

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

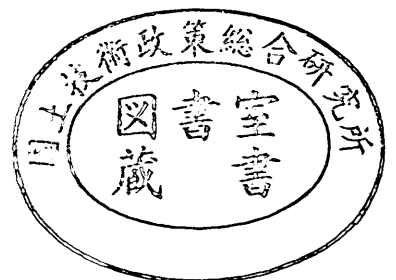
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 19

NO. 4

DEC. 1980

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第19巻 第4号 (Vol. 19, No. 4), 1980年12月 (Dec. 1980)

目 次 (CONTENTS)

1. 曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究
.....谷本勝利・原中祐人・富田英治..... 3
(A Hydraulic Experimental Study on Curved Slit Caisson
.....Katsutoshi TANIMOTO, Suketo HARANAKA, Eiji TOMIDA,
Yoshikazu IZUMIDA and Satoshi SUZUMURA)
2. 漂砂および海浜特性の観点に立った我が国海浜の地域区分.....田中則男..... 55
(The Delimitation of Coastal Regions in Japan from the View Point of Coastal
EngineeringNorio TANAKA)
3. ホーンジョイントによる PC プレキャスト版舗装の開発
.....佐藤勝久・福手 勤・山崎英男・犬飼晴雄..... 101
(Development of PC Precast Slab Pavement Connected with Horn-joints
.....Katsuhisa SATO, Tsutomu FUKUTE, Hideo YAMAZAKI and Haruo INUKAI)

1. 曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究

谷 本 勝 利*・原 中 祐 人**・富 田 英 治***
和 泉 田 芳 和****・鈴 村 諭 司***

要 旨

通常のケーソン堤の短所として波の反射率が高いこと、およびマウンドと波の条件によっては強大な波力が発現することが挙げられる。この対策として消波ブロック被覆堤が多く用いられているが、工費の増加が難点であり、特に大水深になるほど問題となる。そのため、消波性能において消波ブロック被覆堤にそん色なく、大水深・大波浪条件においても適用性の高い消波ケーソンとして曲面スリットケーソンを開発した。本構造はケーソン本体の前面に曲面縦スリット壁を設け、ほぼ 1/4 円形状の遊水室を形成するところに特徴を有する消波ケーソンである。

本報告はこの曲面スリットケーソンの水理特性を実験的に明らかにし、消波性能の面からの曲面スリット壁諸元の決め方、安定性の検討および部材計算における波力条件の与え方を示したものである。

曲面スリット壁諸元のうち反射率に影響を及ぼす主要なものは、開口比、外半径、および静水面上の天端高さである。これらを適切に与えることによって、曲面スリットケーソンの反射波軽減効果は多孔壁や縦スリットケーソンなど通常の直立消波ケーソンよりやや高くなり、消波ブロック被覆堤と同程度の効果が期待できる。

波力に関しては、曲面スリット壁外側波面がケーソン上部工前面に達し遊水室をおおった瞬間、あるいは遊水室内波面が上昇して曲面スリット壁上端下面に衝突した瞬間に、遊水室内に衝撃圧が発生し、部材の設計においてこれを考慮しなければならない。しかし、衝撃圧は遊水室周辺全ての部材に同時に働き、各部材に働く波力の相殺効果があるため、滑動および転倒に及ぼす合成波力としてはそれほど大きくならない。滑動実験の結果では通常のケーソンと比較して安定性が高く、部材の強度が十分確保されておれば、滑動に関する限り通常のケーソン堤より粘り強い構造といえる。

* 水工部 防波堤研究室長
** 水工部 水理計測担当主任研究官
*** 水工部 防波堤研究室
**** 海洋水理部 海水汚染研究室 (前水工部防波堤研究室)

A Hydraulic Experimental Study on Curved Slit Caisson Breakwaters

Katsutoshi TANIMOTO*

Suketo HARANAKA**

Eiji TOMIDA***

Yoshikazu IZUMIDA****

Satoshi SUZUMURA***

Synopsis

A new type of wave dissipating caisson with a permeable wall and a wave chamber has been developed and is called as a curved slit caisson in the present paper. The permeable front wall of the caisson is an arc-shaped slit wall and the shape of wave chamber with a horizontal bottom and a vertical rear wall is a quarter circle in the side view.

A series of model experiments has been conducted to investigate the following hydraulic aspects of the curved slit caisson:

- (1) wave reflection, overtopping, and transmission due to random waves,
- (2) wave forces on structural members of the caisson,
- (3) resultant wave forces on the caisson and the stability against sliding.

