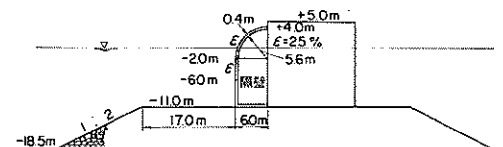


図-6 曲面スリットケーソン設置断面 (現地量換算値)

に開口部が開くような六角形型であり、同壁上段は逆に、遊水室内側に鋭角部を有する五角形型である。遊水室上段の水平スリット壁も五角形であるが、中段の水平スリット壁は矩形である。

消波部背後のケーソン本体は鋼製であり、全高は425 mmと消波部より25 mm高くなっている。

図-8は、図-6と同様当ケーソン設置時の断面形状である。

③ 2重縦スリットケーソン(写真-4, 図-9, 10参照)

2重縦スリットケーソンは、縦スリットケーソン遊水室内部にもう一枚の鉛直スリット壁を設けた構造である。当ケーソン消波部模型も縦スリットケーソンと同様にアクリル合成樹脂で製作しており、外寸法も同じである。スリット部材幅は30 mm, 開口部幅は10 mmと開口比 ϵ も25%と同じであるが、スリット壁厚は、15 mmと薄くなり、スリット部材の断面形状は矩形である。さらに、遊水室内の隔壁は省略している。図-10は、図-6, 8と同様に当ケーソン設置時の断面形状である。

(3) 通過波高検定

実験波としては、ブレットシュナイダー・光易型のスペクトル形を有する不規則波を用いた。この不規則波信号の作製は白色雑音発生器から出力される白色雑音を、結果として造波効率で補正したブレットシュナイダー・光易型のスペクトルとなるように出力レベルを調整した帯域フィルターを通すことによる。不規則波の目標有義波周期は0.632 s, 0.791 s, 0.949 s, 1.265 s, 1.897 s, 2.530 sの6種類であり、各周期について1種類の信号を作製した。

本実験では、3種類の水深を採用しているが、造波水深が大きく違わないことから、同一の信号を3種類の水深に対して用いることにした。断面実験および平面実験とも、実験水深で所要の有義波高を発生する入力基準電圧を知るため、実験に先立ち模型を設置しない状態において、種々の入力基準電圧に対する発生波高(通過波高)の関係を求めた。図-1に示した断面水路では、堤体設置予定位置で2点、およびそれより沖に3 mの地点で2点の合計4点にて、容量式波高計により水位を測定し、不規則波解析装置³⁾(ミニコンピューター)にてこれを解析した。この時の対象波数は100~200波であり、4測点での合成波の有義波高を通過波高とした。また、反射実験に使用する波高条件の範囲にほぼ含まれる通過波高の測定ケースについて、それらの有義波周期の平均値をその水深における不規則波の有義波周期とした。図-11は、水深4.625 cmの場合における各周期ごとの入力基準電圧 e (V)と通過有義波高 $H_{1/3}$ の関係で

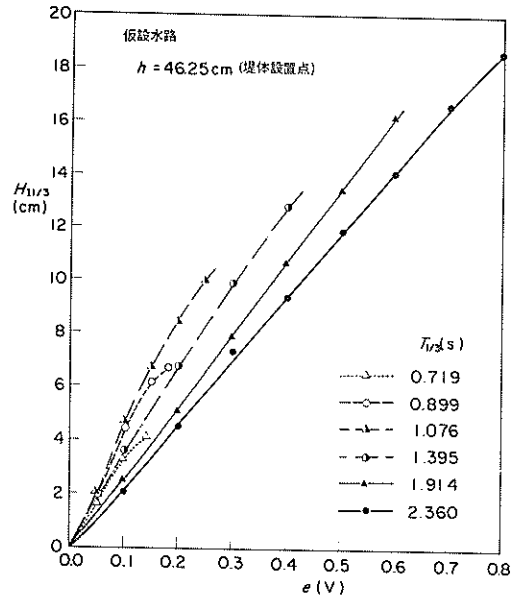


図-11 入力基準電圧と発生波高の関係
(水深4.625 cm)

ある。有義波周期は、当初目標としたそれより、短周期の信号では長い方へ、長周期の信号では逆に短い方へ若干変動している。図-12(1)~12(6)は同水深での波高の頻度分布の1例を示したもので、各周期とも、ほぼ点線で示したレーリー分布に従っていることがわかる。また、図-13(1)~13(6)は、各周期におけるスペクトル形を示したものである。点線は、ブレットシュナイダー・光易型のスペクトルであり、低周波成分が増幅され、高周波成分が減衰しているが、実測スペクトルはほぼブレットシュナイダー・光易型のスペクトルを表現している。なお、水深5.425 cmの場合には通過波高検定を行っておらず、この水深での有義波周期は水深4.625 cmでの値を用いた。

一方、平面実験における不規則波信号も断面実験の不規則波信号をそのまま使用している。平面水槽における通過波高検定は以下のように行った。測点は、前出図-2中に示す点0を中心として有義波周期による波長の1/4を1辺とする正方形の4点であり、容量式波高計にて測定された水位から、4点での合成波の有義波高の平均値を求め、これを通過波高とした。有義波周期は断面水路の場合と同様に決定した。図-14, 15はそれぞれ水深4.625 cm, 4.825 cmにおける入力基準電圧と通過波高の関係を示したものである。図-16は、水深が5.425 cmのときの同様な図であり、有義波周期が1.082 s, 1.464 sの2種類しか示していない。この水

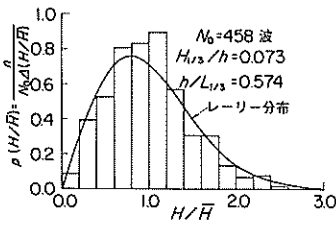


図-12(1) 通過波高の頻度分布
($h/L_{1/3} = 0.574$)

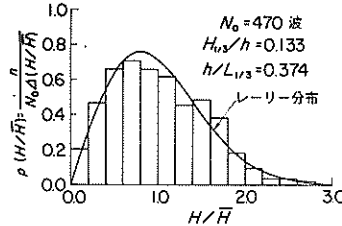


図-12(2) 通過波高の頻度分布
($h/L_{1/3} = 0.374$)

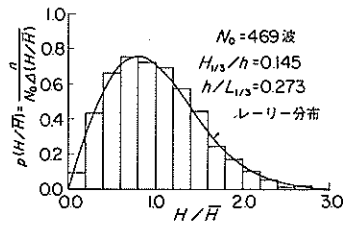


図-12(3) 通過波高の頻度分布
($h/L_{1/3} = 0.273$)

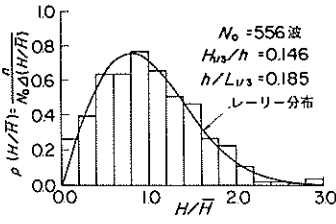


図-12(4) 通過波高の頻度分布
($h/L_{1/3} = 0.185$)

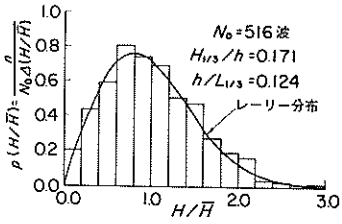


図-12(5) 通過波高の頻度分布
($h/L_{1/3} = 0.124$)

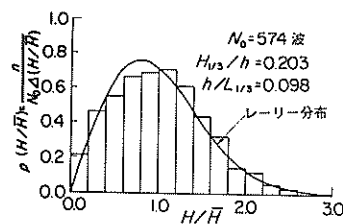


図-12(6) 通過波高の頻度分布
($h/L_{1/3} = 0.098$)

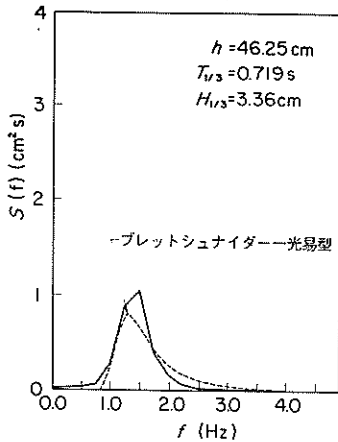


図-13(1) 通過波のスペクトル
($T_{1/3} = 0.719$ s, $H_{1/3} = 3.36$ cm)

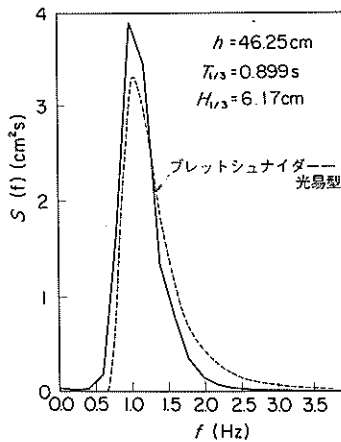


図-13(2) 通過波のスペクトル
($T_{1/3} = 0.899$ s, $H_{1/3} = 6.17$ cm)

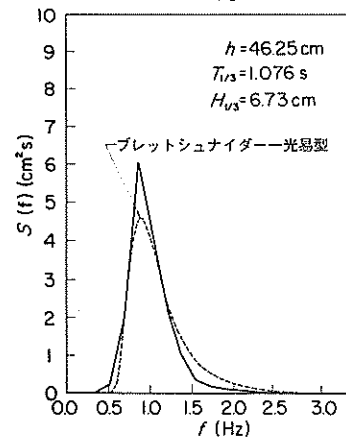


図-13(3) 通過波のスペクトル
($T_{1/3} = 1.076$ s, $H_{1/3} = 6.73$ cm)

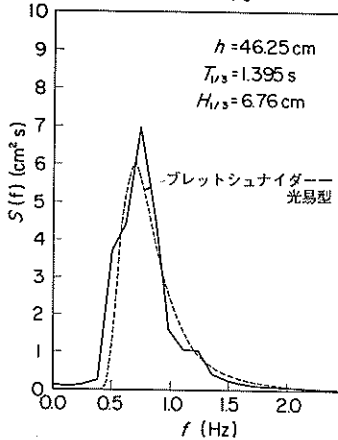


図-13(4) 通過波のスペクトル
($T_{1/3} = 1.395$ s, $H_{1/3} = 6.76$ cm)

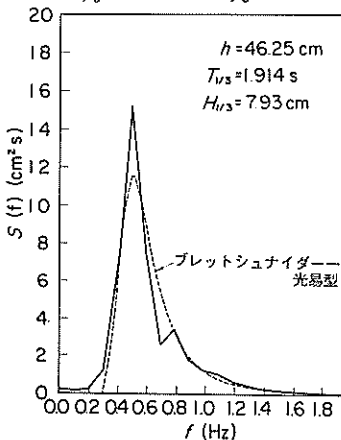


図-13(5) 通過波のスペクトル
($T_{1/3} = 1.914$ s, $H_{1/3} = 7.93$ cm)

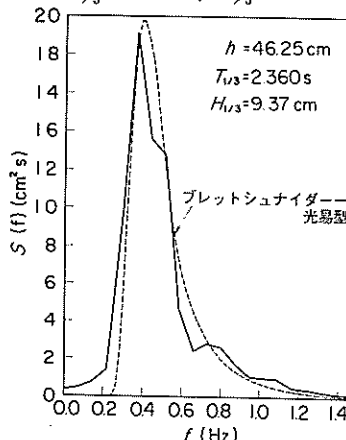
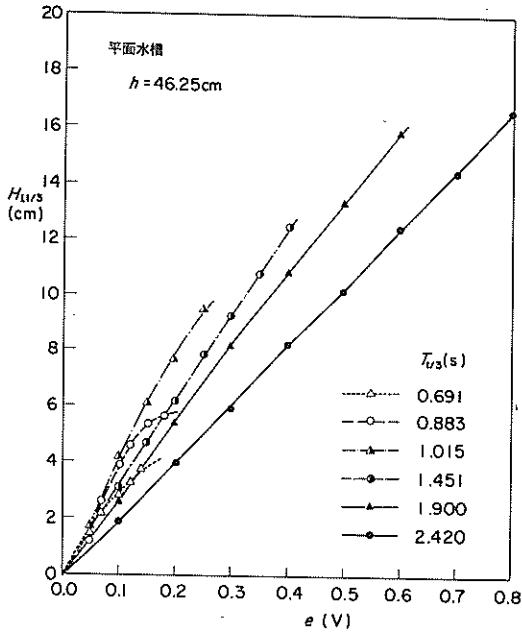
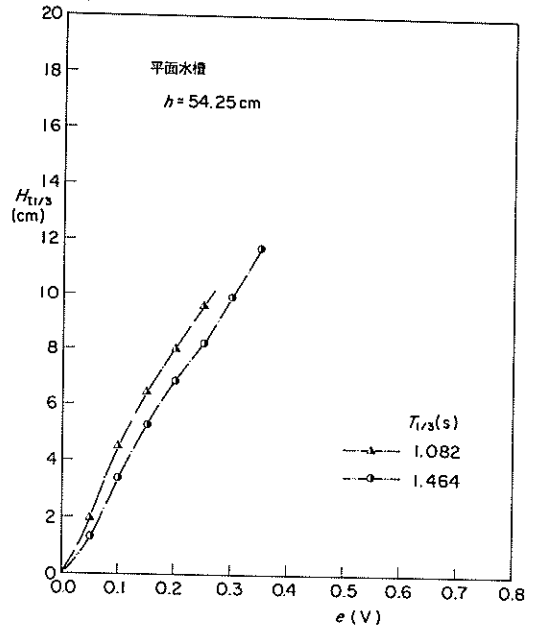


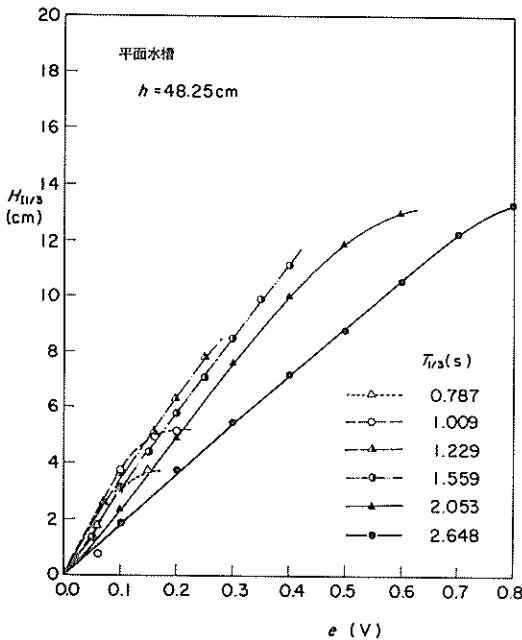
図-13(6) 通過波のスペクトル
($T_{1/3} = 2.360$ s, $H_{1/3} = 9.37$ cm)



図一 14 入力基準電圧と発生波高の関係 (平面水槽, 水深 46.25 cm)



図一 16 入力基準電圧と発生波高の関係 (平面水槽, 水深 54.25 cm)



図一 15 入力基準電圧と発生波高の関係 (平面水槽, 水深 48.25 cm)

深の反射実験では水深 46.25 cm における有義波周期で 0.883 s の不規則波信号をも使用しているが、これについては通過波高を測定しておらず、 $T_{1/3}$ の値は、水深が 46.25 cm における値を用いた。

平面水槽における通過波の頻度分布、スペクトル形に

ついては、仮設水路 (断面水路) における結果 (図一 12 (1) ~ 12 (6), 図一 13 (1) ~ 13 (6)) とほぼ同様であるので、ここでは省略する。

(4) 波浪条件

反射率測定実験 (断面実験, 平面実験) に使用した波浪条件を表一 4, 5 (1) ~ 5 (3) に示す。

表一 4 断面実験波浪条件

水深 h (cm)	有義波周期 $T_{1/3}$ (s)	入力基準電圧 e (V)	有義波高 $H_{1/3}$ (cm)	相対水深 $h / L_{1/3}$	波形配 $H_{1/3} / L_{1/3}$
46.25	0.719	0.060	2.00	0.574	0.0248
		0.140	4.00		0.0497
	0.899	0.050	2.00	0.374	0.0162
		0.090	3.75		0.0303
		0.170	6.40		0.0517
	1.076	0.085	3.75	0.273	0.0221
		0.145	6.50		0.0384
		0.200	8.40		0.0496
		0.130	5.80		0.0343
	1.395	0.115	4.00	0.185	0.0160
		0.195	6.55		0.0262
		0.275	9.00		0.0361
	1.914	0.255	8.40	0.124	0.0336
		0.140	3.36		0.0097
		0.230	6.00		0.0161
		0.325	8.60		0.0231
2.360	0.425	11.40	0.0975	0.0306	
	0.160	3.60		0.0076	
	0.270	6.25		0.0132	
	0.380	8.80		0.0186	
54.25	2.360	0.620	14.60	0.0975	0.0308
		0.620	14.60		0.0308

表一 5(1) 平面実験波浪条件 (水深 46.25 cm)

水深 h (cm)	有義波周期 $T_{1/3}$ (s)	入力基準 電圧 e(V)	有義波高 $H_{1/3}$ (cm)	相対水深 h/L $_{1/3}$	波形勾配 H $_{1/3}$ /L $_{1/3}$
46.25	0.691	0.060	2.00	0.621	0.0269
		0.145	3.75		0.0504
	0.883	0.055	2.00	0.386	0.0198
		0.095	3.75		0.0371
		0.175	5.60		0.0555
	1.105	0.090	3.75	0.262	0.0212
		0.155	6.25		0.0354
		0.230	8.75		0.0495
		0.125	5.13		0.0290
	1.451	0.125	3.75	0.176	0.0142
		0.210	6.40		0.0243
		0.295	9.00		0.0342
		0.265	8.20		0.0311
	1.900	0.145	3.75	0.125	0.0101
		0.235	6.25		0.0169
		0.330	8.95		0.0242
		0.425	11.40		0.0308
	2.420	0.190	3.75	0.0948	0.0077
		0.315	6.40		0.0131
		0.435	8.90		0.0182
0.700		14.50	0.0297		

表一 5(2) 平面実験波浪条件 (水深 48.25 cm)

水深 h (cm)	有義波周期 $T_{1/3}$ (s)	入力基準 電圧 e(V)	有義波高 $H_{1/3}$ (cm)	相対水深 h/L $_{1/3}$	波形勾配 H $_{1/3}$ /L $_{1/3}$
48.25	0.787	0.065	2.00	0.501	0.0208
		0.150	3.60		0.0374
	1.009	0.055	2.00	0.316	0.0131
		0.100	3.75		0.0245
		0.200	5.19		0.0339
	1.229	0.105	3.75	0.229	0.0178
		0.195	6.25		0.0297
		0.250	7.70		0.0366
		0.155	5.13		0.0244
	1.559	0.125	3.75	0.164	0.0128
		0.215	6.25		0.0213
		0.305	8.75		0.0298
		0.280	7.90		0.0269
	2.053	0.150	3.75	0.117	0.0091
		0.240	6.25		0.0152
		0.340	8.75		0.0212
		0.445	11.09		0.0269
	2.648	0.200	3.75	0.0879	0.0068
		0.350	6.25		0.0114
		0.500	8.95		0.0163
0.800		13.20	0.0240		

表一 4 は、断面実験の水深 46.25 cm のケースにおける波浪条件であり、各有義波周期について 2~4 種類の有義波高を採用している。水深 54.25 cm の場合には、前述のように通過波高検定を行っておらず、所要の有義波高を発生する入力基準電圧が不明であるため、水深 46.25 cm の下で用いた入力基準電圧で造波して実験を

表一 5(3) 平面実験波浪条件 (水深 54.25 cm)

水深 h (cm)	有義波周期 $T_{1/3}$ (s)	入力基準 電圧 e (V)	有義波高 $H_{1/3}$ (cm)	相対水深 h/L $_{1/3}$	波形勾配 H $_{1/3}$ /L $_{1/3}$
54.25	0.883*	0.075**	2.92	0.449*	0.0242**
		0.130**	5.00		0.0414**
		0.180**	5.84		0.0484**
	1.082	0.070	3.00	0.309	0.0171
		0.115	5.00		0.0285
		0.175	7.30		0.0416
		0.250	9.60		0.0548
		0.090	3.00		0.0107
	1.464	0.145	5.00	0.194	0.0178
		0.210	7.00		0.0250
		0.270	9.00		0.0321
		0.400	13.10		0.0467
		0.090	3.00		0.0107

* 水深 46.25 cm における $T_{1/3}$ を利用

** 水深 46.25 cm における同一入力基準電圧による発生波高を造波効率で補正して推定

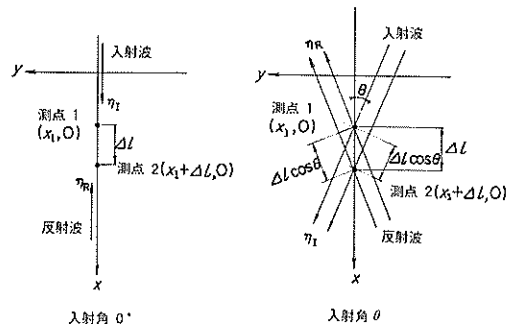
行った。

表一 5(1), 5(2) はそれぞれ平面実験における水深 46.25 cm, 48.25 cm での波浪条件であり、断面実験と同様に各有義波周期について 2~4 種類の有義波高を採用している。表一 5(3) は、水深 54.25 cm における波浪条件であり、この場合の通過波高を測定していない有義波周期 0.883 s については、断面実験と同様に、水深 46.25 cm の下での入力基準電圧を用いた。

(5) 反射率の測定法

反射率の測定には、合田・鈴木他⁴⁾による入射波の分離推定法を適用した。この方法は、図一 17 の左図に示すように近接した 2 点での同時水位波形を有限フーリエ級数で表示し、各成分波に対して以下に示すように入射波を分離したのち、それぞれのスペクトルを推定するものであり、反射率 K_R は、入射波のエネルギーを E_I 、 E_R として式(2)で定義している。

$$K_R = \sqrt{E_R/E_I} \quad (2)$$



図一 17 分離推定法における測点

今、図一17に示されるように、 x 軸正方向に進む進行波 η_I と、これと逆方向に進む反射波 η_R を分離する場合を考えると、 η_I, η_R はそれぞれ式(3), (4)で与えられる。

$$\eta_I = a_I \cos(kx - \sigma t + \varepsilon_I) \quad (3)$$

$$\eta_R = a_R \cos(kx + \sigma t + \varepsilon_R) \quad (4)$$

ここで、 a_I, ε_I 、および a_R, ε_R は、それぞれ、入射波および反射波の振幅、位相である。また k は波数、 σ は角周波数である。したがって測点1、 $(x, y) = (x_1, 0)$ および測点2、 $(x, y) = (x_1 + \Delta l, 0)$ での水位 η_1, η_2 はそれぞれ式(5), (6)で表される。

$$\begin{aligned} \eta_1 &= (\eta_I + \eta_R)_{x=x_1} \\ &= a_I \cos(kx_1 - \sigma t + \varepsilon_I) \\ &\quad + a_R \cos(kx_1 + \sigma t + \varepsilon_R) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \eta_2 &= (\eta_I + \eta_R)_{x=x_1 + \Delta l} \\ &= a_I \cos(k\Delta l - \sigma t + kx_1 + \varepsilon_I) \\ &\quad + a_R \cos(k\Delta l + \sigma t + kx_1 + \varepsilon_R) \end{aligned} \quad (6)$$

一方、測点1、2での測定された水位波形は、有限フーリエ級数に展開することにより、各周波数成分毎に式(7), (8)で表すことができるため、

$$\eta_1 = A_1 \cos \sigma t + B_1 \sin \sigma t \quad (7)$$

$$\eta_2 = A_2 \cos \sigma t + B_2 \sin \sigma t \quad (8)$$

このフーリエ係数 A_1, B_1, A_2, B_2 (既知量) より、 a_I, a_R は次式で求めることができる。

$$\begin{aligned} a_I &= \frac{1}{2|\sin k\Delta l|} \left\{ (A_2 - A_1 \cos k\Delta l - B_1 \sin k\Delta l)^2 \right. \\ &\quad \left. + (B_2 + A_1 \sin k\Delta l - B_1 \cos k\Delta l)^2 \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} a_R &= \frac{1}{2|\sin k\Delta l|} \left\{ (A_2 - A_1 \cos k\Delta l + B_1 \sin k\Delta l)^2 \right. \\ &\quad \left. + (B_2 - A_1 \sin k\Delta l - B_1 \cos k\Delta l)^2 \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (10)$$

したがって、今、フーリエ級数に展開した i 成分波について、この方法で分離された入射波高を a_{Ii} 、反射波高を a_{Ri} とすると、式(2)に示した入射波のエネルギー E_I, E_R は次式で求められ、不規則波の反射率が算定される。

$$E_I = \Sigma \left(\frac{1}{2} w_0 a_{Ii}^2 \right) \quad (11)$$

$$E_R = \Sigma \left(\frac{1}{2} w_0 a_{Ri}^2 \right) \quad (12)$$

次に、図一17の右図に示すように、波峯線方向に一樣な入射波と反射波の間の角度が 2θ 、すなわち入射角 θ で入射した波とその反射波を分離する方法を示す。同図に示される座標軸のもとでは、入射波 η_I' 、反射波 η_R' はそれぞれ式(13), (14)で表され、測点1 $(x, y) = (x_1, 0)$ 、測点2 $(x, y) = (x_1 + \Delta l, 0)$ での水位 η_1', η_2' はそれぞれ式(15), (16)で与えられる。

$$\eta_I' = a_I \cos\{k(x \cos \theta + y \sin \theta) - \sigma t + \varepsilon_I\} \quad (13)$$

$$\eta_R' = a_R \cos\{k(x \cos \theta - y \sin \theta) + \sigma t + \varepsilon_R\} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \eta_1' &= (\eta_I' + \eta_R')_{x=x_1, y=0} \\ &= a_I \cos(kx_1 \cos \theta - \sigma t + \varepsilon_I) \\ &\quad + a_R \cos(kx_1 \cos \theta + \sigma t + \varepsilon_R) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \eta_2' &= (\eta_I' + \eta_R')_{x=x_1 + \Delta l, y=0} \\ &= a_I \cos(k\Delta l \cos \theta - \sigma t + kx_1 \cos \theta + \varepsilon_I) \\ &\quad + a_R \cos(k\Delta l \cos \theta + \sigma t + kx_1 \cos \theta + \varepsilon_R) \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、式(15), (16)を式(5), (6)と比較することにより、式(6)中の波高計間隔 Δl が式(16)では、 $\Delta l \cos \theta$ におきかかわっていることがわかる。このことは、図一17に示すように、入射波および反射波の進行方向への波高計間隔が $\Delta l \cos \theta$ となっていることから容易に理解される。したがって、この場合の分離入射波高 a_I 、および分離反射波高 a_R もそれぞれ式(9), (10)中の Δl を $\Delta l \cos \theta$ でおきかえて求めてやれば良いことがわかる。言いかえるならば、斜め入射波に対する分離推定法も、合田・鈴木他の示した分離推定法がそのまま適用できる。

以上の方法により、不規則波に対する反射率が算定できるが、本実験では水位測定を以下のように行った。

まず、断面実験では測点位置を堤体前方3mの地点とし、ここを中心に Δl 離れた2点に容量式波高計を設置し、水位を測定した。 Δl としては15cm, 20cm, 25cmを周期によって適宜用いた。

一方、平面実験では、前出図一3(1)~3(5)に示すように、堤体の前方へ2~3m離れた地点を中心に、容量式波高計を法線と直交方向にあらかじめ $\Delta l / \cos \theta$ 離して水位を測定した。こうすることにより、分離計算を行う上で必要となる f_{\max}, f_{\min} (対象とする有効周波数の上限、下限) は、 $\theta = 0^\circ$ の値をそのまま用いることができるため、解析上便利である。

断面実験および平面実験とも、100~120波の不規則波を対象として反射率を求めるため、データの記録は、造波と同時に始め、定常状態に達したのち100~120

表一六 水深及び構造諸元

水深	マウンド						ケーソン本体天端	
	ケース名	h_M (cm)	h' (cm)	B_M (cm)	h'/h	B_M/h	h_c (cm)	h_c/h
48.25	低マウンド	18.75	29.5	42.5	0.611	0.881	10.50	0.218
51.75		18.75	33.0	42.5	0.638	0.821	7.00	0.135
54.25		18.75	35.5	42.5	0.654	0.783	4.50	0.083

波を含む範囲まで行った。なお、解析には、不規則波解析装置を使用し、そのときのサンプリングデータ数は2048個/chである。

2.4 部材波力の測定

(1) 実験ケースと構造条件

曲面スリットケーソンの部材波力特性に関する実験（以後57年度実験と呼ぶ）における水深、マウンド高、天端高の条件は表一六に示すように、水深は4.825 cm、5.175 cm、5.425 cmの3種類とし、マウンド高は低マウンド（マウンド厚18.75 cm）、天端高は水深4.825 cmの静水面上1.05 cmである。また、消波部不透過ケーソンに隣接する曲面スリットケーソンの部材波力特性に関する実験（以後58年度実験と呼ぶ）においても、不透過ケーソンの影響を同一条件でみるため、同じ構造条件を採用した。

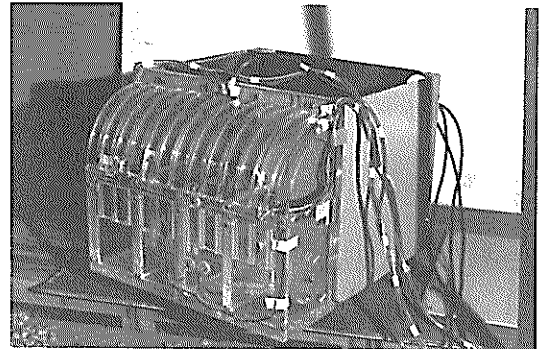
波の入射角については、57年度実験では反射率測定実験と同様の $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ の5種類としたが、58年度実験では $\theta = 15^\circ$ を除いた4種類とした。模型の平面的配置および測定面は前出の図一三(1)~3(5)に示す通りである。

(2) 模型

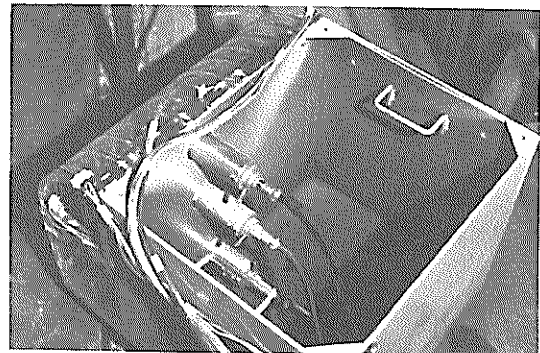
図一八、写真一五(1)、5(2)は、57年度実験における部材波力測定用の曲面スリットケーソン消波部模型を示したものである。構造諸元は表一七に示すように反射

率測定実験用の模型と原則的に同じであるが、図中の測点LP1, 2, 3, SP1~SP7の波圧計取付部の固有振動の影響を減少させるために、鉛直スリット壁部、消波部底板、隔壁、遊水室背後壁は板厚2 cmの亚克力合成樹脂板で作製している。このため、当模型では遊水室幅 l_2 は13 cmとなっている。

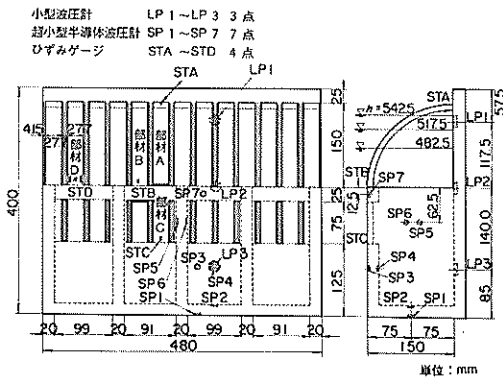
曲面スリット部材のうち、部材A, B, 部材Dは、それぞれ上端, 下端, 下端のみが固定端である片持梁形式となっており、固定端に貼られたひずみゲージにて、曲げモーメント（部材A, B）およびねじりモーメント（部材D）によるひずみを測定できるようになっている。このうち、部材Dのひずみゲージ貼付部はねじりモーメント



写真一五(1) 部材波力測定用曲面スリットケーソン模型



写真一五(2) 部材波力測定用曲面スリットケーソン模型



図一八 部材波力測定用曲面スリットケーソン消波部模型

表一七 部材波力測定用曲面スリットケーソン模型諸元

消波ケーソン	水深 h (cm)	マウンド	l_c (cm)	$\frac{l_c}{R}$	h_q (cm)	$\frac{h_q}{h}$	B_q (cm)	l (cm)	l_2 (cm)	$\frac{B_0}{h}$	$\frac{l_1}{h}$	$\frac{l_2}{h}$	ϵ
曲面スリット ケーソン ($R=14.5$ cm)	48.25	低マウンド	8.00	0.552	17.00	0.352	15.00	2.00	13.00	0.311	0.041	0.269	0.250
	51.75	低マウンド	4.50	0.310	20.5	0.396	15.00	2.00	13.00	0.290	0.039	0.251	0.250
	54.25	低マウンド	2.00	0.138	23.00	0.424	15.00	2.00	13.00	0.276	0.037	0.240	0.250

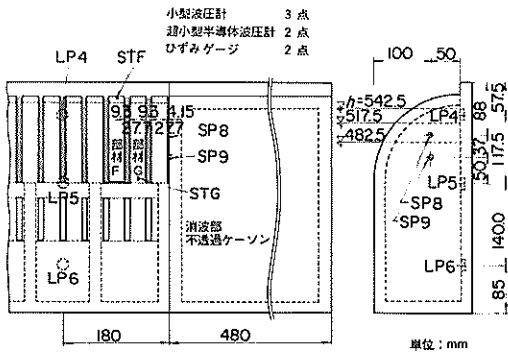
表一八 部材波力測定用部材諸元

部材名	部材厚 b (cm)	部材幅 a (cm)	部材長 l (cm)	曲率半径 R (cm)	θ_0 (rad)	I or J (cm^4)	E or G (g/cm^2)	固有振動数* f_N (Hz)	減衰定数 β
曲面スリット部材A	0.995	2.748		14.50	0.15014	0.2255	3.24277 $\times 10^7$	38.89	-
曲面スリット部材B								38.84	
								38.79	
								47.76	-
								41.24	
								39.29	
曲面スリット部材D	1.000	1.380 (測定部)		14.50	0.12408	0.2553	1.69099 $\times 10^7$	38.84	-
								34.78	
								34.48	
鉛直スリット部材C	0.500	2.750	6.60			0.0286	3.833 $\times 10^7$	-	-
曲面スリット部材F	1.008	2.760		14.50	0.14666	0.2356	2.7974 $\times 10^7$	36.83	0.059
								32.58	0.061
								31.50	0.056
								58.71	0.046
曲面スリット部材G								54.86	0.047
								46.57	0.049

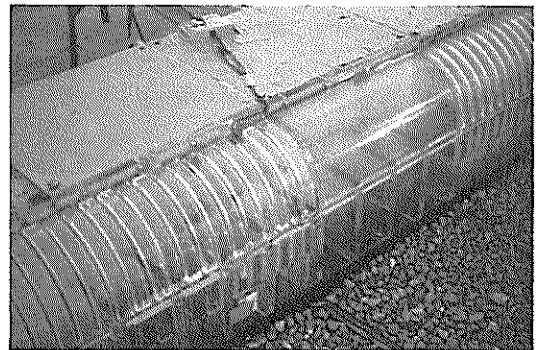
* 固有振動数は、上より、水深 48.25 cm, 51.75 cm, 54.25 cm における値である。

によるひずみ量を大きくして測定するため、局部的に部材幅を狭めた構造となっている。また、鉛直スリット壁の部材Cも、下端固定の片持梁形式となっており、曲げモーメントによるひずみを測定できるようにしている。部材Cは表一八に示すように部材長が短いため測定可能なひずみ量を生じるように部材厚を約 5 mm と薄くしている。

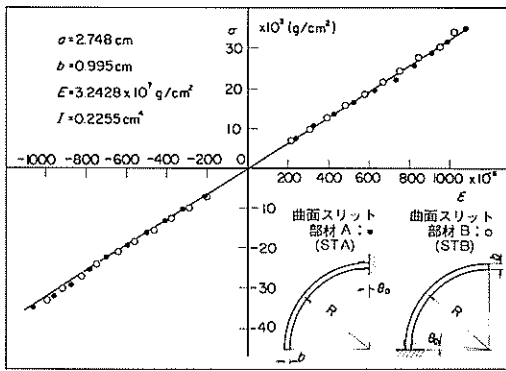
58年度実験に用いた消波部不透過ケーソン模型は、図一19、写真一6に示すように、曲面スリットケーソン消波部が完全に埋め込まれたものであり、他の模型と同様にアクリル合成樹脂板で製作されている。これには、図一19に示すように不透過壁面上部に2個の波圧計が埋め込まれている。当模型の上手側に隣接する曲面スリットケーソン模型は、57年度に用いた部材波力測定用



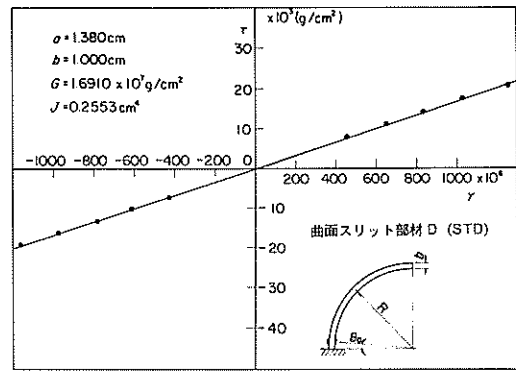
図一19 消波部不透過ケーソンとこれに隣接する曲面スリットケーソン消波部模型(部材波力測定用)



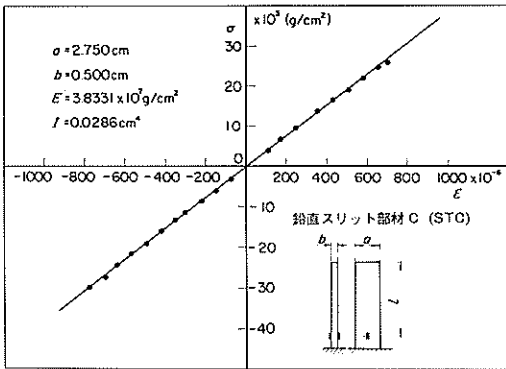
写真一6 消波部不透過ケーソンとこれに隣接する曲面スリットケーソン模型



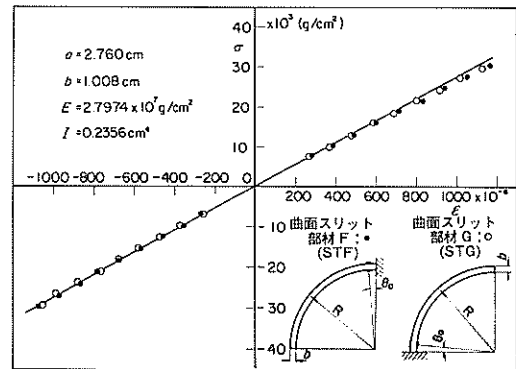
図一20 部材A, 部材Bの検定直線



図一22 部材Dの検定直線



図一21 部材Cの検定直線



図一23 部材F, 部材Gの検定直線

模型と同型であり、消波部不透過ケーソン直前の曲面スリット部材に働く波圧を測定するため、消波部不透過ケーソンより2本目、3本目のスリット部材(図一19中部材F, G)を片持梁形式として、固定端にひずみゲージを貼付している。また、遊水室背後壁では、同図に示す位置(LP4, LP5, LP6)にて、波圧計を固定できるようにになっている。

表一8は、ひずみ測定用部材の諸元を示したもので、表中の部材F, 部材Gの固有振動数 f_N および減衰定数 β は、3種類の実験水深において部材面を瞬間的にたたいたときの応答波形から、求めたものであるが、部材A, 部材B, 部材Dについては、実験で得られた測定波形のうち、固有振動の顕著な例から固有振動数を推定したものである。減衰定数については読み取りが難かしく示していない。このため部材A, 部材B, 部材Dの固有振動数は減衰定数の効果も含めた減衰振動数を表示している。また、表中の弾性係数 E および剛性係数 G は、後述する既知外力とそれによるひずみ量の関係から事前に求めたものである。図一20~23は、この時の検定直線を示したものであり、各部材とも線形性が良いことがわかる。

両実験とも、部材波力の測定はこの波力測定用模型1函のみで行い、模型の両側にはダミー模型として、反射

率測定実験に使用した模型を設置した。

(3) 測定項目

① 57年度実験

当実験における測定項目および測点は、表一9(1)に示すとおりである。

まず、部材波圧としては、遊水室背後壁にて3点(LP1, LP2, LP3)、消波部底板下の揚圧力(SP1)および底板内側(SP2)、消波部前面鉛直壁外側(SP3)および遊水室側(SP4)、遊水室隔壁の両側(波が直接あたる側SP5、その裏側SP6)および、曲面スリット部材の下端固定部(SP7)の合計10測点である。

曲面スリット部材表面および側面に作用する波圧を算定するために、片持部材A, Bの固定端(STA, STB)における曲げひずみと、片持部材Dの固定端(STD)におけるせん断ひずみを測定した。また、鉛直スリット部材表面に作用する波圧を算定するために、片持部材Cの固定端(STC)における曲げひずみを測定した。

② 58年度実験

58年度実験は、消波部不透過ケーソンに隣接する曲面スリットケーソンの部材波力特性がどのように変化するかを調べるものであり、図一19に示したように斜め入射波に対して消波部不透過ケーソンの上手側に位置す

表一9(1) 57年度実験測定項目

測定項目	測点	測定法
遊水室背後壁波圧	背後壁上段	LP1 小型波圧計
	" 中段	LP2 "
	" 下段	LP3 "
遊水室底板波圧	底板下面	SP1 超小型半導体波圧計
	" 遊水室側	SP2 "
前面鉛直透過壁 不透過部波圧	外側	SP3 "
	遊水室側	SP4 "
遊水室内隔壁波圧	波の入射方向側	SP5 "
	波の反射方向側	SP6 "
曲面スリット壁下端波圧	曲面スリット壁下端	SP7 "
片持型式曲面スリット部材 固定端曲げヒズミ	曲面スリット部材上端	STA 2ゲージ法
	" 下端	STB "
片持型式曲面スリット部材 固定端セン断ヒズミ	曲面スリット部材下端	STD 4ゲージ法
	鉛直スリット部材下端	STC 2ゲージ法

表一9(2) 58年度実験測定項目

測定項目	測点	測定法
遊水室背後壁波圧	背後壁上段	LP4 小型波圧計
	" 中段	LP5 "
	" 下段	LP6 "
片持型式曲面スリット部材 固定端曲げヒズミ	曲面スリット部材上端	STF 2ゲージ法
	" 下端	STG "
消波部不透過ケーソン 不透過壁波圧	不透過壁上部	SP8 超小型半導体波圧計
	"	SP9 "

る曲面スリットケーソンにおける遊水室背後壁にて波圧を3点(LP4, LP5, LP6)と、片持部材F, Gの曲面に作用する波圧を算定するために、同部材の固定端(STG, STF)における曲げひずみを2点測定した。また、消波部不透過ケーソン本体についても、曲面スリットケーソン消波部に面する側面にて波圧を2点(SP8, SP9)測定した。

(4) 測定法およびデータ処理法

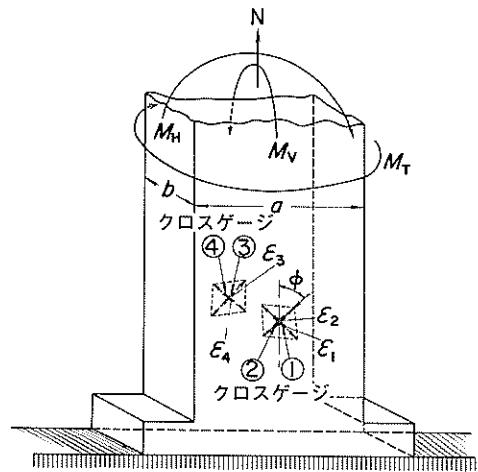
波圧およびひずみの測定は以下のように行った。

遊水室背後壁の測点LP1~LP3, LP4~LP6における波圧の測定には、容量100または200gf/cm²、受圧面の直径28mmの小型波圧計を用いた。当波圧計は、固有振動が約800Hz、減衰定数が0.01程度である。また、測点SP1~SP7, SP8, SP9では、容量100または200gf/cm²、受圧面直径10mmの超小型半導体波圧計を使用した。当波圧計の固有振動周波数は、約3000Hz

と大きい。

一方、部材ひずみの測定には、ゲージ抵抗120Ω、ゲージファクター2.05の防水型箔フェステルゲージを使用した。部材A, B, Cの測点STA, STB, STCおよび部材F, Gの測点STF, STGでは、同ゲージを部材の表裏に貼り、2ゲージ法にて測定した。当方法では、部材の軸力およびねじりモーメントによるひずみ量は消去され、曲げモーメントによるひずみ量のみが測定される。また、部材Dの測点STDでは、部材の表裏にクロスゲージを貼り、4ゲージ法にてねじりモーメントによるせん断ひずみを測定した。この方法では、図一24に示すように曲面スリット部材の表裏に、部材中心軸に対して45°の方向に貼られたクロスゲージを構成する個々のゲージ(①, ②および③, ④)は、ねじりモーメントM_Tによるひずみの他に、曲げモーメントM_Vと軸力Nによるひずみ(図中表参照)も同時に検知する。このため、個々のゲージのひずみ(ε₁, ε₂, ε₃, ε₄)は、これらの外力によるひずみの和が測定されることになる。そこで、ブリッジボックスを用いて、(ε₁-ε₂+ε₃-ε₄)が出力されるように合成してやれば、ゲージ貼付点でのねじりモーメントM_Tのみによる引っ張りあるいは、圧縮ひずみε_Tの4倍のひずみが出力されることになる。

また、部材長軸方向の曲げモーメントM_H(図示)によるひずみは、クロスゲージを中立軸に貼ることにより



ゲージ	ヒズミ	外力	M _T	M _V	M _H	N
①	ε ₁	ε _T	ε _T (cos ² φ-νsin ² φ)	0	ε _T (cos ² φ-νsin ² φ)	
②	ε ₂	-ε _T	ε _T (cos ² φ-νsin ² φ)	0	ε _T (cos ² φ-νsin ² φ)	
③	ε ₃	ε _T	-ε _T (cos ² φ-νsin ² φ)	0	ε _T (cos ² φ-νsin ² φ)	
④	ε ₄	-ε _T	-ε _T (cos ² φ-νsin ² φ)	0	ε _T (cos ² φ-νsin ² φ)	
ブリッジボックスで合成後	ε ₁ -ε ₂ +ε ₃ -ε ₄	4ε _T	(=2γ: φ=45°)			

図一24 クロスゲージに検出されるひずみ

0とみなすことができる。

一般に測定センサーに衝撃的な外力が作用したときには、センサーの動的応答効果によって作用外力の大きさを増幅して測定することがある。これは、外力の作用時間と測定センサーの固有振動周期および減衰定数の関係により異なり、例えば、対称三角形型の外力（作用時間 t ）を固有振動周期 T_n 、減衰定数 β の測定センサーで測定するとき、 $t/T_n = 1.0$ 、 $\beta = 0.05$ のときには、外力の振幅が約 1.4 倍に増幅されることが示されている⁵⁾。

本実験で使用した小型波圧計の場合には、固有振動周期が約 1.25 ms であり、外力の作用時間も衝撃的な外力の場合には、これと同程度と考えられるため、測定波圧データにはセンサーの動的な応答効果の影響がみられた。図一 25 の上は測点 LP 2 の測定例であり、外力作用後、測定センサーの固有振動波形がみられている。

部材ひずみを測定するひずみゲージの場合も同様であり前述の表一 8 で示したように、固有振動数は約 33 Hz ~ 59 Hz と小さいため、測定されたひずみデータにはセンサー（この場合、付加質量も含めた測定部材）の動的な応答効果による影響が含まれている。図一 26、27 の上はそれぞれ部材 F、G の測点 STF、STG におけるひずみデータ例である。この場合も、外力作用後、固有振動波形が残っているのがわかる。

本解析においては、一自由度振動系とみなしうる測定系からの応答波形（測定データ）から、元の真の外力を推定する応答-入力変換器（衝撃荷重演算器 ILM-100、和泉測器株式会社製）を使用した。当変換器による外力推定精度等の検討については、文献 6) を参照して頂きたい。

図一 25、26、27 の下は、同図上に示した応答波形（測定データ）を、適切に調節した応答入力変換器に通して得られた波形を示したものであり、比較的よく固有振動波形を消去していることがわかる。以上のような波形処理は、小型波圧計による波圧データおよび部材 A、B、D、F、G のひずみデータについてのみ行った。