Structural factors which influence to the wave reflection of curved slit caisson are the ratio of the width of a gap to the total width of a gap and a solid member ϵ , the radius R , and the crest height of the curved slit wall above the still water surface l_c . The following relations are recommended on the basis of experimental results:

$$\epsilon=0.25, \quad R=0.10L, \quad l_c=0.30R$$

where L is the wave length corresponding to the significant wave period. It is concluded that the wave reflection of curved slit caisson is slightly less than that of ordinary type of wave dissipating caisson with a vertical permeable wall and is equivalent to the wave reflection of caisson breakwaters covered with wave dissipating concrete blocks.

As to wave forces, shock pressures are caused at the moment when the wave chamber is covered due to outside water flow along the curved slit wall, or when the water surface in the wave chamber impacts upwardly the top of curved slit wall. These shock pressures must be considered in the structural design of members bounding the wave chamber. The resultant wave forces effective to sliding and overturning of the caisson, however, are not large, since downward wave forces act on the bottom slab of wave chamber. It is confirmed by the stability tests that the sliding distance of curved slit caisson breakwater due to the action of storm waves exceeding the design waves is considerably less than that of ordinary caisson breakwater.

* Chief of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division

** Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division

*** Members of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division

**** Member of Marine Diffusion Laboratory, Marine Hydrodynamics Division
(Ex-member of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division)

目 次

要 旨	3
1. ま え が き	7
2. 実験の種類と実験水路	8
2.1 実験の種類	8
2.2 実験水路	8
3. 反射特性	9
3.1 模型および実験の方法	9
3.2 スリット部の構造による反射率の変化	13
3.3 水理条件による反射率の変化	17
3.4 他構造との比較	19
4. 越波および伝達波	22
4.1 実験の方法	22
4.2 越波特性	23
4.3 伝達率	24
5. 部材に働く波力	25
5.1 模型および実験の方法	25
5.2 波の作用状況と衝撃圧の発生	28
5.3 スリット部材に働く波力	35
5.4 遊水室内壁に働く波圧	37
5.5 部材の設計に用いる波力	39
6. ケーソン全体に働く波力および滑動安定性	40
6.1 実験の方法	40
6.2 全波力	45
6.3 滑動安定性	49
6.4 安定性の検討に用いる設計波力	50
7. 主要な結論	50
8. あとがき	51
参考文献	51
主要記号表	52

1. まえがき

わが国における防波堤の代表的構造様式は周知のようにケーソン式混成堤であり、多年にわたる調査研究、施工実績を背景として、その設計・施工技術については世界に誇り得るものとなっている。しかしながら、この構造を水理的にみた場合、前面が不透過な直立壁であるため反射波が大きいとか、波の作用を一面で受けるため条件によっては作用波力が著しく巨大になるといった短所を有している。

こうしたケーソン式混成堤の難点に対し、従来比較的水深の浅い所では、直立壁の前面に消波ブロックを投入した消波ブロック被覆堤を採用することで対処してきた。しかし、この構造においても、大水深・大波浪の条件に対しては、ブロックの大重量化に伴う強度の問題、堤体の大断面化に伴う工費の増大といった問題が生じてくる。

一方、直立構造であってしかも消波機構を具備した構造として、1961年に Jarlan¹⁾ が孔あきケーソンを提案し、世界的に広く注目を集めた。カナダのコモ湾において岸壁兼用の防波堤に採用されたのが初めて²⁾、その後フランスなどの各国において用いられているようである。わが国においても、1965年頃から各種の直立消波ブロックや消波ケーソンが研究開発されるようになり、比較的波の穏やかな内湾等における防波堤や護岸などにこの形式のものが次第に採用されるようになってきたのは周知のとおりである。このうち、一体構造であるところ

ろに特徴を有する消波ケーソンは外海における本格的防波堤としても期待の高い構造といえる。

しかしながら、波浪条件の厳しい外海において採用していくためには、強大な波力に耐えるだけの安定性と部材強度を確保しやすい構造であることが好ましい。本報告で扱う曲面スリットケーソンは、図-1にその発想の経緯を示しているように、こうした点を考慮して外海においても適用性の高い消波ケーソンとして開発を進めてきたものである。すなわち、発想の原点は耐波安定性の面で優れている斜面ケーソン（斜面壁堤）と、消波性能の面で優れている従来の直立消波ケーソン（遊水堤）の結合にあり、その単純な結合形である斜面スリットケーソン（斜面スリット壁堤）から、構造上の利点を考慮してスリット壁を滑らかな曲面構造とした曲面スリットケーソン（曲面スリット壁堤）へと発展させたものである³⁾。