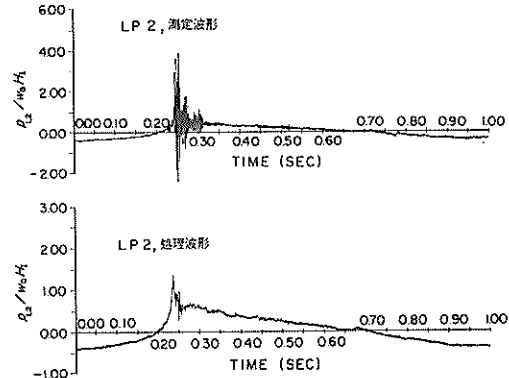
こうして得られた測定データの解析には、当研究室所有のミニコンピューターを用いた、その時のサンプリング周波数は 2000 Hz であり、対象とした波数は、造波板からの再反射を含まない有効波のみとした。

(5) 曲面スリット部材に作用する波圧の算定

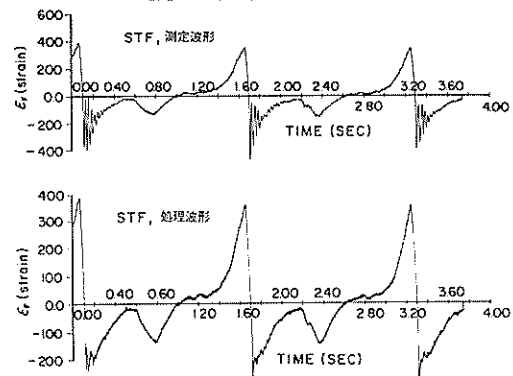
曲面スリット部材に働く波圧強度の一般式として、著者らは式(4)を提案している⁷⁾。

$$p = p_A \cos^2 \theta + p_B \sin^2 \theta \quad (4)$$

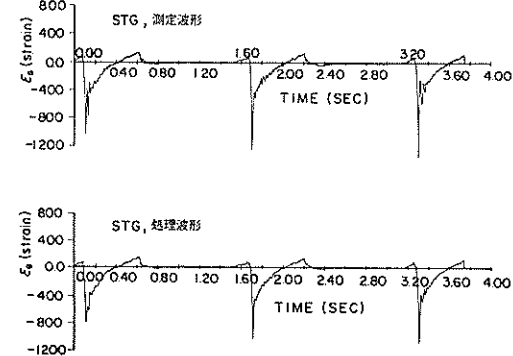
ここに、 θ は図一 28 に示しているように曲面スリット部材軸上各位置の曲率の中心 O からの方向と水平面と



図一 25 小型波圧計による波圧波形とその処理波形（測点 LP 2）



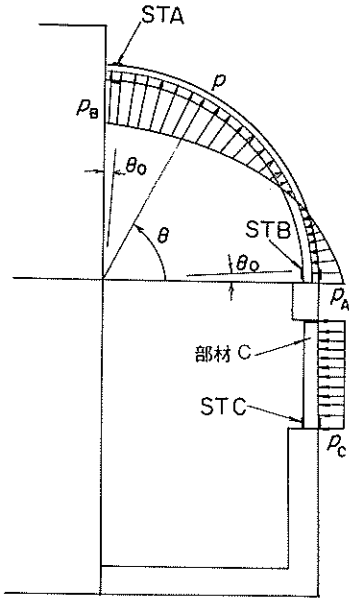
図一 26 ひずみゲージによるひずみ波形とその処理波形（測点 STF）



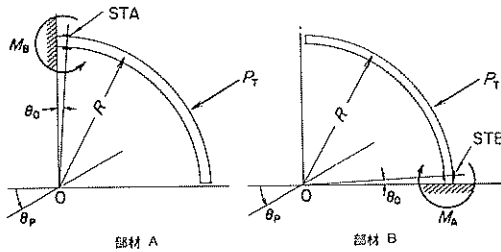
図一 27 ひずみゲージによるひずみ波形とその処理波形（測点 STG）

の間のなす角度であり、 p_A は $\theta = 0^\circ$ すなわち下端での波力強度、 p_B は $\theta = 90^\circ$ すなわち上端での波力強度である。本資料においても、式(4)の波圧分布を用いて、式中の p_A 、 p_B を求める。

p_A 、 p_B は、片持梁形式の曲面スリット部材の固定部における部材ひずみ量より以下のように求めることがで



図一28 曲面スリット部材と鉛直スリット部材の波圧分布



図一29 M_A, M_B の算定

きる。

図一29に示すように、式(17)で表わされる曲面スリット部材に作用する波圧の合力を P_T とすると、 P_T の作用線は必ず曲率の中心 O を通り、この作用方向と水平面とのなす図中反時計方向に測った角度を θ_p で表すことにする。合力 P_T は近接した部材A、部材Bに対し等しいと考えることができるから、部材Bのストレインゲージ STB の位置での曲げモーメント M_A 、Aのストレインゲージ STA の位置での曲げモーメント M_B はそれぞれ次式で表される。

$$M_A = P_T R \sin(\theta_p - \theta_0) \quad (18)$$

$$M_B = P_T R \cos(\theta_p + \theta_0) \quad (19)$$

ここに、 R は部材中心軸の曲率半径、 θ_0 は曲率中心と測点 STA、あるいは測点 STB を結ぶ直線と鉛直面あるいは水平面との間の角度である。

式(18)、(19)より、 P_T, θ_p について解くと式(20)、(21)となる。

$$P_T = \frac{\sqrt{M_A^2 + 4M_A M_B \cos \theta_0 \sin \theta_0 + M_B^2}}{R(\cos^2 \theta_0 - \sin^2 \theta_0)} \quad (20)$$

$$\theta_p = \tan^{-1} \left\{ \frac{M_A \cos \theta_0 + M_B \sin \theta_0}{M_A \sin \theta_0 + M_B \cos \theta_0} \right\} \quad (21)$$

したがって、 M_A, M_B を知れば P_T, θ_p が求まることになる。今、2ゲージ法による測点 STB のひずみ量 ϵ_B は部材表面におけるひずみ量の2倍であり、ここでの曲げモーメント M_A 、断面2次モーメント I 、弾性係数 E および部材厚 b との関係から得られる式(22)を用いて M_A が求まる。 M_B についても同様に式(21)より求まることのできる。

$$M_A = \frac{E I \epsilon_B}{b} \quad (22)$$

$$M_B = \frac{E I \epsilon_A}{b} \quad (23)$$

ここで、式(20)で与えられる波圧分布の水平方向合力および鉛直方向合力が、それぞれ、 P_T の水平方向成分および鉛直方向成分となることから、 p_A, p_B は式(24)、(25)で求まる。

$$p_A = \frac{P_T}{R a} (2 \cos \theta_p - \sin \theta_p) \quad (24)$$

$$p_B = \frac{P_T}{R a} (2 \sin \theta_p - \cos \theta_p) \quad (25)$$

なお、部材F、部材Gについても全く同様に求めることができる。

(6) 鉛直スリット壁部に作用する波圧の算定

曲面スリットケーソン前面透過壁の鉛直スリット部材に作用する波圧は、図一29に示したように一様分布として、この波力強度 p_c を求める。

片持梁形式のスリット部材Cの測点 STC における2ゲージ法のひずみ量を ϵ_c とすると、ここでの曲げモーメント M_C との間には式(26)が成り立つ。

$$M_C = \frac{E I}{b} \epsilon_c \quad (26)$$

ここで、 b は部材厚、 I は断面2次モーメント、 E は弾性係数である。

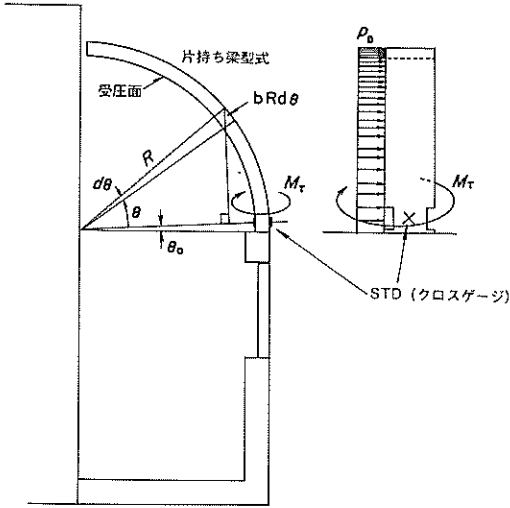
一様分布の波圧 p_c によるモーメント M_C は式(27)で与えられるため、最終的に p_c は式(28)で求まる。

$$M_C = \frac{1}{2} P_c l^2 a \quad (27)$$

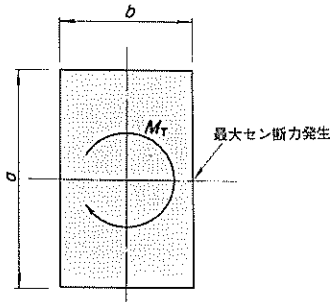
$$p_c = \frac{2 E I}{l^2 b a} \epsilon_c \quad (28)$$

ここで、 l はひずみゲージ位置から自由端までの距離、 a はスリット部材幅である。

(7) 曲面スリット部材側面に作用する波圧の算定



図一三〇 曲面スリット部材側面の波圧分布



図一三一 矩形断面のねじり

曲面スリット部材の側面に作用する波圧も図一三〇に示すように一様分布と仮定して、その波圧強度 p_D を以下のように求める。下端を固定した片持形式の曲面スリット部材 D の固定端 STD におけるひずみゲージから測定されるひずみ量は、(4)で述べたように、部材に貼られたゲージ方向の伸びあるいは圧縮ひずみの和であり、せん断ひずみではない。しかし、曲面スリット部材軸と 45° の方向に貼られたひずみゲージの場合には、その方向の圧縮あるいは引っ張りひずみの 2 倍が、せん断ひずみとなるため、4 ゲージ法により出力されるひずみ ϵ_D の $1/2$ がせん断ひずみになり、これから、ねじりモーメント M_T を介して、側面に作用する部材波圧 p_D が得られる。

一般に図一三一に示される矩形部材にねじりモーメント M_T を作用させたときの、せん断ひずみ γ および最大せん断力 τ_{\max} は、式(29)、(30)で与えられる⁸⁾。

$$\gamma = \frac{k b M_T}{G J} \quad (29)$$

$$\tau_{\max} = G \gamma \quad (30)$$

$$J = \frac{k_3 a b^3}{16} \quad (31)$$

ここで、 a 、 b はそれぞれ矩形断面の長辺および短辺の長さであり、 G は剛性係数、 J はねじり定数である。また、 k 、 k_3 はそれぞれ式(32)、(33)で与えられる係数である。

$$k = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n^2 \cosh(n\pi a/2b)} \quad (32)$$

$$k_3 = 16 \left\{ \frac{1}{3} - \frac{64b}{\pi^2 a} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{\tanh(n\pi a/2b)}{n^5} \right\} \quad (33)$$

一方、一様波圧強度 p_D による測点 STD によるねじりモーメント M_T は、式(34)で与えられる。

$$M_T = \int_0^{\frac{\pi}{2} - \theta_0} p_D b R^2 (1 - \cos \theta) d\theta \\ = p_D b R^2 \left[\frac{\pi}{2} - \theta_0 - \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_0\right) \right] \quad (34)$$

したがって、式(29)、(34)より p_D は式(35)で算定できる。

$$p_D = \frac{G J}{k b^2 R^2 \left[\frac{\pi}{2} - \theta_0 - \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_0\right) \right]} \gamma \\ = \frac{G J}{2 k b^2 R^2 \left[\frac{\pi}{2} - \theta_0 - \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_0\right) \right]} \epsilon_D \quad (35)$$

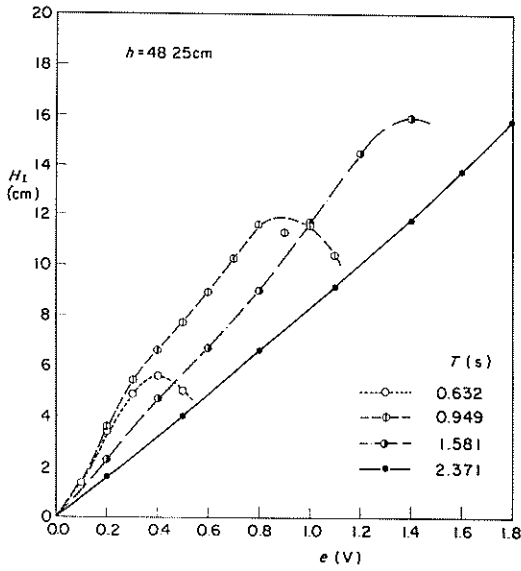
ここで、 ϵ_D は 4 ゲージ法により出力されるひずみ量であり、 θ_0 は測点 STD とスリット部材の曲率中心を通る線と水平線との角度である。

(8) 通過波高検定と波浪条件

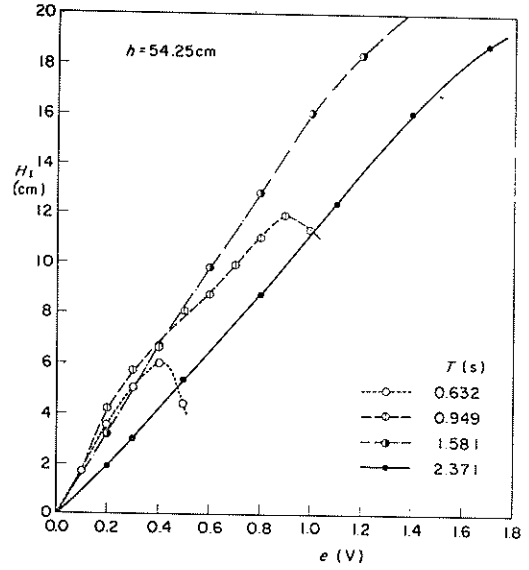
実験波としては、規則波を用いた。周期は 3 水深とも模型縮尺を $1/40$ とすると現地で $4s$ 、 $6s$ 、 $10s$ 、 $15s$ に対応する $0.632s$ 、 $0.949s$ 、 $1.581s$ 、 $2.371s$ とした。

実験前に、所要の波高を発生させるため、規則波信号の入力基準電圧 e (V) と発生波高 (通過波高) の関係を調べた。図一三二～三三は、それぞれ、水深 4.825 cm 、 5.175 cm 、 5.425 cm における通過波高を示したものである。この通過波高測定は、前出の図一三に示す位置を中心として、波長の $1/4$ を 1 辺とする正方形の 4 隅点にて容量式波高計により水位を測定したのち、造波板からの再反射を含まない範囲の有効波から得られる各測点の発生波の平均値として求めた。

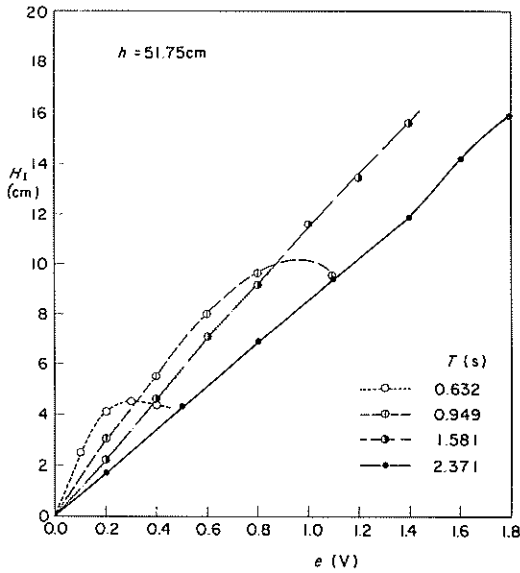
波高は各周期について 2～4 種類とし、表一 10 に示す合計 11 種類の規則波を用いた。



図一 32 入力基準電圧と発生波高の関係 (水深 48.25 cm)



図一 34 入力基準電圧と発生波高の関係 (水深 54.25 cm)



図一 33 入力基準電圧と発生波高の関係 (水深 51.75 cm)

表一 10 部材波力測定実験波浪条件

水深 h (cm)	周期 $T_{1/3}$ (s)	入力基準 電圧 e	波 高 H_1 (cm)	相対水深 h/L	波形勾配 H_1/L
48.25	0.632	0.24	3.75	0.775	0.0602
		0.31	5.00		0.0803
	0.949	0.57	8.25	0.352	0.0401
		0.76	11.00		0.0802
	1.581	0.53	6.00	0.161	0.0201
		0.80	9.00		0.0301
		1.04	12.25		0.0410
	2.371	1.29	15.50	0.0993	0.0518
		1.18	10.00		0.0206
		1.73	15.00		0.0309
51.75	0.632	0.17	3.75	0.831	0.0602
		0.30	4.50		0.0722
	0.949	0.38	5.50	0.375	0.0399
		0.62	8.25		0.0598
	1.581	0.78	9.50	0.169	0.0688
		0.52	6.00		0.0196
		0.79	9.00		0.0294
	2.371	1.07	12.25	0.103	0.0400
		1.36	15.50		0.0506
		1.16	10.00		0.0200
54.25	0.632	1.73	15.00	0.871	0.0299
		0.21	3.75		0.0602
	0.949	0.25	5.00	0.392	0.0803
		0.29	5.50		0.0397
	1.581	0.55	8.25	0.174	0.0596
		0.81	11.00		0.0794
		0.37	6.00		0.0193
	2.371	0.56	9.00	0.106	0.0289
		0.76	12.25		0.0393
		0.96	15.50		0.0498
2.371	0.90	10.00	0.106	0.0196	
	1.23	15.00		0.0293	

3. 反射率測定結果

3.1 断面実験における反射率

(1) 直立消波ケーソンの反射特性

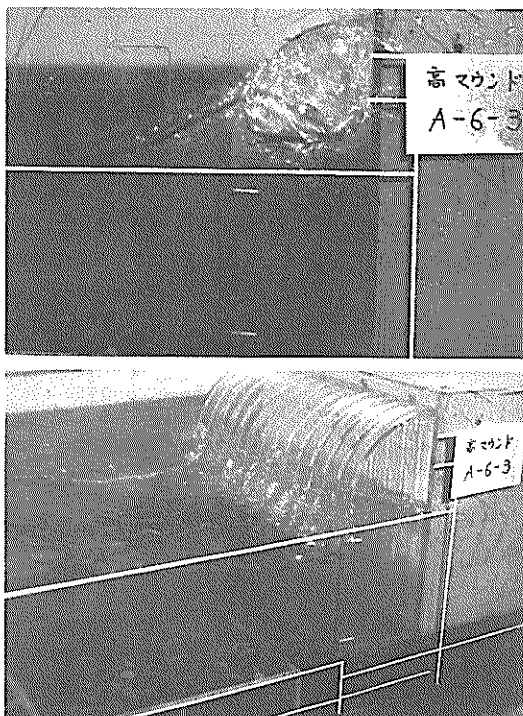
直立消波ケーソンは前面が透過壁で、内部に遊水室を有し、これによって消波効果を発揮するケーソンであり、近年各地の防波堤や護岸に使用されつつある。現在、この種のケーソンとしては、縦スリットケーソン⁹⁾、横スリットケーソン¹⁰⁾、曲面スリットケーソン、マルチセルラーケーソン¹¹⁾、2重縦スリットケーソン等、種々のタイプがあり、それらの水理特性が研究されている。

一般に、このような直立消波ケーソンの特徴としては次の事項があげられる。

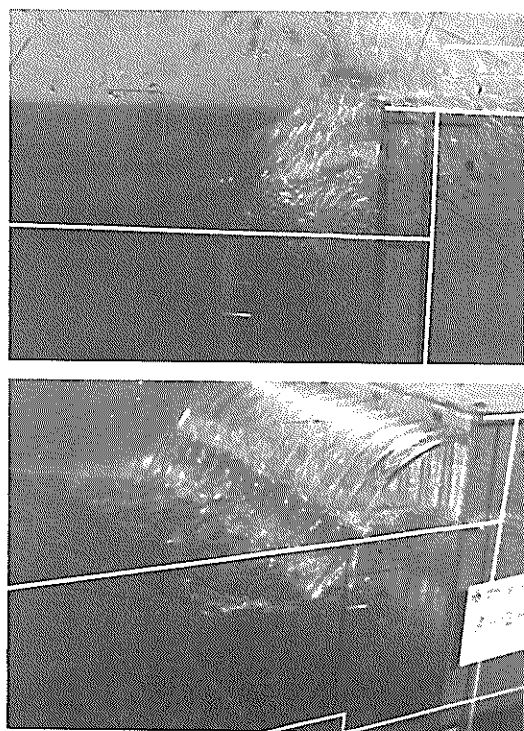
- ① 反射波を軽減することができる。
- ② 越波伝達波を軽減することができる。
- ③ 波力を緩和することができる。
- ④ 海水の曝気機能を促がす。

このうち、縦スリットケーソンの反射率に関してみると、遊水室幅が最も影響をあたえ、これが入射波波長の15～20%の場合に反射率が極小となっている。これは、遊水室内外の水深が大きく違わない場合には、遊水室内における重複波の節の近傍に透過壁があり、ここでの水平流速が大きくなる条件である。このため、透過壁の背後には多くの渦が形成され、これが水の粘性により減衰してしまうことにより波のエネルギーは消費されることになる。このときのエネルギーの消費量は、透過壁部材が発揮する抗力のなす仕事量より求めることができ、抗力が大きいほど、消費されるエネルギーは多くなる。したがって、直立消波ケーソンの反射率を低減させるためには、透過壁部材近傍での水平流速を増し、透過壁部材の抗力係数が大きい構造であることが望ましい。これとは、逆に、透過壁位置が遊水室内重複波の腹の位置にあたる場合には、水平流速は小さくなり部材に働く抗力も小さくなるため、エネルギーは消費されず、反射率は大きなものとなる。このような条件のもとでは、2重縦スリットケーソンのように、遊水室内にもう1枚の透過壁を設けることは、波のエネルギーを消費する上で効果があると言える。

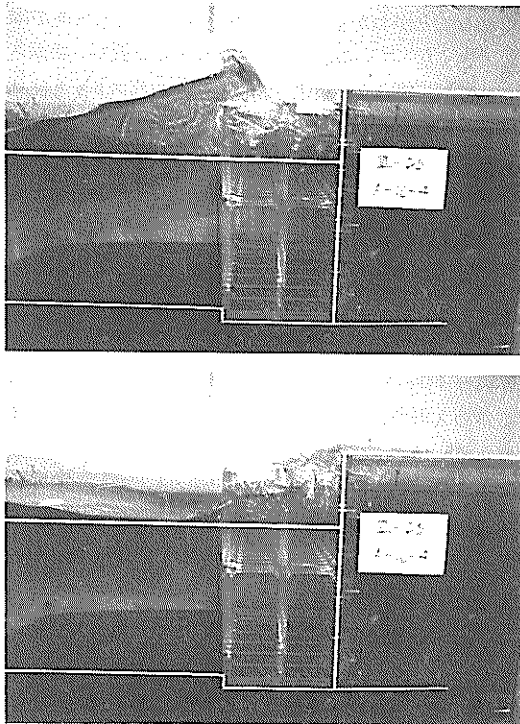
直立消波ケーソンの反射率は、入射波の条件の他に、構造的条件によっても異なり、縦スリットケーソンを例にとった著者らの研究¹²⁾によると、入射波の波高、周期、遊水室幅の他に、遊水室内の水深、透過壁の厚さおよび開口比がパラメーターとして反射率に影響することが知られている。



写真一 曲面スリットケーソンへの波の作用状況（高マウンド）



写真一 曲面スリットケーソンへの波の作用状況（低マウンド）

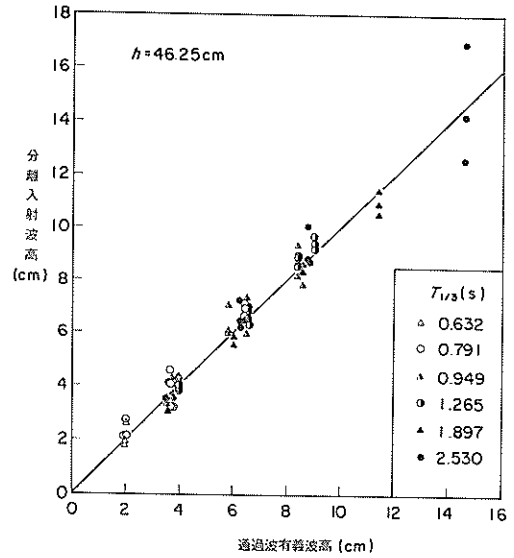


写真一 9 2重縦スリットケーソンへの波の作用状況

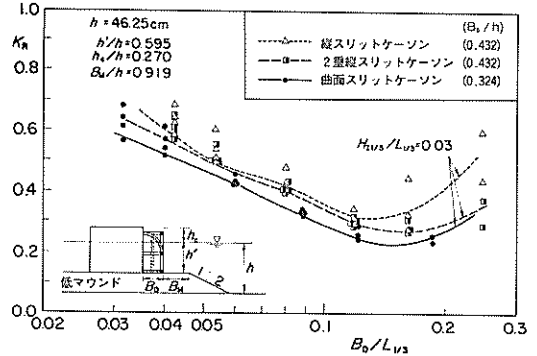
(2) 各種消波ケーソンの反射率

曲面スリットケーソンに波が作用する状況を写真一 7, 写真一 8 に示す。この時の水深は 46.25 cm であり, マウンド高は, 写真一 7 が高マウンド ($h'/h=0.459$), 写真一 8 が低マウンド ($h'/h=0.595$) である。これらの写真は不規則波群中の比較的波高の大きいときのものであり, 両ケースともケーソン天端に波面が強くあたり越波を生じていると同時に, 遊水室内では空気を閉じ込め非常に乱れた状態となっていることがわかる。引き波時には, 遊水室内外での水位差が大きく, スリット部分から勢いよく水塊が噴出していることがわかる。実験時の目視観測では, 高マウンドのケースの方が, 概してスリット部からの水塊の噴出が激しく, 遊水室内の乱れの程度が大きいように感じられた。

写真一 9 は, 低マウンド上の 2 重縦スリットケーソンに, 不規則波を作用させたときのものである。波面は消波部前端を乗り越え, 上段にある水平スリット部からも, 遊水室内に侵入している。遊水室内では, 中間の鉛直スリット壁により, 侵入してきた水塊がさえぎられながらも, さらに遊水室奥へと勢いよく侵入していることがわかる。しかし, 当ケーソンの場合には, 曲面スリットケーソンの場合と異なり, それほど空気の混入が顕著でないことがわかる。



図一 35 通過波有義波高と分離入射波高の関係



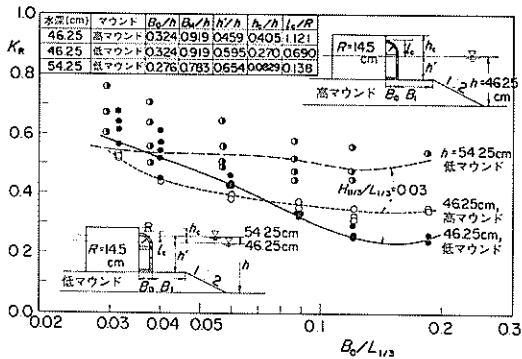
図一 36 各種消波ケーソンの反射率

図一 35 は, 水深 46.25 cm で低マウンドの条件における全実験ケースについて, 通過波高と分離入射波高の相関を示したものであり, 波高の大きい場合を除いて, 両者はほぼ一致している。

図一 36 は, 水深 46.25 cm, 低マウンドの条件において, 曲面スリットケーソン, 縦スリットケーソン, 2 重縦スリットケーソンの反射率を, 横軸に有義波周期に対する波長で無次元化したケーソン消波部幅 $B_0/L_{1/3}$ をとって示したものである。3 種類の消波ケーソンとも $B_0/L_{1/3}$ が 0.1 ~ 0.2 で反射率が極小となる傾向を示しているが, 中でも曲面スリットケーソンの反射率が最も小さく, ついで 2 重縦スリットケーソン, 縦スリットケーソンの順に反射率は大きくなる傾向にある。図中の実線, 破線, 点線はそれぞれ分離入射波高から求まる波形勾配が 0.03 のときの曲面スリットケーソン, 2 重縦スリットケーソン, 縦スリットケーソンの反射率を示したもので

であり、それぞれの極小反射率は、0.23, 0.27, 0.32 である。縦スリットケーソンと2重縦スリットケーソンでは、極小条件より小さな $B_0/L_{1/3}$ の場合には、反射率の大きな違いは無いが、 $B_0/L_{1/3}$ が約0.15を越える場合には、2重縦スリットケーソンの反射率は縦スリットケーソンのそれより顕著に小さくなっている。これは、 $B_0/L_{1/3}$ が大きくなるにつれ、縦スリットケーソンでは、前項で述べた反射率が大きくなる条件、すなわち、スリット壁位置が遊水室内重複波の腹の位置に対応してくるためであり、重複波の節の位置に、もう1枚の鉛直スリット壁を有する2重縦スリットケーソンの場合には反射率は小さくなっている。

また、曲面スリットケーソンの反射率は、極小条件に近い $B_0/L_{1/3}$ の場合には、データのちらばりが小さく、波高の違いによる反射率の違いは小さいことがわかる。



図一37 曲面スリットケーソンの反射率

図一37は、曲面スリットケーソンについて、水深およびマウンド高の構造的条件が変化したときの反射率を比較したものである。図中白丸は、水深が4.625 cmで、マウンドが高い状態における反射率であり、このときの h/h' は0.459である。黒丸で示す低マウンドの場合と比較して、極小条件における反射率は大きくなっているものの、 $B_0/L_{1/3}$ が小さい条件すなわち比較的長周期の波に対して反射率が減少し、しかも波高の違いによる反射率の違いは無いことがわかる。このように、周期の長い波に対して反射率が減少するのは、次のような理由が考えられる。高マウンドでは、前面透過壁下部の不透過部の位置が高くなるため遊水室内外の水位差が大きくなり、スリット部からの水塊の噴出速度が増すと同時に遊水室内での乱れの度も大きくなる。このため、エネルギーの消費が増すものと考えられる。

図中、半黒丸は低マウンドで、水深が5.424 cmと大きい条件のもとの反射率であり、一見して、反射率は大

きくなることわかる。特に、極小条件での反射率が顕著に大きくなっている。これは、静水面の位置が、曲面スリット部材上端の直下にあり、静水面と曲面スリット部材下面とのクリアランスが非常に小さい条件 ($L_c/R=0.138$) であるため、入射波は大きく乱れることなく反射されるためであると考えられる。また、波高の違いによる反射率の違いは大きい、これは波高の大きい波では越波により波のエネルギーの一部が伝達されるためであると考えられる。

3.2 波向きによる反射率の変化

写真一10~12は、水深4.625 cm、低マウンドにおける斜め入射波の作用状況を示したものであり、入射角は順に $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ である。

図一38~41は、各実験ケースにおける反射率を横軸に $B_0/L_{1/3} \cos \theta$ を取って示したものである。このパラメーター $B_0/L_{1/3} \cos \theta$ は入射角 θ で入射する波の方向に測ったケーソン消波部幅 $B_0/\cos \theta$ を入射波の有義波周期に対する波長で無次元化したもので、斜め入射波に対する見掛け上の相対消波部幅である。また、図中に示す線は、各入射波角度毎に分離入射波高から得られる $H_{1/3}/L_{1/3}$ が0.03となる場合の反射率である。

このうち、図一38, 39は、水深4.625 cmのもとのマウンド高が、低マウンドおよび高マウンドの場合の反射率である。低マウンドでは $B_0/L_{1/3} \cos \theta$ でよく整理でき、これが0.1~0.25のときに極小値を持つ傾向を示し、そのときの反射率は、 $H_{1/3}/L_{1/3}$ が0.03のときには約0.28~0.4であった。 $\theta=60^\circ$ のときには、極小条件での反射率は他の θ の場合より大きくなっているが、全体に $B_0/L_{1/3} \cos \theta$ がこの条件より大きくなるにつれて、反射率は大きくなる傾向を示している。

一方、高マウンドの条件でも $B_0/L_{1/3} \cos \theta$ によってよく整理されているが、 $B_0/L_{1/3} \cos \theta$ が低マウンドでの極小条件より小さい条件まで反射率は低く、全体に低マウンドのときより反射率は低くなっており、 θ の違いによる影響があまり顕著でない。波高の差による反射率の差も小さくなっており、図一37で示した断面実験の結果と同じ傾向を示している。

図一40, 41は水深が4.825 cm, 5.425 cmにおける反射率を示したものである。このうち、水深が4.825 cmのときには、図一38の水深が4.625 cmの場合とほとんど同様に反射率は変化している。しかし、 $\theta=45^\circ$ の場合には、 $B_0/L_{1/3} \cos \theta$ が0.07~0.2にかけて反射率は大きくなっている。これは、模型から反射された波が、水槽の側壁に直角にあたり、完全に消波しきれない再反射波が再び模型に戻ってくることによる影響である

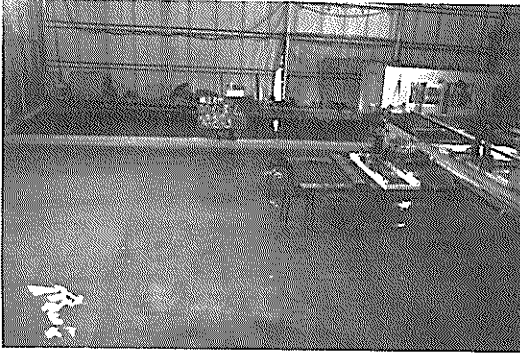


写真-10 斜め入射波に対する反射率の測定 (入射角 0°)

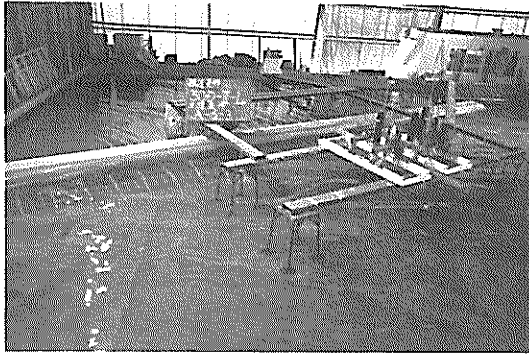


写真-11 斜め入射波に対する反射率の測定 (入射角 30°)

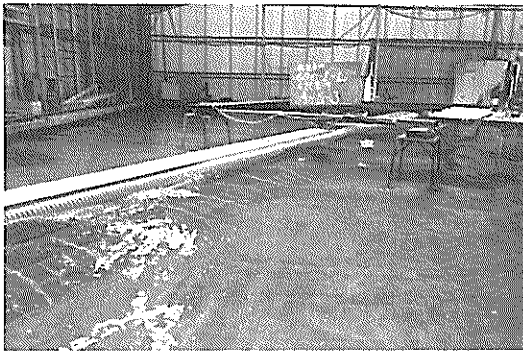


写真-12 斜め入射波に対する反射率の測定 (入射角 60°)

うと考えられる。水深が 5.425 cm の場合には、反射率は大きくなっており、波高の違いによる反射率の違いも大きいことがわかる。図-37 に示した断面実験における同じ条件での反射率と比較すると多少大きな値となっているが、この原因については不明である。

次に、波が斜めに入射することにより、見掛け上の遊水室幅が変化する影響をみるため、同一周期の波に対する反射率の変化を示したのが図-42~45である。波形勾配は 0.03 と一定の条件である。矢印が右へ移るにし

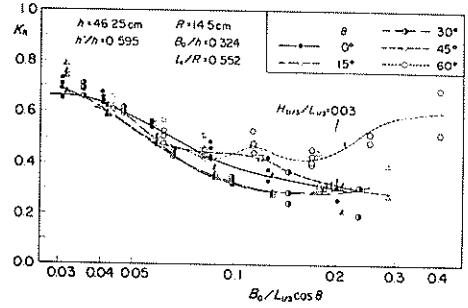


図-38 斜め入射波に対する反射率 (水深 4.625 cm , 低マウンド)

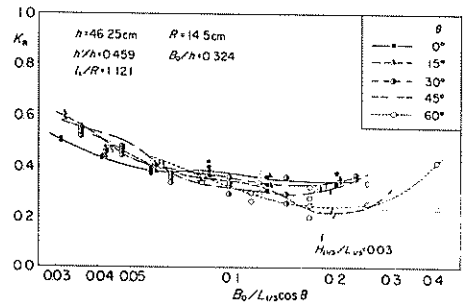


図-39 斜め入射波に対する反射率 (水深 4.625 cm , 高マウンド)

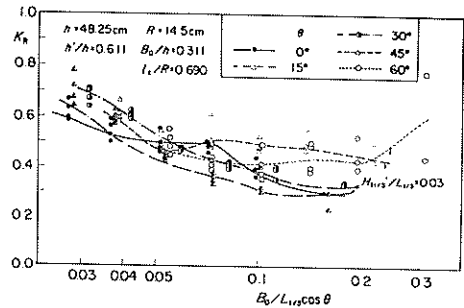


図-40 斜め入射波に対する反射率 (水深 4.825 cm , 低マウンド)

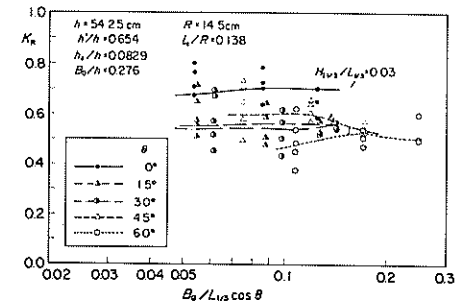


図-41 斜め入射波に対する反射率 (水深 5.425 cm , 低マウンド)

たがい見掛け上の遊水室幅は長くなっている。

なお、入射角が 45° の場合には、前述したように側壁からの再反射の影響のため傾向から逸脱していると考えられるケースもあり、この場合にはこれを考慮していない。

図一42, 43 はそれぞれ水深 $4.6.25 \text{ cm}$ の低マウンド、高マウンドの条件に対応するものであり、図一44, 45 はそれぞれ水深 $4.8.25 \text{ cm}$, $5.4.25 \text{ cm}$ の低マウンドの条件に対応するものである。

図一43 に示す水深 $4.6.25 \text{ cm}$ の高マウンドの条件では、静水面付近に隔壁が存在しており、見掛け消波部幅の概念が適用できず、有義波周期の短い波では反射率の変化は小さかった。

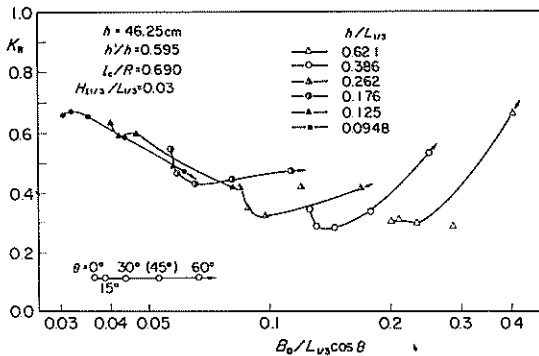
井島、奥田¹³⁾らは、遊水室を有する護岸の斜め入射波に対する反射率の変化を隔壁の有無を考慮して述べている。それによると、入射角が増すことにより隔壁があるときの反射率の変化は、隔壁がないときと比べて小さいことを示している。

しかし、水深 $4.6.25 \text{ cm}$ の低マウンド、水深 $4.8.25 \text{ cm}$ の条件のように隔壁の影響が小さい場合には、総じて極小条件である $B_0/L_{1/3} \cos \theta$ が $0.1 \sim 0.25$ より小さい範

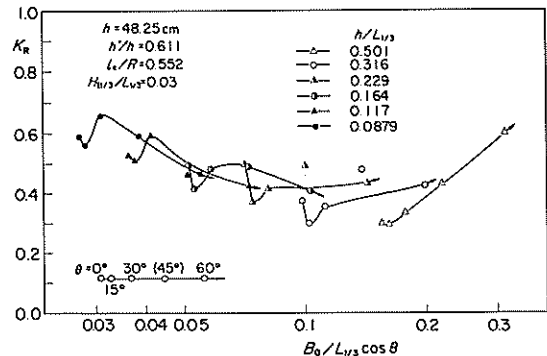
囲では、見掛け上の消波部幅が長くなるにつれて、反射率が減少し、これを越えるときには逆に反射率が増加する傾向にある。

水深が $5.4.25 \text{ cm}$ のとき(図一41, 45)には、静水面と曲面スリット部材上端との鉛直距離が小さい条件であるため、反射率は大きくなっているが、このことは次のように考えることもできる。すなわち、水位が高いため静水面上での曲面スリット部材とケーソン背後壁の水平距離(遊水室幅に相当する幅と考えられる)が小さくなり、相対消波部幅という概念で考えると、きわめて小さい $B_0/L_{1/3} \cos \theta$ に対応する条件であると考えられることができる。

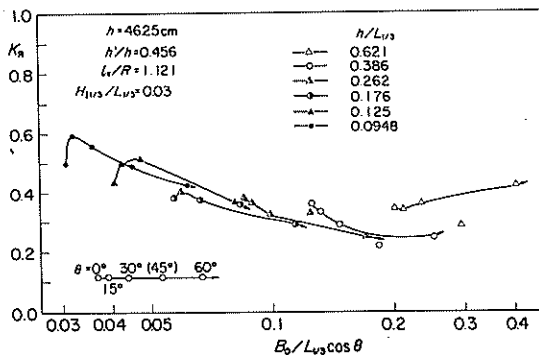
そこで、参考として著者らが提案した規則波に対する縦スリットケーソンの反射率の算定法¹⁴⁾を利用して、当実験における各入射角度の見掛け遊水室幅に対する反射率を算定し、図一46 に示す。このときの計算条件は、曲面スリット部材の下部に静水面があり、縦スリットケーソンに比較的近い条件となる水深 $4.6.25 \text{ cm}$ 、低マウンドの条件であり、計算に用いるケーソン前面水深をマウンド上の水深、周期を有義波周期とした。また、波高は波形勾配で 0.03 となる波高であり、開口比、スリッ



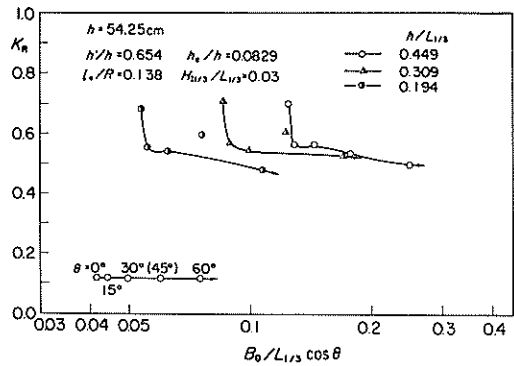
図一42 見掛けの消波部幅の影響(水深 $4.6.25 \text{ cm}$, 低マウンド)



図一44 見掛けの消波部幅の影響(水深 $4.8.25 \text{ cm}$, 低マウンド)



図一43 見掛けの消波部幅の影響(水深 $4.6.25 \text{ cm}$, 高マウンド)



図一45 見掛けの消波部幅の影響(水深 $5.4.25 \text{ cm}$, 低マウンド)

ト部材厚は曲面スリットケーンと同じ値を用いた。計算値は周期によって異なるが、総じて $B_0/L_{1/3} \cos \theta$ が 0.1

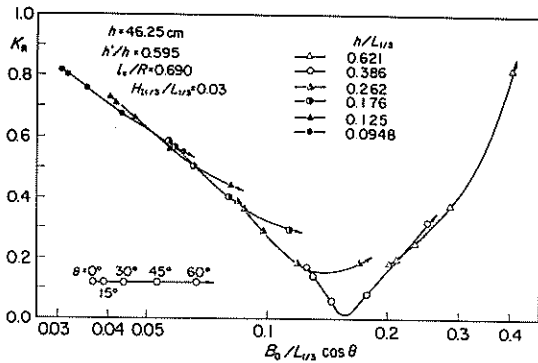


図-46 縦スリットケーンにおける消波部幅の変化による反射率の変化

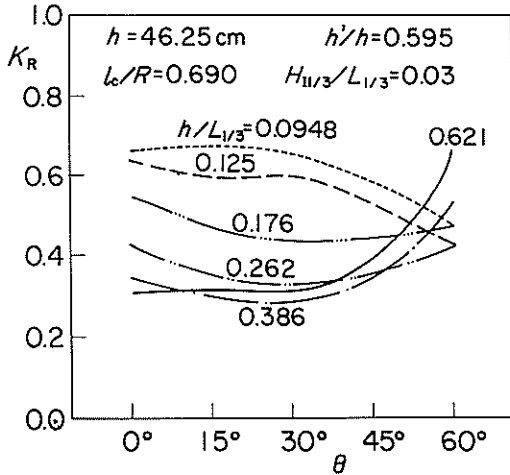


図-47 入射角の変化による反射率の変化 (水深 4.625 cm, 低マウンド)

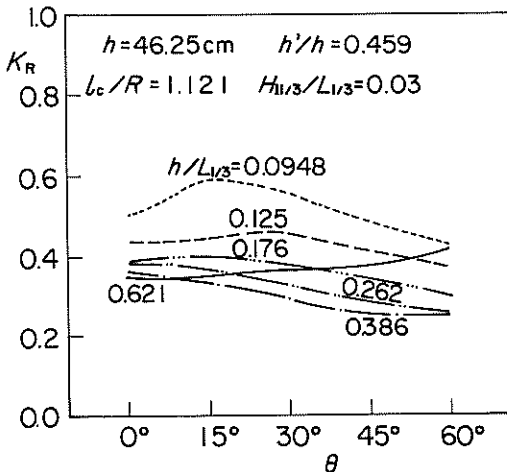


図-48 入射角の変化による反射率の変化 (水深 4.625 cm, 高マウンド)

~0.2 のとき極小となっており、図-42 に示した曲面スリットケーンの実験結果と同じ傾向を示している。ただ、ここで求めた反射率は規則波に対するものであり、極小条件付近での値は、実験値より小さくなっている。不規則波実験では多数の周波数成分が含まれているため、図-42 に示すように反射率がこの計算値程に小さくならないのが一般である。また、 $B_0/L_{1/3} \cos \theta$ が小さい範囲は、周期が長い条件であり、波形勾配一定のもとでは波高は大きくなっている。そのため、このような条件では越波によりエネルギーが堤体背後に伝達され、反射率が計算値より小さくなっていると考えられる。以上のことを考慮すると、傾向として、この条件下での斜め入射波に対する曲面スリットケーンの反射率は、見掛けの相対遊水室幅に応じて変化していることがわかる。

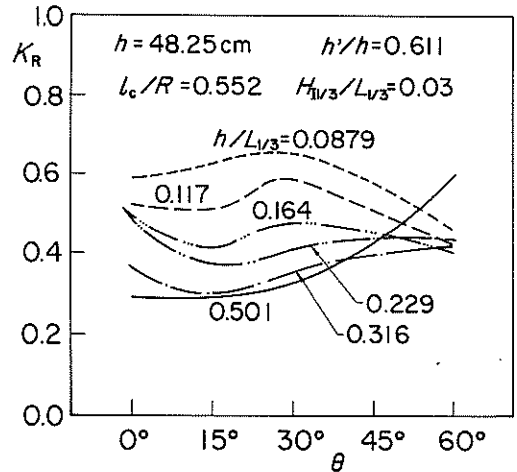


図-49 入射角の変化による反射率の変化 (水深 4.825 cm, 低マウンド)

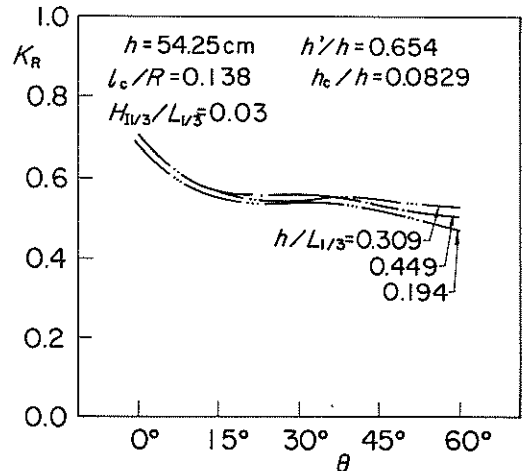


図-50 入射角の変化による反射率の変化 (水深 5.425 cm, 低マウンド)

図-47~50は、横軸に入射角 θ をとり、反射率の変化をみたもので、図-47, 49に示す水深46.25cm(低マウンド)、48.25cmの条件では、入射角が増すにつれ、反射率は長周期の波程小さくなり、短周期の波程大きくなる傾向にあることがこれからもわかる。図-50に示した水深54.25cmの場合には、波の種類が3種類と少なくなり、周期の違いによる傾向はわからないが、ここに示した周期の波については、入射角が 0° から 15° にかけて反射率は減少する傾向を示しているが、それより大きい θ については大きな変化はない。

工藤、長友、辻¹⁵⁾らは、斜め入射の規則波を用いて、直立消波構造物の反射率を実験により求めている。これによると、長周期の波ほど、入射角が増すにしたがい反射率は減少しており、逆に、短周期の波ほど、反射率は増加することを示している。

4. 部材波力測定結果

4.1 波圧の測定例

57年度に行った斜め入射の規則波に対する曲面スリットケーソン部材の波圧の測定状況を写真-13~15に示す。当写真は順に $\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ の場合であり、水深は48.25cm、周期1.581s、波高15.5cmである。 $\theta=0^\circ$ のときには、曲面スリット部材上を波が越波する

と同時に、遊水室内に閉じ込められた空気の噴出により水しぶきがあがっているのがわかる。このようなときには、空気圧縮による衝撃的波圧が発生し、遊水室内壁に伝達して作用することが知られている。写真-15に示すように、 $\theta=60^\circ$ となると、反射率が下がるため堤前での重複波高も小さくなり、遊水室内の空気を圧縮する効果も小さく、越波量も少なくなっていることがわかる。

図-51~52(4)はミニコンピューターで処理した波圧波形および部材ひずみ波形である。波圧は受圧面に作用する方向を正とし、 $w_0 H_I$ で無次元化して示してある。このうち、図-51は、写真-13に示す条件での波圧測定例であり、遊水室背後壁の測点LP1, LP2, LP3における波圧 p_{L1}, p_{L2}, p_{L3} はともに鋭い立ち上がりの衝撃的波圧波形となっている。測点LP1, LP2では、約 $1.8 w_0 H_I$ 、測点LP3では約 $1.2 w_0 H_I$ の波圧が同時に発生していることがわかる。

図-52(1)は、写真-14に示す $\theta=30^\circ$ での遊水室背後壁の測点LP1~LP3における測定例である。この例では、測点LP1にて立ち上りの比較的鋭い波圧波形となっているが、ピーク値は約 $0.9 w_0 H_I$ と $\theta=0^\circ$ の場合と比較して小さくなっている。測点LP2, LP3にても若干の衝撃的な波圧が感じられるものの約 $0.8\sim 0.9 w_0 H_I$ と小さくなっている。

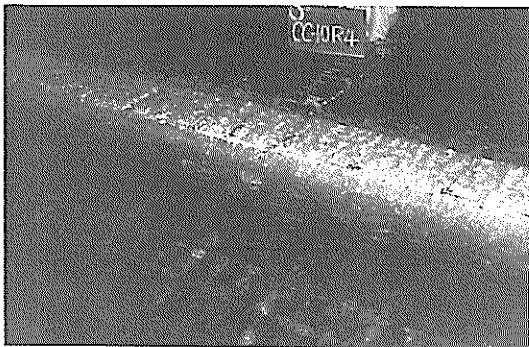
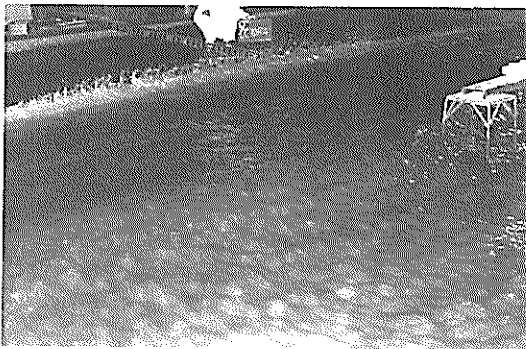


写真-13 規則波の作用状況 ($\theta=0^\circ$)

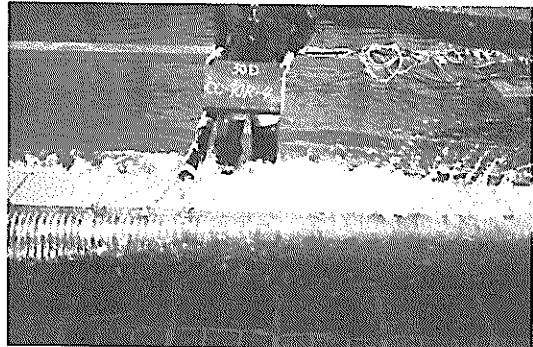
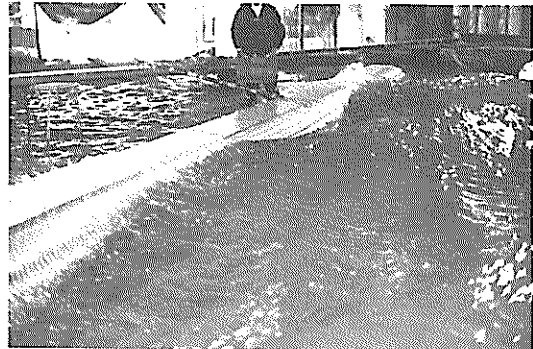


写真-14 規則波の作用状況 ($\theta=30^\circ$)

図-52(2)は、それぞれ測点SP1~SP7における波圧 $p_{S1} \sim p_{S7}$ である。遊水室内の測点SP2, SP4, SP6では、波圧は比較的静的に変化しているが、ピーク付近ではわずかながら、衝撃波圧の影響が現われている。しかし、その大きさは小さく、測点SP2, SP5, SP6では約 $0.6w_0H_I$ 、測点SP4では約 $0.9w_0H_I$ となっている。一方、ケーソン前面の波が直接あたる測点SP7およびその鉛直スリット壁下の測点SP3では、波圧は静的に変化しているものの約 $1.1w_0H_I$ と遊水室内より大きくなっている。また、底板下の測点SP1での揚圧力は静的であり、約 $0.3w_0H_I$ と小さい。

図-52(3)は、同時差圧の測定例である。同時差圧についてはケーソン外側から作用する力、あるいは波が入射してくる側から作用する力(隔壁)を正としている。底板における同時差圧($p_{S1} - p_{S2}$)は遊水室内の波圧がピーク値に達する前の負圧の時に、揚圧力は最大となっているため、ピーク値は約 $0.7w_0H_I$ と測点SP1, SP2の個々の波圧ピーク値より大きくなっている。また、遊水室内で波圧が最大となるときには、同時差圧は負となっているが、その大きさは、約 $-0.3w_0H_I$ とその絶対値は小さくなっている。前面透過壁下部の不透過壁に作用する同時差圧($p_{S3} - p_{S4}$)は、底板での同時差圧($p_{S1} - p_{S2}$)と同様に位相の違いにより、正のピーク値は約1.5

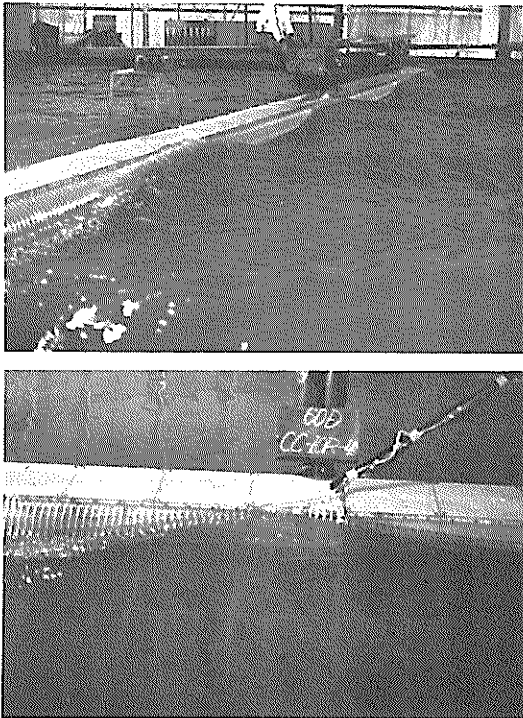


写真-15 規則波の作用状況 ($\theta = 60^\circ$)

w_0H_I と、個々の波圧ピーク値より大きくなっている。隔壁に働く同時差圧($p_{S5} - p_{S6}$)の正のピーク値は個々の波圧ピーク値(約 $0.6w_0H_I$)より小さく、約 $0.3w_0H_I$ である。また、波が入射するときには正、引き波のときには負となっている。

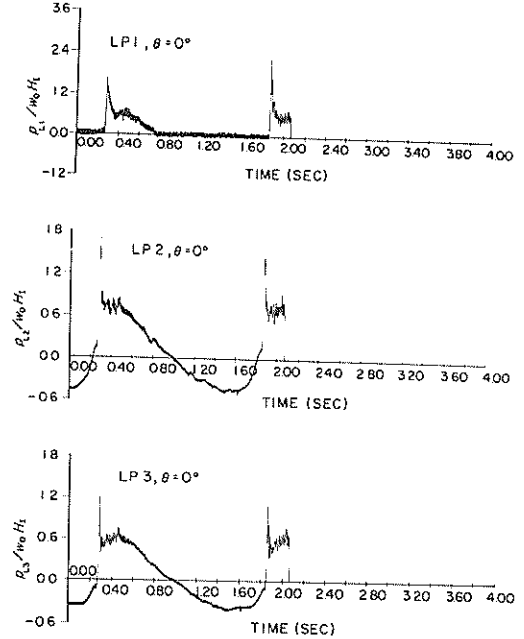


図-51 波圧波形 ($\theta = 0^\circ$, 水深 48.25 cm)

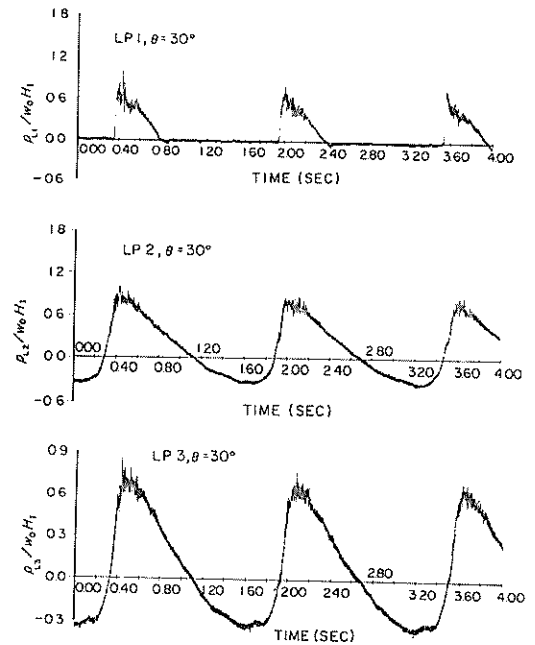
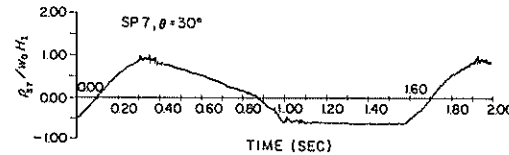
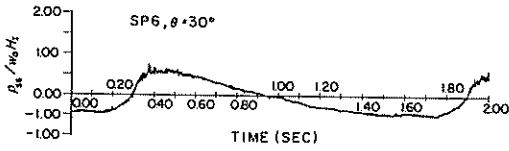
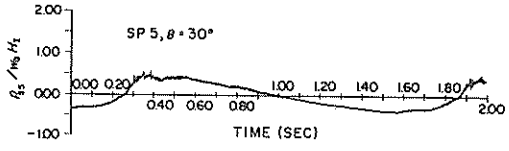
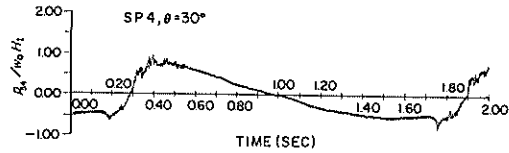
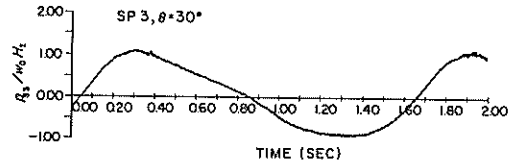
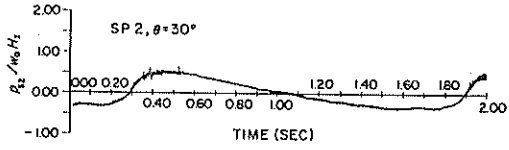
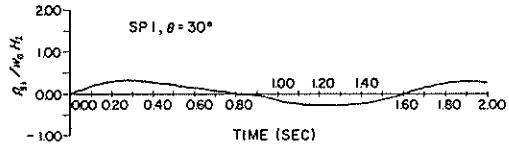
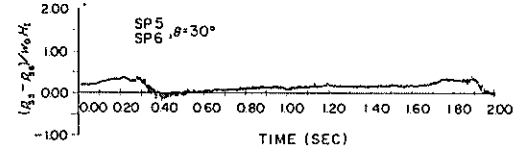
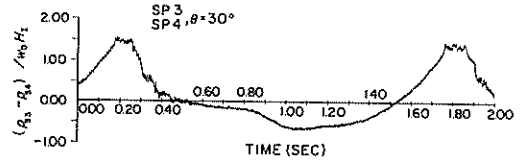
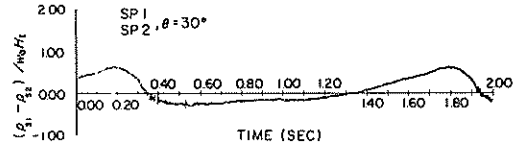


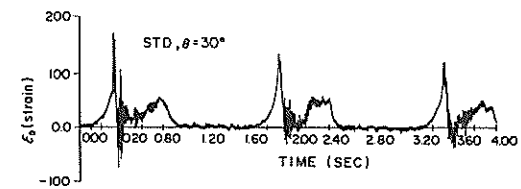
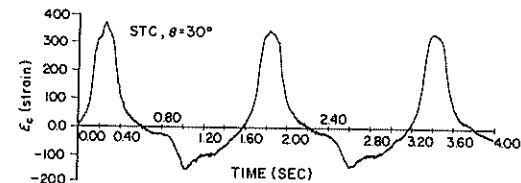
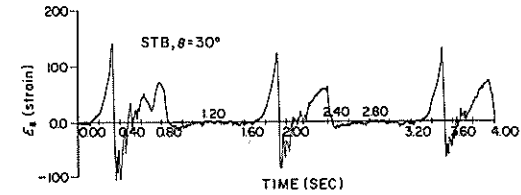
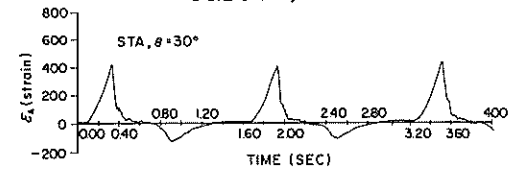
図-52(1) 波圧波形 ($\theta = 30^\circ$, 水深 48.25 cm)



図一52(2) 波圧波形 ($\theta=30^\circ$, 水深48.25 cm)



図一52(3) 同時差圧波形 ($\theta=30^\circ$, 水深48.25 cm)



図一52(4) 部材ひずみ波形 ($\theta=30^\circ$, 水深48.25 cm)

図一52(4)は、部材ひずみの測定例であり、縦軸は2ゲージ(STA, STB, STC)あるいは4ゲージ(STD)で出力されるひずみ量 $\epsilon_A, \epsilon_B, \epsilon_C, \epsilon_D$ (strain) であり、ケーソン外側あるいは波が入射する側からの力によるひずみを正としている。

上の二つは、上端固定の曲面スリット部材Aと下端固定の曲面スリット部材Bに作用する波圧による固定端での ϵ_A, ϵ_B であり、両者とも波が入射するときには静的に増加しているが、遊水室内の水位が上昇して空気を圧縮したのち、この空気がスリット上端方向へ噴出するときには、内側からの力が働き急激に両部材のひずみは減少している。部材Aではほぼひずみは0となっているが、部材Bでは、正と同程度の大きさの負のひずみを生じている。前出式(4)から p_A, p_B の算定に用いるひずみとしては、このときの正負のピーク値を用いている。

ϵ_C は、鉛直スリット部材Cに作用する波力による固定端でのひずみであり、比較的静的に変化している。

ϵ_D は、曲面スリット部材Dの側面に作用する波圧によるものであり、波の入射とともにひずみ量は増し、圧縮された空気が解放されると同時にひずみは急激に減少している。応答-入力変換器を通してのものの固有振動波形が残っているが、この振動は部材ねじりの固有振動であり、応答-入力変換器の適用できる理想的1自由度系の振動からかけはなれるためであると考えられる。

4.2 波向きによる部材波圧の変化

(1) 波向きによる波圧の低減係数の算定

本節は、波が斜め方向から入射するに従って、曲面スリットケーソンに作用する波圧がどのように変化していくかを知ることを目的とするため、各測点で測定された波圧の代表値(波圧係数 $\bar{p}/w_0 H_I$)を用いた。これの算定は全データを包絡するものとはせず、全データの傾向を与えるように最小自乗法を用いて行った。その際、波圧計が空中にあり波圧が作用しない条件や、特異的に傾向からはずれたデータについては、全体の傾向をゆがめる恐れもあるので、これを除いた。

各水深ごとにこうして得られる波圧係数を $\theta=0^\circ$ の値で無次元化した値を波圧の低減係数 λ_θ とする。

以下に、各入射角度毎の λ_θ の変化を示すことにする。なお、実測された波圧データについては、 $\theta=0^\circ$ のときのみを示すことにする。

(2) 遊水室後壁に作用する波圧

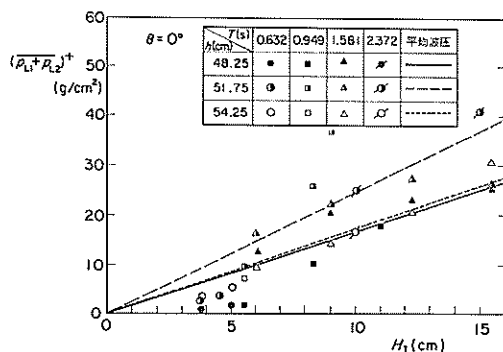
図一53(1), (2)は、それぞれ $\theta=0^\circ$ における遊水室背後壁上段と下段の波圧を示したもので、前者については、測点LP1とLP2の平均値を用いている。

測点LP1, LP2では、前出の測定例で示したように、

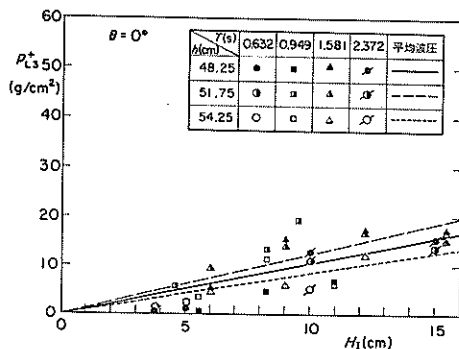
衝撃的な波圧が生じるため、平均波圧は水深51.75 cmで $2.43 w_0 H_I$, 54.25 cmで $1.77 w_0 H_I$, 48.25 cmで $1.68 w_0 H_I$ と比較的大きな値となっている。しかし、遊水室下段では全水深とも約 $0.88 \sim 1.09 w_0 H_I$ と約半分に減少している。

図一54(1), (2)は、それぞれ遊水室背後壁の上段、下段で λ_θ を示したものである。遊水室上段では、 $\theta=0^\circ \sim 15^\circ$ にかけて比較的大きく減少したのち、さらに θ が増すにつれて徐々に λ_θ は減少する傾向を示している。これは以下のような理由であると考えられる。 θ が 0° より多少大きくなると、遊水室内の水位上昇における位相のちがいがにより空気圧縮が不完全となることや、スリット部材で乱された水塊が壁面に斜めにあたることにより衝撃波圧も減少する。さらに、 θ が大きくなるときには、隔壁の存在していない部分では、通常のケーソンにみられるような波向きによる波圧の減少が生じることになる。

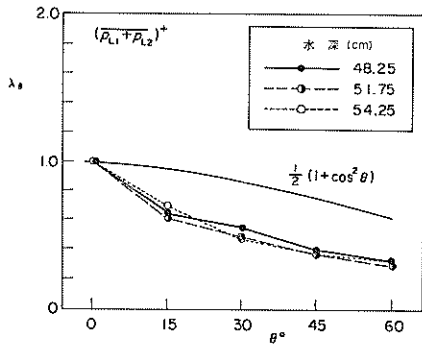
一方、遊水室内下部では、隔壁が存在し、これが波の斜め方向からの入射を妨げるように働くため、前述したような波向きによる波圧の減少効果が期待できず、 θ が $15^\circ \sim 60^\circ$ にかけては、あまり大きな λ_θ の変化を示していない。



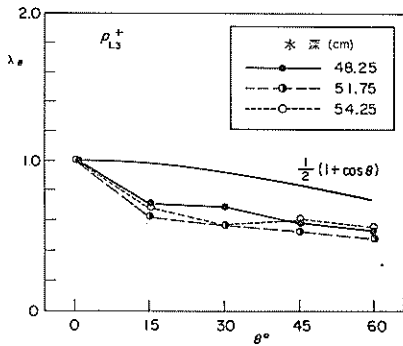
図一53(1) 測点LP1およびLP2における平均波圧 ($\theta=0^\circ$)



図一53(2) 測点LP3における波圧 ($\theta=0^\circ$)



図一54(1) 測点LP1およびLP2における平均波圧の変化



図一54(2) 測点LP3における波圧の変化

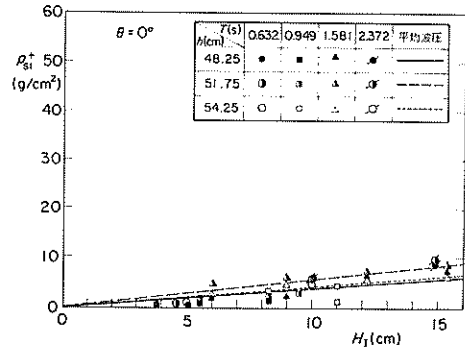
しかし、両者とも $\theta=15^\circ$ では $\lambda_\theta = 0.6 \sim 0.7$ となっている。

(3) 遊水室底板に作用する波圧

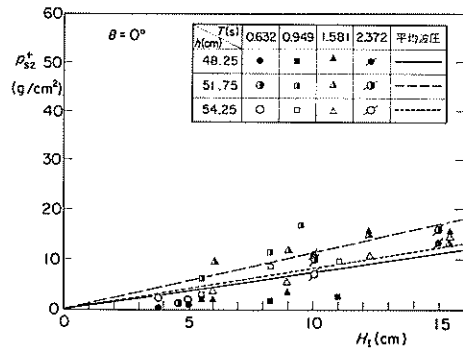
図一55(1)~(4)は、底板下から働く揚圧力と遊水室内から底板に作用する波圧およびそれらの同時差圧を示したものである。 p_{s1}^+ は測点SP1における揚圧力であり $0.30 \sim 0.53 w_0 H_I$ と小さいが、測点SP2における p_{s2}^+ は衝撃波圧が底板まで伝播するため $0.77 \sim 1.13 w_0 H_I$ と大きくなっている。このため、同時差圧も遊水室内側から負の差圧が卓越している。

図一56(1)は、測点SP1における λ_θ を示したものである。水深が48.25 cmの場合に他の2水深と比較して若干大きい、測点SP1には衝撃波圧は測定されないため、この3ケースとも λ_θ は徐々に減少する傾向を示している。図一56(2)は、測点SP2における λ_θ である。ここでも λ_θ は水深が51.75 cm, 54.25 cmのときには、図一54(2)に示した測点LP3での λ_θ と同様に θ が $0^\circ \sim 15^\circ$ にかけて比較的急に減少したのち、 15° より大きくなると、隔壁の効果によりほぼ一定となっている。

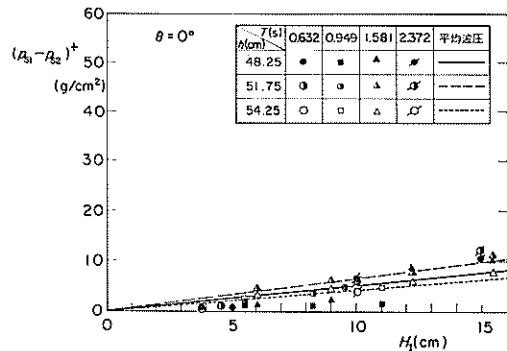
図一56(3), (4)は底板での同時差圧で、図一56(3)に示す正のときには揚圧力が卓越するときであり、水深48.



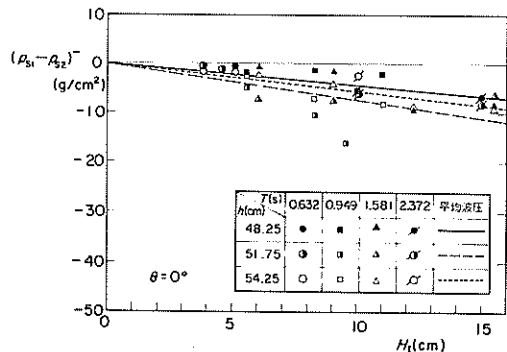
図一55(1) 測点SP1における波圧 ($\theta=0^\circ$)



図一55(2) 測点SP2における波圧 ($\theta=0^\circ$)



図一55(3) 測点SP1, SP2における同時差圧(正) ($\theta=0^\circ$)



図一55(4) 測点SP1, SP2における同時差圧(負) ($\theta=0^\circ$)

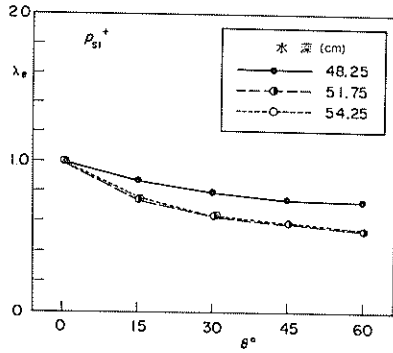


図-56(1) 測点SP1における波圧の変化

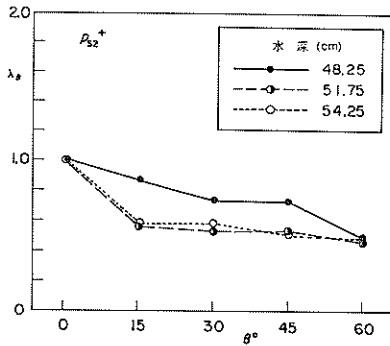


図-56(2) 測点SP2における波圧の変化

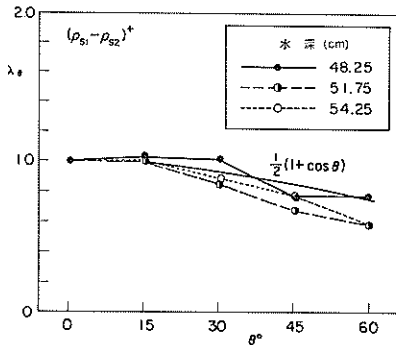


図-56(3) 測点SP1, SP2における同時差圧(正)の変化

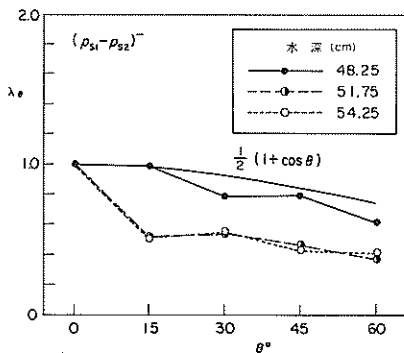


図-56(4) 測点SP1, SP2における同時差圧(負)の変化

25 cmのときには測点SP1と同様に λ_θ は変化しているが、図-56(4)に示す負のときには、遊水室内からの圧力が卓越するときであり、 λ_θ は測点SP2と同様に変化している。

(4) 前面透過壁下部に作用する波圧

図-57(1)~(4)は、前面透過壁下方の不透過部における波圧で、測点SP3が外側、SP4が遊水室側である。測点SP3, SP4とも約 $1.1 \sim 1.5 w_0 H_1$ とほぼ同程度の波圧強度となっている。同時差圧についても正負ともほぼ同じ大きさとなっているが、図-57(4)に示す負圧のときには遊水室内部の衝撃波圧により差圧が大きくなるケースもみられる。

図-58(1)~(2)は、測点SP3, SP4における λ_θ の傾向を示したものである。遊水室外側の測点SP3では、 θ が増すにつれ、徐々に λ_θ は減少しているが、遊水室内の測点SP4は測点SP3, SP2と同様に θ が 0° から 15° にかけて急に減少したのち θ が変化しても大きな変化はない。図-58(3)に示す正の同時差圧に関しては、水深が54.25 cmのとき $\theta=15^\circ$ で λ_θ は1より大きくなっているが、傾向として λ_θ は θ が増すにつれ徐々に減少する傾向にある。図-58(4)に示す負の同時差圧も、水深が51.75 cmのときを除いて徐々に減少する傾向に

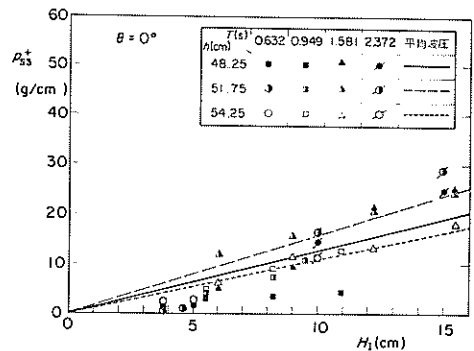


図-57(1) 測点SP3における波圧 ($\theta=0^\circ$)

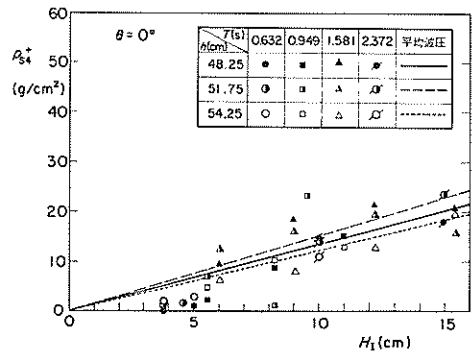
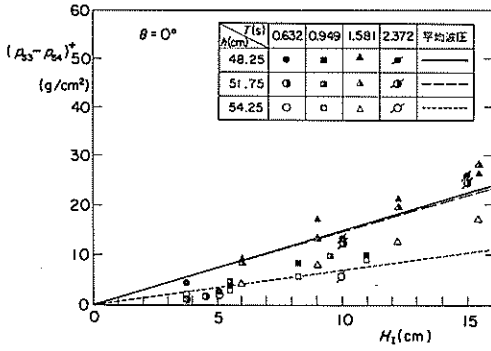
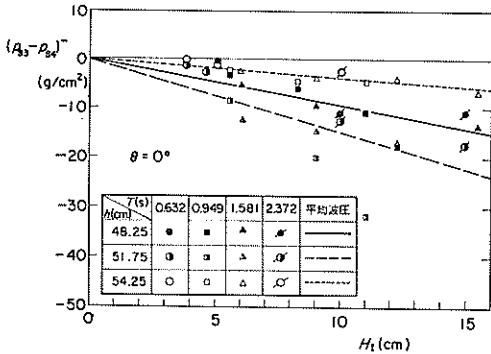


図-57(2) 測点SP4における波圧 ($\theta=0^\circ$)



図一 57 (3) 測点 SP3, SP4 における同時差圧 (正) ($\theta=0^\circ$)



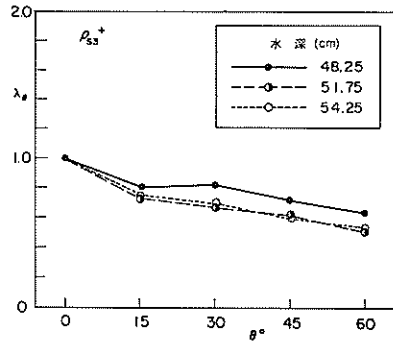
図一 57 (4) 測点 SP3, SP4 における同時差圧 (負) ($\theta=0^\circ$)

ある。水深 5.175 cm のときは遊水室内部からの衝撃波圧が卓越しているため、 $\theta=15^\circ$ にかけて λ_θ は大きく減少していると考えられる。

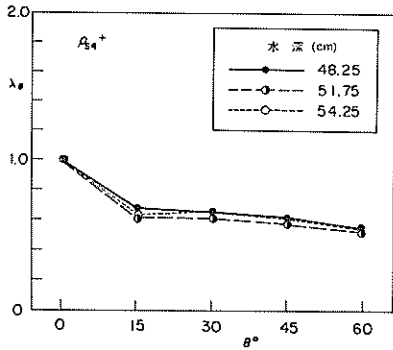
(5) 遊水室隔壁に作用する波圧

図一 59 (1)~(4) は、 $\theta=0^\circ$ のとき遊水室隔壁に作用する波圧である。測点 SP5, SP6 とも水深 5.175 cm の場合に波圧は大きく、約 $1.2 w_0 H_1$ となっている。同時差圧の $(p_{55} - p_{56})^+$, $(p_{55} - p_{56})^-$ は理想的な状態では本来 0 となるべきものであるが、現実には隔壁を中心として理想的に対称ではなく、しかも波圧計取り付け位置の若干の違いがあることから、正負とも約 $0.2 \sim 0.4 w_0 H_1$ の差圧が生じている。

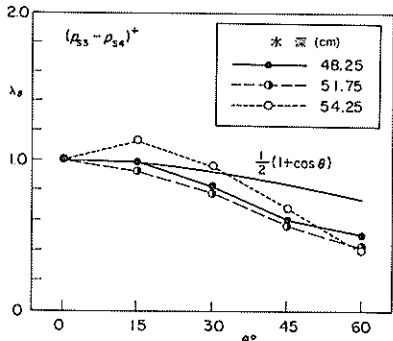
図一 60 (1), (2) は測点 SP5, SP6 における λ_θ を示したもので、両測点とも同じ遊水室内である測点 SP4 の場合と同様に、 $\theta=15^\circ$ にかけて、 λ_θ は比較的大きく減少したのち、 θ が 15° を超えるときにはほぼ一定となる。このため、 θ が増しても、同時差圧も大きく変動しないと考えられるが、 $\theta=0^\circ$ のときの差圧がもともと小さく、 λ_θ はこれを基準としているため図一 60 (4) に示す $\theta=15^\circ$ 、水深 48.25 cm の負の同時差圧のように傾向よりかけ離れているデータもある。しかし、傾向として



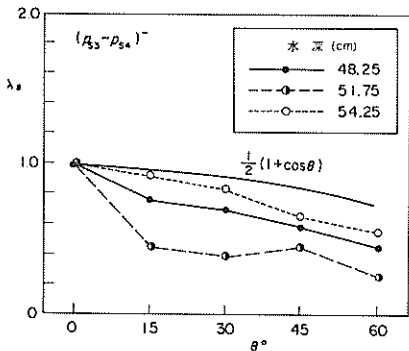
図一 58 (1) 測点 SP3 における波圧の変化



図一 58 (2) 測点 SP4 における波圧の変化



図一 58 (3) 測点 SP3, SP4 における同時差圧 (正) の変化



図一 58 (4) 測点 SP3, SP4 における同時差圧 (負) の変化

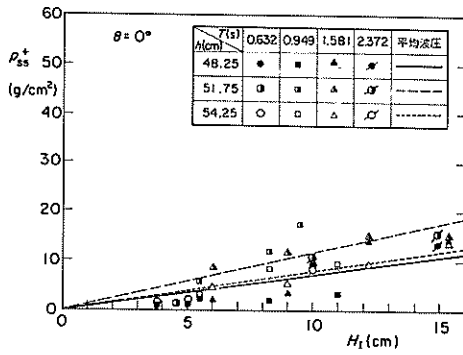


図-59(1) 測点SP5における波圧 ($\theta=0^\circ$)

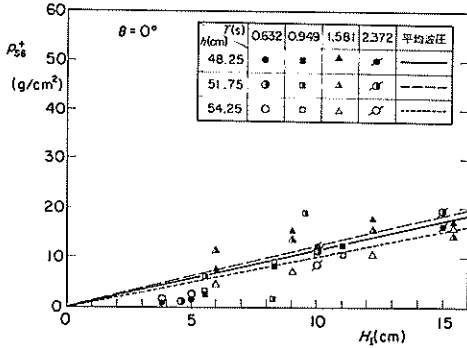


図-59(2) 測点SP6における波圧 ($\theta=0^\circ$)

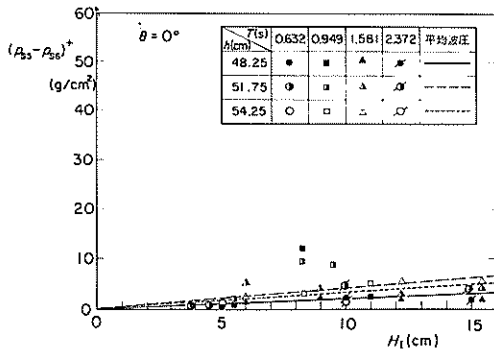


図-59(3) 測点SP5, SP6における同時差圧 (正) ($\theta=0^\circ$)

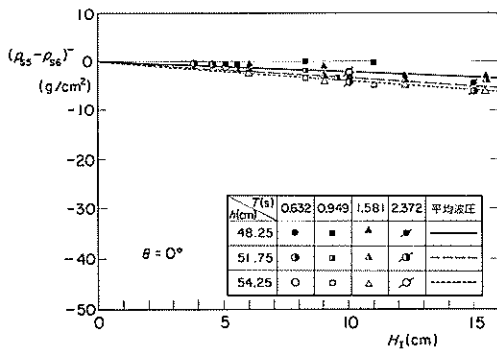


図-59(4) 測点SP5, SP6における同時差圧 (負) ($\theta=0^\circ$)

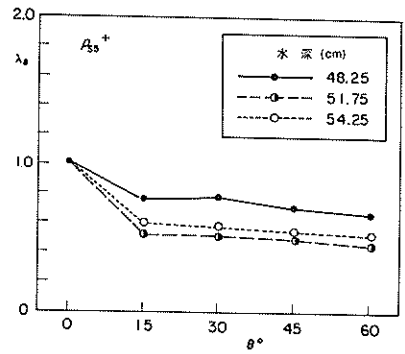


図-60(1) 測点SP5における波圧の変化

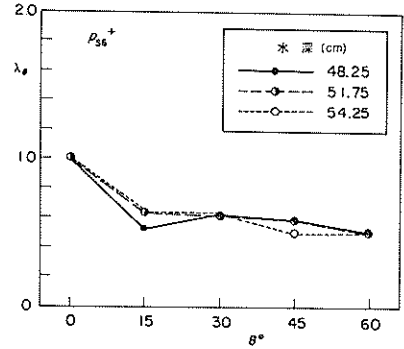


図-60(2) 測点SP6における波圧の変化

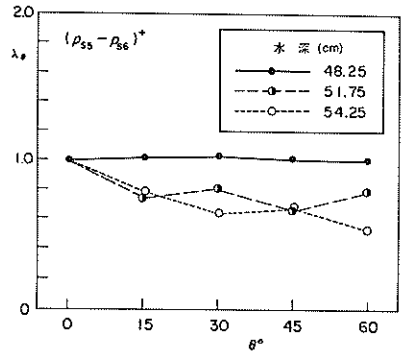


図-60(3) 測点SP5, SP6における同時差圧 (正) の変化

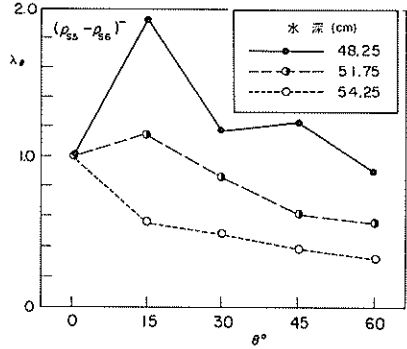


図-60(4) 測点SP5, SP6における同時差圧 (負) の変化

図-60(3)に示す正の同時差圧では θ による変動が小さく、負の同時差圧では水深が大きいほど θ の増加による λ_θ の減少は大きくなっている。

(6) 前面透過壁上部に作用する波圧

図-61は、前面透過壁上部(曲面スリット部材下端固定部SP7)の波圧を示したものである。1.08~1.54 w_0H_I の波圧が作用している。

図-62は、測点SP7での λ_θ を示したもので、遊水室外にあるため θ が増すにつれ徐々に減少している。

(7) 曲面スリット部材上下面に作用する波圧

図-63(1)(2)は、2.4(5)の式(4)で仮定した波圧分布の合力が正すなわち消波部外側より内部に合力が作用するときの波圧強度 p_A^+ 、 p_B^+ を示したものであり、 $\theta=0^\circ$ のときには p_A^+ は約0.26~0.56 w_0H_I 、 p_B^+ はほぼ0である。

図-64は、 p_A^+ について λ_θ を示したものであり、水深が48.25cmのときには θ が $0^\circ\sim 30^\circ$ にかけて若干増加したのち減少している。しかし、水深が51.75cm、54.25cmのときには θ が 15° を超えると λ_θ は減少し始め、 $\theta=45^\circ\sim 60^\circ$ にかけては $\lambda_\theta=0.2\sim 0.4$ 位まで下がっている。 p_B^+ については、 θ がどのような場合でも

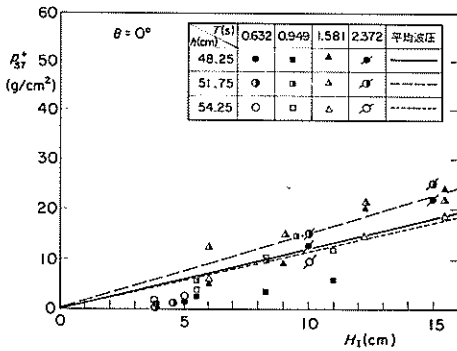


図-61 測点SP7における波圧($\theta=0^\circ$)

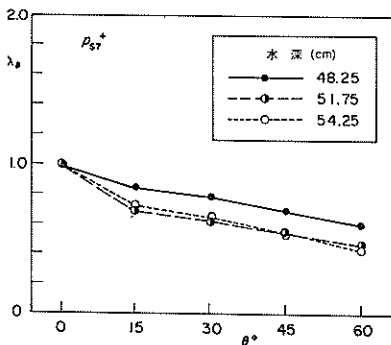


図-62 測点SP7における波圧の変化

ほぼ0であるのでこれについての λ_θ は省略する。

一方、図-65(1),(2)は、合力が負すなわち遊水室内から外側に力が作用するときの波力強度 p_B^- で、このときには今度は p_A^- が θ にかかわらずほぼ0となる。

p_B^- はスリット部材上端固定部付近で圧縮された空気が噴出するためここでの負の圧力は比較的大きなものとなると考えられ、設計波力としては $-1.5 w_0H$ がとられている。しかし、今回の測定では部材の固有振動数が低いため、衝撃的な波圧がとらえられず、 $-0.43\sim -0.58$

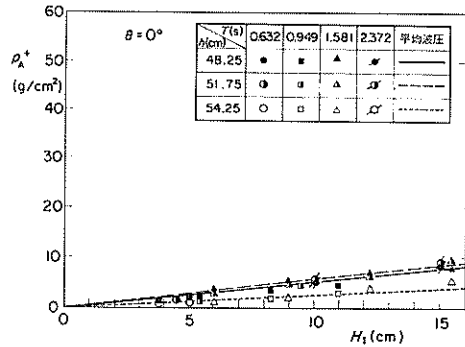


図-63(1) 曲面スリット部材下端における波力強度 p_A^+ ($\theta=0^\circ$)

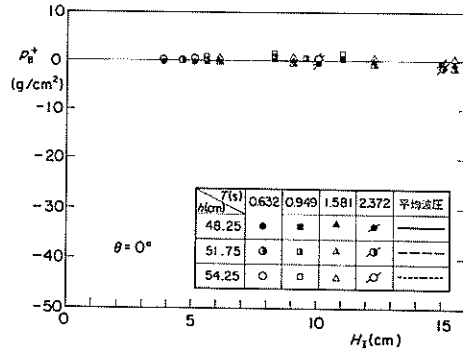


図-63(2) 曲面スリット部材上端における波力強度 p_B^+ ($\theta=0^\circ$)

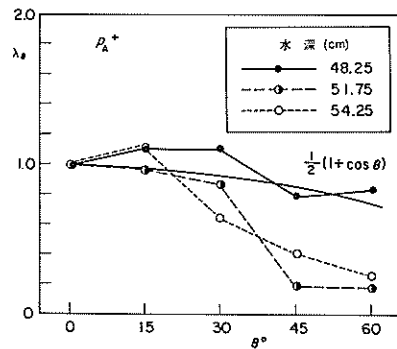


図-64 曲面スリット部材下端における波力強度 p_A^+ の変化

$w_0 H_I$ の波圧となっている。このため、今後は現地実験結果等を参考として、正しい p_B^- の部材強度を検討することが必要となろう。

図-66は、 p_B^- についての λ_θ であり、徐々にではあるが θ が増すにつれ λ_θ は減少している。特に水深が48.25 cmのときには、 $\theta=30^\circ$ で $\lambda_\theta=0.4$ となっている。

(8) 鉛直スリット壁に作用する波圧

鉛直スリット部材Cの測点STCでは、図-52(4)に示

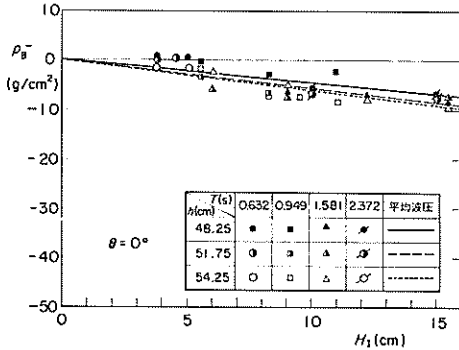


図-65(1) 曲面スリット部材上端における波力強度 p_B^- ($\theta=0^\circ$)

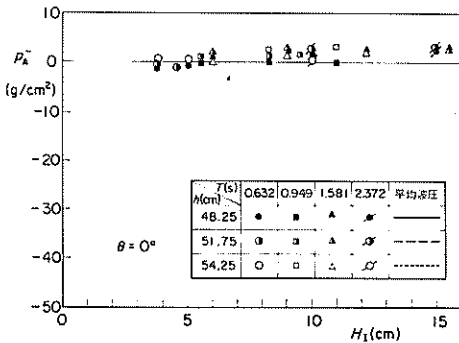


図-65(2) 曲面スリット部材下端における波力強度 p_A^- ($\theta=0^\circ$)

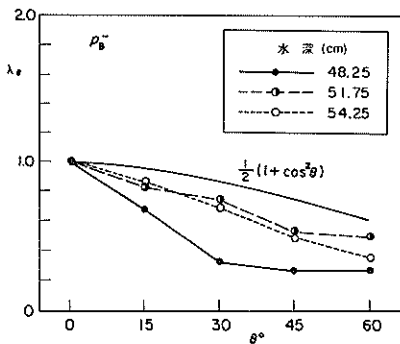


図-66 曲面スリット部材上端における波力強度 p_B^- の変化

した測定例にみられるように、比較的静的に波圧が変化しているが、図-67(1), (2)に示すようにその大きさは、正で0.66~0.75 $w_0 H_I$ 、負で-0.4~-0.46 $w_0 H_I$ と比較的大きい。

図-68(1), (2)は、 λ_θ の変化を示したもので、正負とも水深54.25 cmと大きいときには、 θ が増すにつれ比較的大きく λ_θ は減少するが、水深が48.25 cm, 51.75 cmのときには、 θ が30°まであまり減少せず、その後減少している。

(9) 曲面スリット部材側面に作用する波力

斜め入射波に対しては曲面スリット部両側面への波圧の差による部材波力が働らくことが考えられる。前出の式(5)で求められる波圧強度 p_D^+ , p_D^- は θ が増すにつれて増加するが、 θ がある程度より大きくなると隣の部材のかげに隠れることになり必ずしも θ が増すにつれ大きくなると考えられない。実験結果によると、水深が51.75 cmのときには $\theta=30^\circ$ で p_D^+ は最大となった。図-69(1)は、 $\theta=30^\circ$ での正の波圧強度 p_D^+ であり、約0.11~0.31 $w_0 H_I$ の波圧が作用することがわかる。全データをほぼ包絡する値としては、約0.5 $w_0 H_I$ の波圧が作用していると考えられることができる。

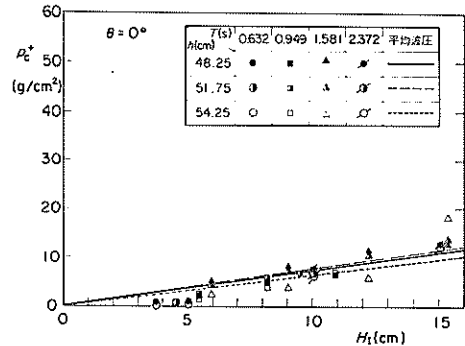


図-67(1) 鉛直スリット部材の波力強度 p_C^+ ($\theta=0^\circ$)

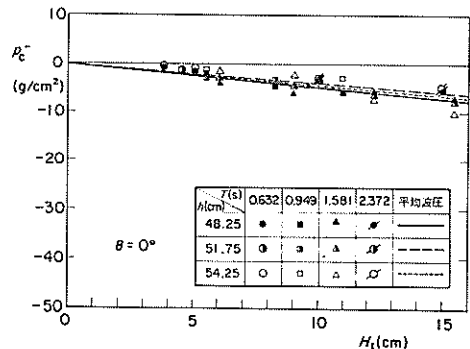
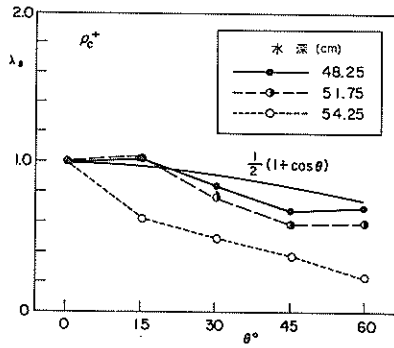
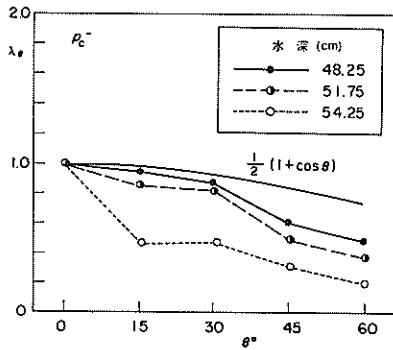


図-67(2) 鉛直スリット部材の波力強度 p_C^- ($\theta=0^\circ$)



図一68(1) 鉛直スリット部材の波力強度 p_c^+ の変化



図一68(2) 鉛直スリット部材の波力強度 p_c^- の変化

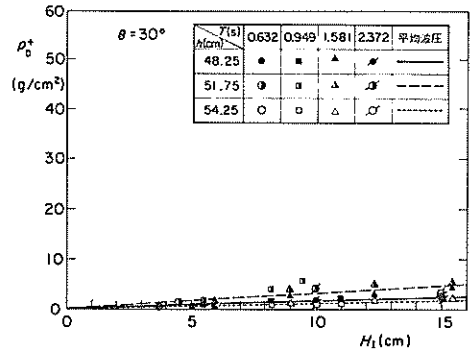
図一69(2)は、 $\theta=30^\circ$ のときの負の値であり、このときには約 $-0.05 \sim -0.15 w_0 H_I$ と波圧強度は小さくなっている。他の入射角度においても同程度であり、側面に作用する波圧としては正の値のみを考慮すれば良いと言える。

図一70は入射角度の違いによる λ_θ の変化を示したもので、 p_D^+ が最大となる角度での値で無次元化している。水深48.25 cmでは 60° 、51.75 cmでは 30° 、54.25 cmでは 45° のとき、 p_D^+ は最大となっていた。傾向として、 θ が増すにつれ λ_θ は増加しているが、 θ が 30° を超えると総じて λ_θ の大きな変化はないと考えることができる。

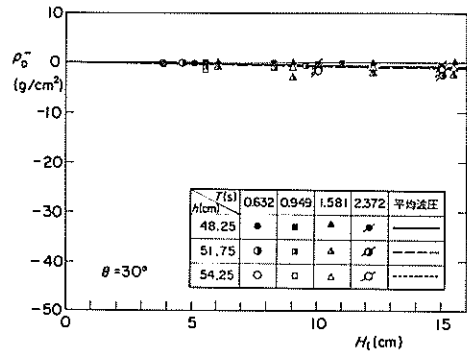
4.3 波向きによる設計波力の低減係数

本節では、前節の結果を基に部材設計を行う上で必要な設計波力の波向きによる低減係数を提案する。

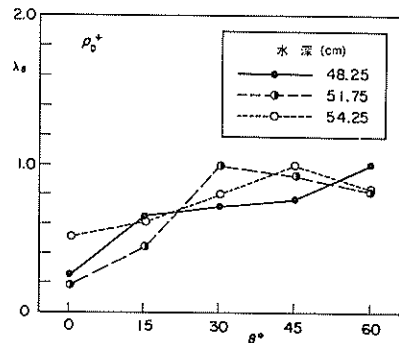
消波部遊水室背後壁に作用する波力については、背後壁上段の隔壁の存在しないところでは、波向きによる直接的な波圧の減少効果、衝撃波圧の減少効果の両方が期待できるため、 $0.5(1 + \cos^2 \theta)$ で波圧を低減できる。しかし、遊水室下段のように隔壁で拘束されるところでは、波向きの直接的な減少効果は期待できないため、 $0.5(1$



図一69(1) 曲面スリット部材側面の波力強度 p_D^+ ($\theta=30^\circ$)



図一69(2) 曲面スリット部材側面の波力強度 p_D^- ($\theta=30^\circ$)



図一70 曲面スリット部材側面の波力強度 p_D^+ の変化

$+ \cos \theta$)を用いることにする。

前出の図一54(1)、(2)には、それぞれの設計波力の低減係数を実線で示してあるが、充分実験値を包絡していることがわかる。

消波部本体を構成する部材表面に作用する波圧については、斜め入射波に対する直接的な波圧の減少効果と、衝撃波圧の減少効果を考えることにより説明されるが、設計に用いる部材波力については、部材両面での同時差圧が重要であり、これについて波力の低減係数を示す。

まず、曲面スリット部材に作用する波圧の合力が消波部外側から内側に向うときには、曲面スリット下端での波力強度 p_A^+ が卓越し、これについては図一64に示すように、水深が48.25 cmの場合 λ_θ は若干1.0より大きくなった後減少しはじめるが傾向として $0.5(1+\cos\theta)$ で波圧を低減できる。

また、合力が遊水室内側から外側に向うときには曲面スリット部材上端での波力強度 p_B^- が卓越するが、これについては前出図一66に示すように $0.5(1+\cos^2\theta)$ で波力を低減できる。

また、鉛直スリット部材についても前出図一68(1)、(2)に示すように、正、負の場合とも $0.5(1+\cos\theta)$ で波力の低減が可能である。

前面不透過壁下部の不透過部、および底板についても前出図一58(3)、(4)、および図一56(3)、(4)に示すように $0.5(1+\cos\theta)$ で波力の低減が可能である。しかし、遊水室内の隔壁に関しては同時差圧自体は元々小さいが、図一60(3)、(4)に示すように入射角 θ が増加しても同時差圧は減少しない例もあり、ここでの波圧の低減は行わない方がよい。

曲面スリット部材側面に作用する波圧としては、前出の図一69(1)に示す実験結果から $0.5w_0H_I$ の波圧が、 θ に無関係に作用すると考えた方がよい。これはたとえ $\theta=0^\circ$ であっても理想的な状態で波が入射するとは限らず、局所的に曲面スリット部材側面から波圧が作用することが考えられるからである。

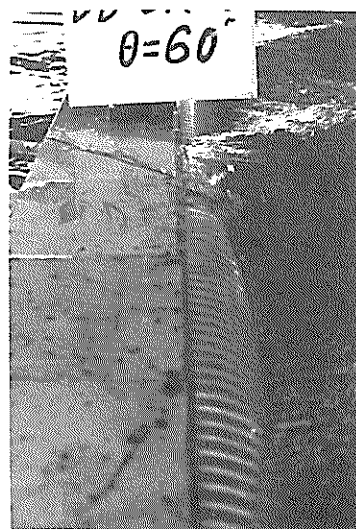
5. 消波部不透過ケーソンに隣接する場合の波圧

5.1 波の作用状況と測定例

曲面スリットケーソンが何函も設置されているとき、そのうちの1函が不測の災害（たとえば漂流船舶の衝突など）によって損傷を受け、その復旧工法として、消波部内部をコンクリート等で完全に填充する場合が考えられる。このような消波部不透過ケーソンをここでは曲面ケーソンと呼ぶが、この曲面ケーソンに正規の曲面スリットケーソンが隣接する場合を検討した。はじめに波の作用状況を写真一16、17に示す。写真中で曲面ケーソンの位置は、実験条件の表示板の直前である。両ケースとも入射角が 60° 、水深51.75 cmの場合であり、周期、波高は写真一16が0.949 s、8.25 cm、写真一17は1.581 s、15.50 cmである。両ケースとも、波峯が不透過ケーソンに達するときに遊水室内を進行してきた波をセキ止めることになり、ここで衝撃的な波圧が作用し、スリット部材上端付近より圧縮された空気が噴出し、水しぶきを上げていることがわかる。

図一71の上3例は、写真一17に示す条件における遊水室背後壁の波圧の測定記録例である。遊水室背後壁の測点、LP4、LP5、LP6では、立ち上がり鋭い衝撃的な波力が生じていることがわかる。波圧強度としては、測点LP4で $1.05w_0H_I$ 、測点LP5で $0.90w_0H_I$ 、測点LP6で $0.90w_0H_I$ である。

図一71の下2例は同じ条件で、不透過ケーソン上手側の曲面スリット部材 F、G におけるひずみ測定例であ



写真一16 消波部不透過壁への波の作用状況 ($\theta=60^\circ$, 水深51.75 cm, $T=0.949$ s)

る。上端固定の部材Fでは、水位上昇により最大で約350 strain (2ゲージ法)のひずみを生じた後、遊水室内の空気圧縮で生じる遊水部内部からの波力により、急激に-300 strain までひずみは下がっている。下端固定の部材Gについても静的に若干ひずみを増した後、急激に約-1100 strain までひずみは減少している。

図-72は、比較のために通常の設定形態で $\theta = 60^\circ$ における曲面スリットケーソンの測定例を示したもので、測点LP1, LP2, LP3とも約 $0.6 \sim 0.7 w_0 H_I$ と小さく、衝撃波圧は生じていないことがわかる。部材ひずみについても部材F, Gのひずみ量より小さくなっている。

5.2 不透過壁による波圧の変化

(1) 不透過壁による波圧の増加係数

斜め入射波では不透過壁によって波の進行が妨げられるため、不透過壁近くの曲面スリットケーソン各部材に衝撃的な波圧が生じるのは前出の例で示される通りである。本節では、このときの波圧が消波部不透過な曲面ケーソンがない通常の設定形態のときと比べてどの程度大きなものとなるか検討する。以下では、波圧の増加を指す指数として、通常の設定形態でしかも θ が 0° のときの波圧を基準とし、これとの比で波圧の増加係数 $\lambda_{c\theta}$ を表すことにする。各測点での平均的な波圧係数は、4.2で示したと同様に求めている。

(2) 遊水室後壁に働く波圧

遊水室後壁の測点LP4, LP5, LP6は、後述する曲面スリット部材F, Gよりさらに上手側に離れた位置である(図-9参照)。 $\theta = 0^\circ$ のときの波圧は、図-73

(1), (2)に示すように隔壁の影響を受けない部分では約 $1.1 \sim 1.7 w_0 H_I$ 、遊水室下部の隔壁にはさまれた所では約 $0.9 \sim 1.0 w_0 H_I$ であった。

図-74 (1), (2)は、遊水室背後壁上部および下部における $\lambda_{c\theta}$ の変化を示したもので、両者とも θ が変化しても大きく変わらない。しかし、 θ が増すにつれて、 $\lambda_{c\theta}$ はあまり減少せず、前出図-54(1), (2)に示した通常の設定状態における λ_θ と比較してみると、遊水室背後壁上段下段とも $\theta = 0^\circ$ を除いて不透過壁によるセキ止め効果により波圧が大きくなることわかる。しかし、 $\theta = 0^\circ$ のときには逆に小さくなっており、何故このようになるかは不明である。

(3) 曲面スリット部材に働く波圧

図-75 (1), (2)は $\theta = 30^\circ$ の条件で、合力が遊水室の方向に作用するときのスリット部材F, Gの下端および上端での波力強度 $p_A'^+$, $p_B'^+$ を示したものである。このときには、比較的静的に水位が上昇するため、 $p_A'^+$ は約 $0.28 \sim 0.47 w_0 H_I$ と小さく $p_B'^+$ はほぼ0に等しくなっている。

図-76は $p_A'^+$ について $\lambda_{c\theta}$ の変化を示したもので $\theta = 0^\circ$ で水深54.25 cmのとき $\lambda_{c\theta}$ は1.58となっているが、他の水深では約1.2と小さく、しかも θ が増すにつれて減少している。これは、 $p_A'^+$ が卓越するときは遊水室内に向かって水塊が流入するときであり、曲面ケーソンの影響は受けるもののその影響は小さいためであると考えられる。

しかし、 $\theta = 0^\circ$ で $\lambda_{c\theta}$ が通常の設定形態のときより

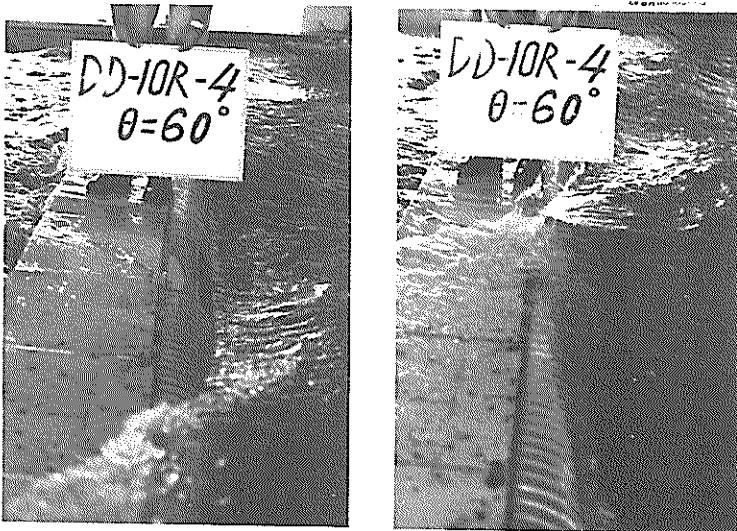


写真-17 消波部不透過壁への波の作用状況 ($\theta = 60^\circ$, 水深51.75 cm, $T = 1.581$ s)

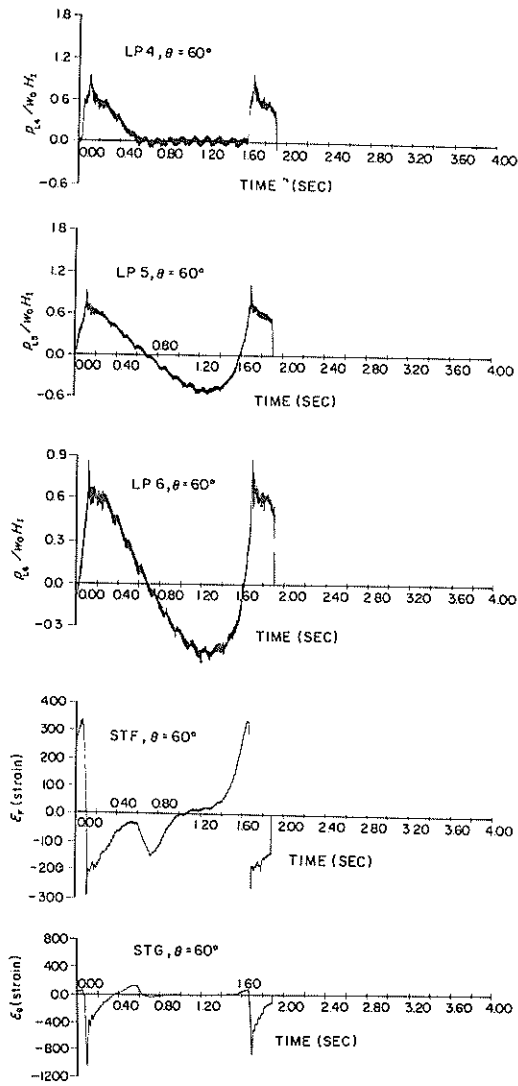


図-71 消波部不透過ケーソンに隣接するときの波圧および部材ひずみ波形 ($\theta=60^\circ$, 水深 5.175 cm)

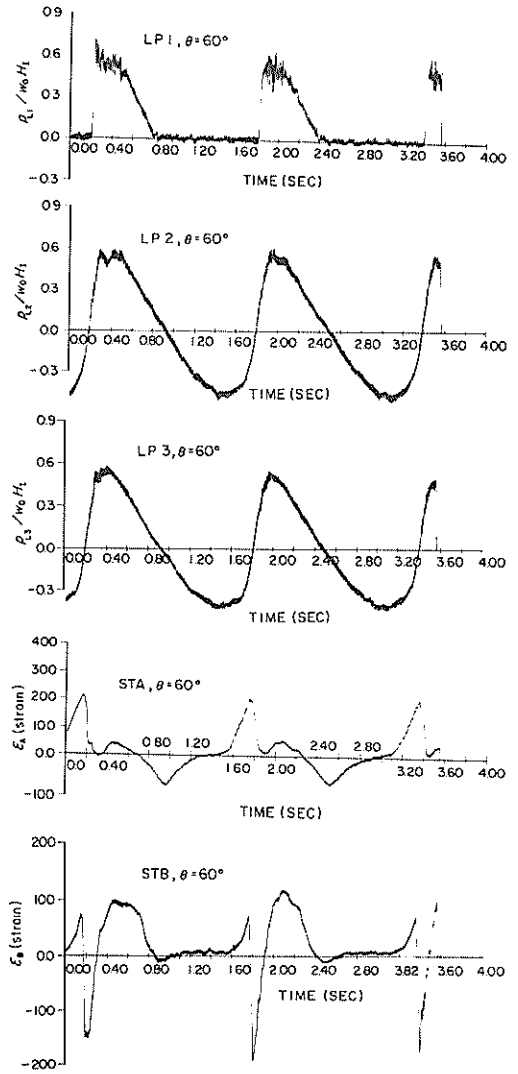


図-72 通常の設定形態における曲面スリットケーソンの波圧および部材ひずみ波形 ($\theta=60^\circ$, 水深 5.175 cm)

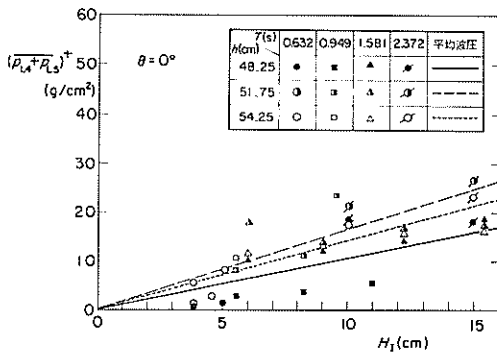


図-73(1) 測点LP4, LP5における平均波圧 ($\theta=0^\circ$)

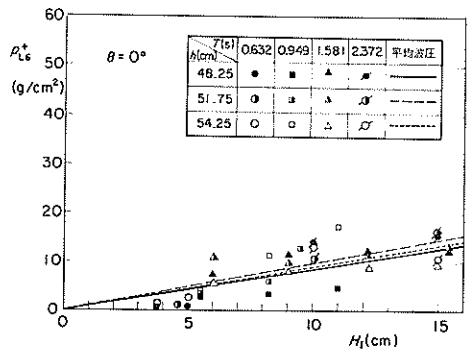
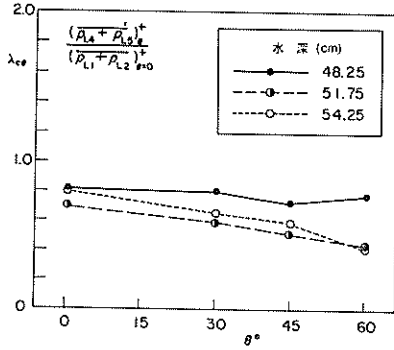
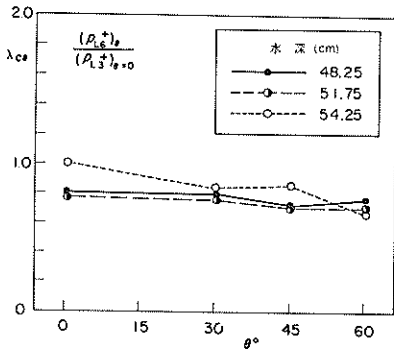


図-73(2) 測点LP6における波圧 ($\theta=0^\circ$)



図一74(1) 測点LP4, LP5における平均波圧の変化



図一74(2) 測点LP6における波圧の変化

大きいのは、曲面ケーソンが存在することにより本来そこへ流入する水塊が隣接する遊水室内へ流入しようとするため、 $p_A'^+$ は大きなものになると考えられる。

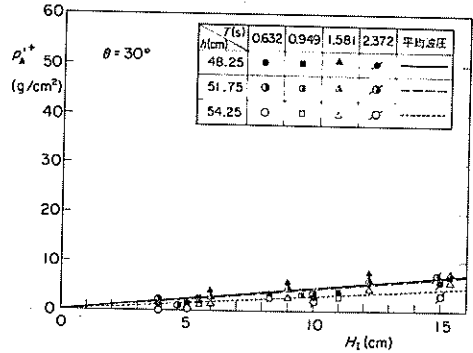
一方、図一77(1), (2)は $\theta=30^\circ$ の条件で遊水室内側から外側に向って合力が作用するときの曲面スリット部材上端および下端での波力強度 $p_B'^-$, $p_A'^-$ であり、 $p_A'^-$ は小さいが、 $p_B'^-$ は水深54.25cmのときには $-1.01 w_0 H_I$ と比較的大きくなっている。

図一78は、 $p_B'^-$ について $\lambda_{c\theta}$ を示したものであり、 $\theta=0^\circ$ では、 $\lambda_{c\theta}$ はかなり小さくなっているが、 θ が増すにつれ大きく増加している。 θ が 45° では、水深51.75cm, 54.25cmとも約1.8であるが、 $\theta=60^\circ$ では水深48.25cm, 51.75cmでそれぞれ1.91, 2.08と大きくなっている。

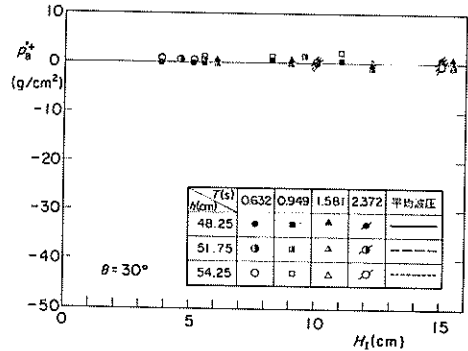
(4) 不透過壁に働く波圧

$\theta=0^\circ$ の場合で不透過壁上段の測点SP8, SP9における平均波圧を図一79に示す。ここでは、衝撃波圧が働くため、データは若干散らばっているが、平均波圧で約 $1.14 \sim 1.51 w_0 H_I$ の波圧が作用することがわかる。

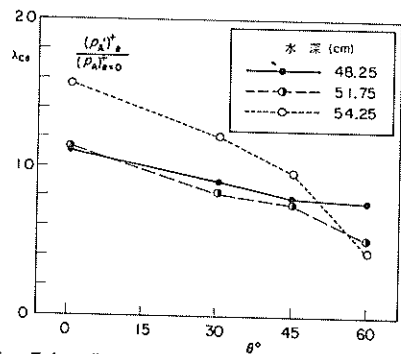
図一80は、 $\theta=0^\circ$ における $(p_{S8} + p_{S9})^+$ を基準として不透過壁の $\lambda_{c\theta}$ を示したもので、 θ が増すにつれ増



図一75(1) 曲面スリット部材下端における波力強度 $p_A'^+$ ($\theta=0^\circ$)

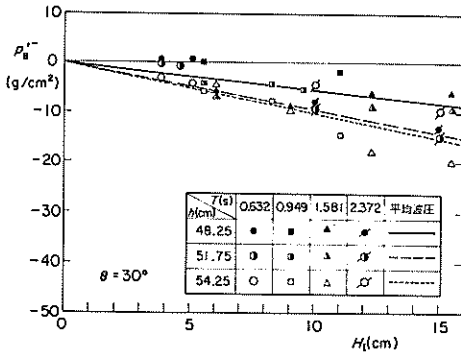


図一75(2) 曲面スリット部材上端における波力強度 $p_B'^+$ ($\theta=30^\circ$)

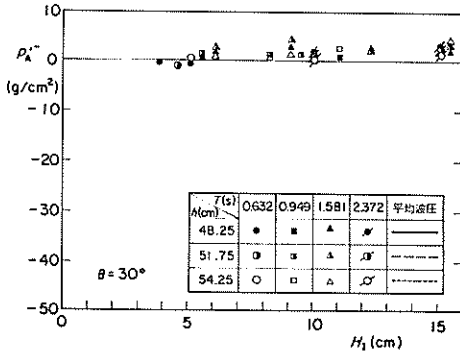


図一76 曲面スリット部材下端における波力強度 $p_A'^+$ の変化

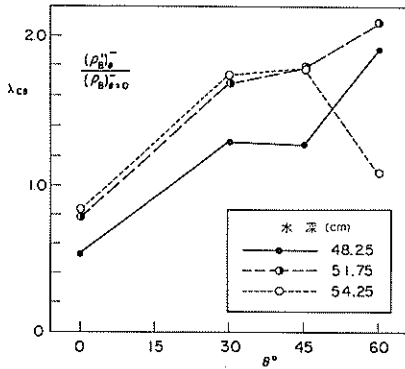
加する傾向を示している。 $\theta=60^\circ$ で水深51.75cmのときには、 $\lambda_{c\theta}$ は1.66であり、 $\theta=0^\circ$ で水深51.75cmの平均波圧は、 $1.51 w_0 H_I$ であるので、 $\theta=60^\circ$ のこの水深では、 $2.50 w_0 H_I$ の波圧が働いていることがわかる。



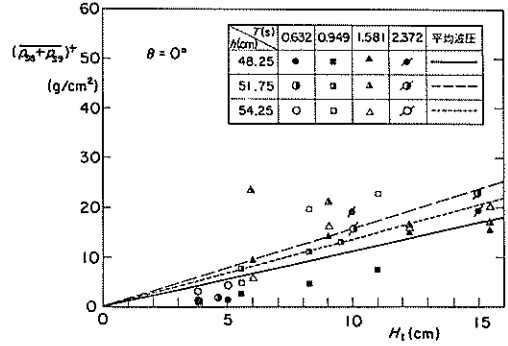
図一77(1) 曲面スリット部材上端における波力強度 p_B'' ($\theta=30^\circ$)



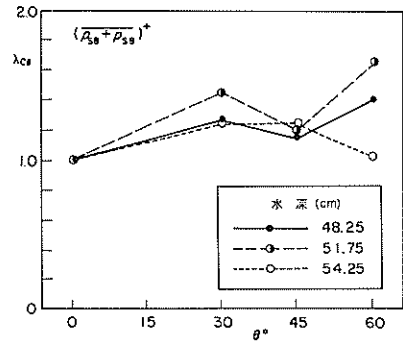
図一77(2) 曲面スリット部材下端における波力強度 p_A'' ($\theta=30^\circ$)



図一78 曲面スリット部材上端における波力強度 p_B'' の変化



図一79 曲面ケーソン不透過壁に作用する平均波圧 ($\theta=0^\circ$)



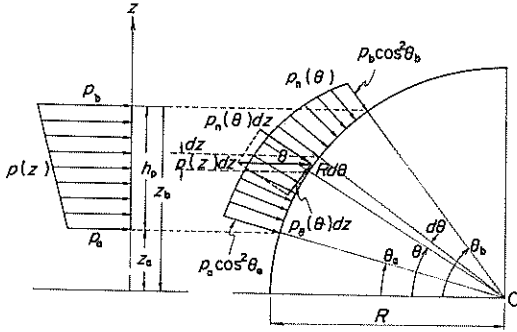
図一80 曲面ケーソン不透過壁に作用する平均波圧の変化

6. 曲面ケーソンの安定性について

6.1 外力の算定法

本章では曲面ケーソンの安定性を検討する。はじめにこれに作用する外力の算定法を以下に示す。

我が国では混成堤等の設計波力として合田式による波力(合田波力)が用いられているが、本章でも外力として合田波力を用いることにする。その際、曲面部では船直方向の力が作用するためこの算定が必要となるが、ここでは斜面ケーソンにおいて用いられる方法を準用することにする。すなわち、曲面壁部の微小部分に作用する合田波力を接線方向およびそれと垂直方向の分力に分け、このうち接線方向分力は流体の遡上に働き堤体には波力を及ぼさないとし、垂直方向分力のみが堤体を滑動させる波力として作用するものとする。以下に、合田波力の一部として図-81に示すような、台形分布の波圧が曲面壁部に作用するときの堤体に及ぼす水平力および鉛直力の求め方を示す。



図一 81 曲面壁に作用する波圧

図一 81 に示すように曲面部下端から高さ z_a の位置での波圧強度を p_a 、 z_b での波圧強度を p_b 、曲面壁部半径を R とすると、この台形外力による曲面壁法線方向に作用する波圧強度 $p_n(\theta)$ は式(36)で与えられる。

$$p_n(\theta) = (c_1 \sin \theta + c_0) \cos^2 \theta \quad (36)$$

ここで

$$c_1 = \frac{p_b - p_a}{h_p} R \quad (37)$$

$$c_0 = \frac{h_p + z_a}{h_p} p_a - \frac{1}{h_p} p_b \quad (38)$$

$$h_p = z_b - z_a \quad (39)$$

この法線方向に作用する波圧分布の水平方向合力 P_h 、鉛直方向合力 P_v およびこれらの合力による 0 点まわりのモーメント M_{Ph} 、 M_{Pv} は、それぞれ式(40)、(41)、(42)で与えられる。

$$P_h = -\frac{1}{4} c_1 R (\cos^4 \theta_b - \cos^4 \theta_a) + \frac{1}{12} c_0 R \{ \sin 3 \theta_b - \sin 3 \theta_a + 9(\sin \theta_b - \sin \theta_a) \} \quad (40)$$

$$P_v = -\frac{1}{32} c_1 R \{ \sin 4 \theta_b - \sin 4 \theta_a - 4(\theta_b - \theta_a) \} - \frac{1}{3} c_0 R (\cos^3 \theta_b - \cos^3 \theta_a) \quad (41)$$

$$M_{Ph} = M_{Pv} = -\frac{1}{15} c_1 R^2 \{ 3(\sin^5 \theta_b - \sin^5 \theta_a) - 5(\sin^3 \theta_b - \sin^3 \theta_a) \} - \frac{1}{4} c_0 R^2 (\cos^4 \theta_b - \cos^4 \theta_a) \quad (42)$$

ここで

$$\theta_a = \sin^{-1} \frac{z_a}{R} \quad (43)$$

$$\theta_b = \sin^{-1} \frac{z_b}{R} \quad (44)$$

M_{Ph} 、 M_{Pv} は鉛直力および水平力のモーメントであるが、元々は法線方向に作用する波圧の分力であるためモーメントは本来 M_{Ph} 、 M_{Pv} の和をとれば 0 となるものである。図一 81 の例では、 M_{Ph} については時計方向を、 M_{Pv} については反時計方向を正にとっているため、 M_{Pv} 、 M_{Ph} は等しいものとなっている。また、 P_h 、 P_v の作用位置は中心 0 から分力 P_h 、 P_v までの垂線距離をそれぞれ h_{Ph} 、 h_{Pv} とすると、式(43)、(44)で与えられる。

$$h_{Ph} = \frac{M_{Ph}}{P_h} \quad (45)$$

$$h_{Pv} = \frac{M_{Pv}}{P_v} \quad (46)$$

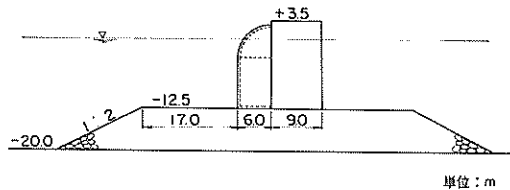
したがって、曲面壁部には、式(40)で示される水平力 P_h および式(41)で示される鉛直力を P_v を、それぞれ式(45)、(46)で示される作用点に作用させて考えれば良い。なお、静水面が曲面壁中に存在するときには、曲面壁部に対応する合田波力は 2 つの台形分布外力と考えられるため、それぞれについて上記の計算を行うのは当然のことである。

以上は、曲面ケーソンの曲面壁に作用する外力の算定法であり曲面壁上方の上部工鉛直壁、および曲面壁下方の鉛直壁には合田波力がそのまま作用すると考える。

6.2 安定計算

(1) 計算条件

図一 82 に示すような断面形状を有する曲面スリットケーソン堤の消波部表面をコンクリート壁で囲み、中に砂を充填した曲面ケーソンを対象として安定計算を行う。断面諸元は水深 20 m、ケーソン設置水深 -12.5 m、マウンド肩幅 17 m、ケーソン消波部幅 6 m、ケーソン本体幅 9 m、天端高 +3.5 m、曲面壁部外径 6 m である。



図一 82 安定計算断面

表一 11 (1) 曲面ケーソンの安定計算

ケーソンタイプ	合 田 波 力				作 用 外 力								
	p_1	p_3	p_4	p_u	全水平力		全鉛直力		揚 圧 力		水平力	鉛直力	揚圧力
	$w_0 H_{max}$	$w_0 H_{max}$	$w_0 H_{max}$	$w_0 H_{max}$	$P_H(t/m)$	$y_H(m)$	$P_V(t/m)$	$x_V(m)$	$P_2(t/m)$	$x_2(m)$	モーメント	モーメント	モーメント
曲面スリットケーソン	0.604	0.303	0.373	0.303	46.3	8.60			8.6	6.00	398.2		51.4
当面ケーソン	0.634	0.318	0.392	0.303	41.4	7.95	7.27	13.57	14.3	10.00	329.0	98.6	142.8

表一 11 (2) 曲面ケーソンの安定計算

ケーソンタイプ	ケ ー ソ ン				安 全 率				
	消 波 部		ケーソン本体		消波部抵抗	ケーソン本体抵抗	滑 動	転 倒	端 趾 圧
	$W_B(t/m)$	$x_B(m)$	$W_C(t/m)$	$x_C(m)$	モーメント(tm/m)	モーメント(tm/m)			
曲面スリットケーソン	18.9	12.8	160.9	4.5	241.8	724.2	2.22	2.29	33.9
曲面ケーソン	83.3	11.8	160.9	4.5	987.0	724.2	3.44	5.07	27.6

また、外力としては周期6秒、換算沖波波高3.5mの波が作用するものとする。

なお、本節では曲面ケーソンの他にもとの曲面スリットケーソンについても同じ条件で安定計算を行い、両者を比較検討する。そのときの外力も合田式で与えられるが、詳細は参考文献¹⁶⁾を参照して頂きたい。

(2) 安定計算結果

図-83, 84は、それぞれ曲面ケーソン、曲面スリットケーソンに作用する外力を示したものである。図中 $p_1 \cos^2 \theta$ および p_1 は静水面での波圧強度、 p_3 はケーソン基面での波圧強度、 p_4 はケーソン天端位置での波圧強度、 p_u はケーソン本体部底面前端での揚圧力強度である。表一11(1)には合田波力を示しているが、合田波力を比較すると、 p_1 、 p_3 、 p_4 とも曲面ケーソンの方が大きな値となっている。しかし、前出の方法で求めた水平波力は、曲面スリットケーソンのそれよりも小さくなっており、かつ鉛直方向力も生じている。

また、消波部重量も増加しているため、滑動、転倒の安全率はそれぞれ3.44、5.07と曲面スリットケーソンのそれらよりも大きな値となっている。端趾圧についても曲面スリットケーソンでは、 $33.9 t/m^2$ であったが、曲面ケーソンでは $27.6 t/m^2$ と小さくなっている。以上のことから、曲面ケーソンは曲面スリットケーソンより安全側であることがわかる。

曲面ケーソンでは不透過壁の面にも波力が作用するためケーソンの回転を生じる恐れがあるが、両側に他のケーソンが設置された状態ではこれにより回転は拘束されるため問題はない。しかし、堤頭函に曲面ケーソンが設置された場合には回転に対する安定性の検討を行う必要が

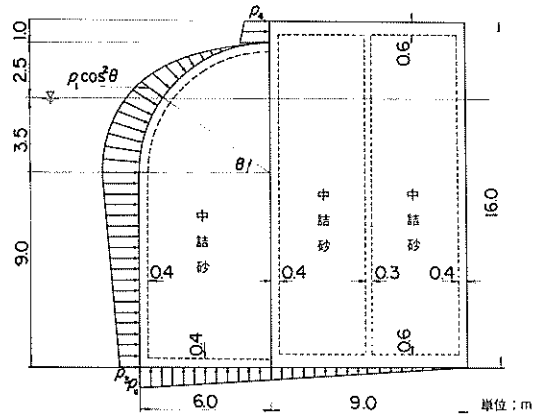


図-83 曲面ケーソンと作用波圧

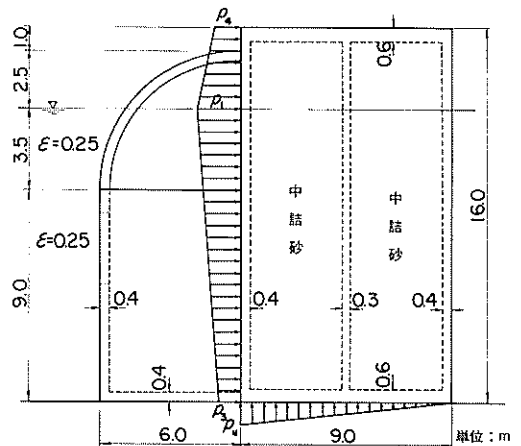


図-84 曲面スリットケーソンと作用波圧

ある。その場合、回転の抵抗モーメントを生ずる端趾圧は $\theta = 0^\circ$ では前趾端で小さく後趾端で大きな合形分布となるが、斜め入射波になると波の当る不透過壁下端での揚圧力が生じるためその分そこでの端趾圧は減少する。したがって、斜め入射波に対する回転の検討は、面的な端趾圧分布を仮定して行う必要がある。

7. むすび

本研究の結果得た主要な結論をまとめると以下の通りである。

1) 消波部以外は同一の構造条件、波浪条件のもとで行った断面実験の結果、曲面スリットケーソンは、縦スリットケーソン、2重縦スリットケーソンと比較して、反射率は低く、消波性能が優れていた。極小反射率は有義波周期の波長に対する遊水室の幅の比 $B_0/L_{1/3}$ が $0.1 \sim 0.25$ のときであり、極小反射率は約 0.25 であった。

2) 斜め入射波に対する曲面スリットケーソンの反射率は、水面付近が隔壁で拘束されない条件では、波の入射方向にみた見掛けの遊水室幅が影響を与え、有義波周期の波長に対するこれの比 $B_0/L_{1/3} \cos \theta$ が断面実験の結果と同様に、 $0.1 \sim 0.25$ のとき反射率は極小となっている。 $B_0/L_{1/3} \cos \theta$ がこれより小さい条件では、 $B_0/L_{1/3} \cos \theta$ が大きくなるほど、すなわち、入射角 θ が大きくなるほど、反射率は小さくなる。もちろん、遊水室幅のとり方によっても異なるが、通常考えられる構造条件、波浪条件では、 $B_0/L_{1/3} \cos \theta$ がこの範囲にあると考えられるため、斜め入射波になるほど、反射率は低下するため有利となる。

3) 曲面スリットケーソン遊水室内では、衝撃波圧が働き遊水室内全域に伝播するが、斜め入射波となるほど、この衝撃波圧は減少する。特に、遊水室の上段のように隔壁がないところでは、遊水室下段のように隔壁で拘束されるところと比較して、波圧の減少は大きい。

4) この結果をもとに、部材設計波力の波向きによる低減係数として、遊水室背後壁上段では $0.5(1 + \cos^2 \theta)$ 、背後壁下段では $0.5(1 + \cos \theta)$ を用いれば良い。また、スリット部材、隔壁等の部材の設計波力強度の低減係数は、次のように与える。

まず、曲面スリット部材の波圧分布を与える部材両端での波圧強度 p_A^+ 、 p_A^- および p_B^+ 、 p_B^- のうち、遊水室から外側へ合力が作用するときに支配的となる曲面スリット部材上端での波力強度 p_B^- については、 $0.5(1 + \cos^2 \theta)$ で波力を低減でき、遊水室内に合力が作用するときに支配的となる曲面スリット部材下端で

の波力強度 p_A^+ については $0.5(1 + \cos \theta)$ で波力を低減できる。また、鉛直スリット部材、同部材下部の不透過部、底版も $0.5(1 + \cos \theta)$ で波力を低減できる。しかし、遊水室内の隔壁については、波向きによる低減は考えないものとする。

5) 消波部不透過なケーソンに隣接する場合には、斜め入射波になるほど、不透過壁のセキ止め効果により、不透過壁面および遊水室内部に衝撃波圧が発生する。曲面スリット部材に働く合力が遊水室内に向って作用するときに支配的となる p_A^+ については、 $\lambda_{c\theta}$ は θ が増すにつれ減少する傾向にはあるが、 $\theta = 0^\circ$ のとき約 1.2 となっている。また、遊水室内から外へ外力が作用するとき支配的となる p_B^- については、 $\lambda_{c\theta}$ は θ が増すにつれ増加する傾向にあり、 $\theta = 45^\circ$ では、 $\lambda_{c\theta}$ は約 1.8 である。しかし、入射角や水深等の条件によっては p_A^+ 、 p_B^- とも、 $\lambda_{c\theta}$ はこれらの値より大きくなることもあるので、部材の設計にあたっては十分留意する必要がある。

6) 斜め入射波に対して新たに生じる曲面スリット部材側面および隔壁への波力としては、以下のようにする。曲面スリット部材側面には $0.5 w_0 H_I$ 、隔壁には $0.5 w_0 H_I$ の波力を波の入射状況が必ずしも均一でないことを考慮して入射角に無関係に作用するものとする。

また、曲面スリットケーソンに隣接する消波部不透過ケーソンの不透壁には、条件によって $2.5 w_0 H_I$ の波力が作用することがある。

7) 曲面スリットケーソンの消波部を完全に埋め込んだ曲面ケーソンの安定性の検討には、外力として合田波力を用いた。同じ条件で曲面スリットケーソンに対して行った安定計算結果と比較すると、合田波力は曲面ケーソンの方が大きくなるものの滑動力および転倒モーメントは逆に小さくなり、安全率は大きくなる。ケーソン本体後端での端趾圧についても曲面スリットケーソンのそれより小さくなっており、全体的に安全側な構造となる。

なお、堤頭函として曲面ケーソンが用いられるときには、面的な端趾圧分布を考慮してその回転に対する安定性を検討する必要がある。

以上、斜め入射波に対する曲面スリットケーソンの反射および波力特性について波向きの影響を検討したが、まえがきでも述べたように、本研究は波向きの効果が、正面から入射するときと比べてどの程度であるかに主要な目的があり、基準となる $\theta = 0^\circ$ での設計波力については、既に報告されている成果¹⁷⁾を参考にして頂きたい。

最後に、本実験は昭和56年度から始まり3年間継続

されたが、その間、合田水工部長から貴重な御助言を頂いた。ここに記して感謝する次第である。また、防波堤研究室、波エネルギー研究室の諸氏には実験の遂行にあたり、多大な協力を得た。さらに、昭和58年度防波堤研究室研修生石丸敬純氏(PSコンクリート株式会社)には、消波部不透過ケーソンに隣接する場合の実験、およびデータ整理に多大の協力を頂いた。ここに記して各位に厚く御礼申し上げる次第である。

(1984年3月31日受付)

参 考 文 献

- 1) Jarlan, G.E. : A perforated vertical wall break-water, The Dock and Harbour Authority, Vol.41, No.488, April 1961, pp.394~398.
- 2) 谷本勝利・原中祐人・富田英治・和泉田芳和・鈴木論司 : 曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第19巻第4号, 1981, pp.3~53.
- 3) 富田英治 : 不規則波実験制御解析システムについて, 港湾技研資料, No.452, 1983, 34 p.
- 4) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地治 : 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, No.248, 1976, 28 p.
- 5) 合田良実 : 衝撃荷重の測定について, 港湾技研資料, No.33, 1967, pp.1~41.
- 6) 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, No.474, 1983, 24 p.
- 7) 前出2)に同じ
- 8) たとえば, 川上眺石 : 応用弾性学, 共立出版, 1968, pp.198~202.
- 9) 谷本勝利・吉本靖俊 : 直立消波ケーソンの反射率に関する理論及び実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第21巻第3号, 1982, pp.43~77.
- 10) 谷本勝利・小島郎史・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, No.416, 1982, 29 p.
- 11) 谷本勝利・原中祐人・富田英治・村永努・鈴木論司 : マルチセルラーケーソンの水理特性に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第20巻第2号, 1981, pp.41~74.
- 12) 谷本勝利・吉本靖俊 : スリットケーソンの反射率に及ぼす諸要因の影響, 第29回海岸工学講演会論文集, 1982, pp.389~393.
- 13) 井島武士・奥蘭英明・牛房幸光 : 遊水部をもつ護岸に作用する斜め入射波の反射率について, 九大工学集報, 第51巻第3号, 1978, pp.245~250.
- 14) 前出9)と同じ
- 15) 工藤秀雄・長友文昭・辻清次・橋立洋一・米澤朗 : 斜め入射波に対する直立消波構造物の消波特性について — 水理模型実験報告 — , 第28回海岸工学講演会論文集, 1981, pp.377~380.
- 16) 前出2)に同じ
- 17) 前出2)に同じ

主要記号一覧

A_1 : 測点 α_1 の合成波の余弦振幅	M_H : 曲面スリット部材 D の測点 STD に作用する法線方向の曲げモーメント
A_2 : 測点 α_2 の合成波の余弦振幅	M_{Pk} : 曲面ケーソン曲率中心における水平力 P_k によるモーメント
a : スリット部材幅	M_{Pv} : 曲面ケーソン曲率中心における鉛直力 P_v によるモーメント
α_I : 入射波振幅	M_T : 曲面スリット部材 D の測点 STD に作用するねじれモーメント
α_R : 反射波振幅	M_V : 曲面スリット部材 D の曲面に作用する力による測点 STD での曲げモーメント
B_M : マウンド法肩幅	N : 曲面スリット部材 D の測点 STD における軸力
B_0 : 直立消波ケーソンの消波部幅	P_T : 曲面スリット部材曲面に作用する波圧の合力
B_1 : 測点 α_1 の合成波の正弦振幅	P_k : 曲面ケーソンの曲面壁に作用する水平合力
B_2 : 測点 α_2 の合成波の正弦振幅	P_v : 曲面ケーソンの曲面壁に作用する鉛直合力
b : スリット部材厚	p : 曲面スリット部材波力強度
E : 弾性係数	p_A : 曲面スリット部材下端での波力強度
E_I : 入射波のエネルギー	p_B : 曲面スリット部材上端での波力強度
E_R : 反射波のエネルギー	p_C : 鉛直スリット部材波力強度
e : 入力基準電圧	p_D : 曲面スリット部材側面での波力強度
f_N : 固有振動数	p_{L1} : 測点 LP1 における波圧
G : 剛性係数	p_{L2} : 測点 LP2 における波圧
H_I : 入射波高	p_{L3} : 測点 LP3 における波圧
$H_I \frac{1}{3}$: 入射波有義波高	p_{L4} : 測点 LP4 における波圧
H_{max} : 最大波高	p_{L5} : 測点 LP5 における波圧
h : 水深	p_{L6} : 測点 LP6 における波圧
h' : マウンド上水深	p_{S1} : 測点 SP1 における波圧
h_C : ケーソン天端高	p_{S2} : 測点 SP2 における波圧
h_M : マウンド高	p_{S3} : 測点 SP3 における波圧
h_q : 遊水室内水深	p_{S4} : 測点 SP4 における波圧
h_{pk} : 式(9)で与えられる距離	p_{S5} : 測点 SP5 における波圧
h_{pv} : 曲面ケーソンの曲面壁に作用する水平合力の作用位置	p_{S6} : 測点 SP6 における波圧
h_{pv} : 曲面ケーソンの曲面壁に作用する鉛直合力の作用位置	p_{S7} : 測点 SP7 における波圧
I : 断面二次モーメント	p_{S8} : 測点 SP8 における波圧
J : ねじり定数	p_{S9} : 測点 SP9 における波圧
K_R : 反射率	p_a : 曲面ケーソンの曲面壁に作用する波力強度
$L \frac{1}{3}$: 有義波周期に対する波長	p_b : 曲面ケーソンの曲面壁に作用する波力強度
l : スリット部材長	p_u : 揚圧力強度
l_c : 曲面スリット壁外面の静水面上の天端高	p_n : 曲面ケーソンの曲面壁に垂直に作用する波圧
l_1 : 消波部透過壁厚	p_1 : 合田式による静水面での波圧強度
l_2 : 消波部遊水室幅	p_3 : 合田式によるケーソン下端での波圧強度
Δl : 波高計間隔	p_4 : 合田式によるケーソン上端での波圧強度
M_A : 曲面スリット部材 B の測点 STB での曲げモーメント	R : 曲面スリット壁の曲率半径
M_B : 曲面スリット部材 A の測点 STA での曲げモーメント	s : 透過壁開口部幅
M_C : 鉛直スリット部材 C の測点 STC における曲げモーメント	T_N : 固有振動周期
	$T \frac{1}{3}$: 有義波周期

- ε : 開口比
- ε_I : 入射波位相
- ε_R : 反射波位相
- ε_A : 曲面スリット部材Aの測定 STA でのひずみ量
(2 ゲージ)
- ε_B : 曲面スリット部材Bの測点 STB でのひずみ量
(2 ゲージ)
- ε_C : 鉛直スリット部材Cの測点 STC でのひずみ量
(2 ゲージ)
- ε_D : 曲面スリット部材Dの測点 STD でのひずみ量
(4 ゲージ)
- ε_F : 曲面スリット部材Fの測点 STF でのひずみ量
(2 ゲージ)
- ε_G : 曲面スリット部材Gの測点 STG でのひずみ量
(2 ゲージ)
- ε_T : 曲面スリット部材Dの測点 STD におけるねじりモーメント M_T によるひずみ量
- ε_V : 曲面スリット部材Dの測点 STD における曲げモーメント M_V によるひずみ量
- ε_N : 曲面スリット部材Dの測点 STD における軸力 N によるひずみ量
- η_I : 入射波水位
- η_R : 反射波水位
- η_1 : 測点 1 での合成波水位
- η_2 : 測点 2 での合成波水位
- θ : 曲面スリット部材中心軸各位置の曲率中心方向と水平面との角度
- θ : 入射波角度
- λ_θ : 波向きによる波力の低減係数
- $\lambda_{c\theta}$: 消波部不透過ケーソンに隣接する場合の波力の増加係数

港湾技研資料 No. 493

1984・6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 東京プリント

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