曲面スリットケーソンはこのようにケーソン本体の前面に曲面縦スリット壁を設け、ほぼ1/4円形状の遊水室を形成するところに特徴を有する消波ケーソンである。図-2にスケッチを示しているが、この場合曲面スリット壁の下部はケーソンの高さに応じて不透過な箱型床版としている。本報告においては、このようにほぼ1/4円形状の遊水室だけを具備する構造を基本型と呼ぶ。しかし、ケーソンの背が相当高い場合、あるいは潮差が大きい場合など、この下部を透過構造としてよいわけで、図-3にスケッチを示しているようにケーソン本体の前面下段にスリット壁あるいは多孔壁による四角形状の遊水室

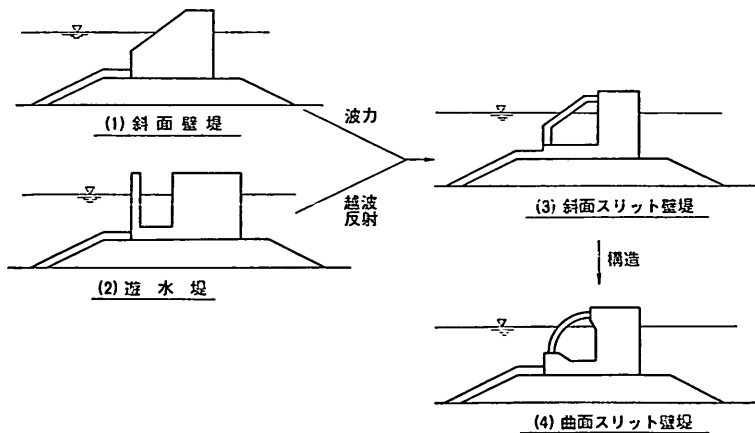


図-1 曲面スリットケーソンアイデアへの経緯

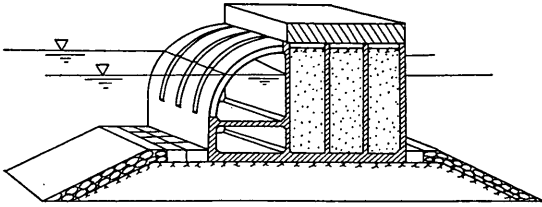


図-2 曲面スリットケーソン堤（基本型）のスケッチ

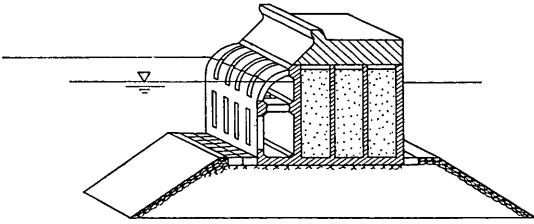


図-3 曲面スリットケーソン堤（複合型）のスケッチ

を設けた二段構造を複合型と呼ぶ。

こうした基本型および複合型の曲面スリットケーソンについて、昭和 51 年度から水理模型実験に着手し、その水理特性のは握に努めてきた。本報告はこれらの結果をとりまとめ、曲面スリットケーソンの水理特性を示すとともに、消波性能の面からのスリット構造の決定法、ならびに基本および部材設計における波力条件の与え方を提案するものである。

2. 実験の種類と実験水路

2.1 実験の種類

本研究において実施した実験の種類は以下のとおりである。

- 1) 反射波に関する実験
- 2) 越波・伝達波に関する実験
- 3) 部材に働く波力に関する実験
- 4) ケーソン全体に働く波力に関する実験
- 5) 滑動安定性に関する実験

このうち、1), 2), 4), 5) の反射, 越波・伝達波, 全波力および滑動安定性に関する実験は次に述べる不規則波仮設水路において 4) を除き不規則波により, また 3) の部材波力実験は 105 m 大型造波水路において規則波により実施したものである。

2.2 実験水路

(1) 不規則波仮設水路

本水路は中型平面水槽 (30 m × 20 m × 1 m) の一部を幅 5 m で仕切った仮設水路で、図-4 に示しているように、その中にさらに幅 50 cm の内水路を設けている。造波機は低慣性直流電動機で駆動する可搬式ピストン型で、入力信号の波形に追随して任意波形の波を造波することができる。造波板の幅はほぼ外水路幅一杯の 4.8 m であり、内水路の側壁は造波板の中立位置から 6.6 m 地点に始まる。このように、内水路始点と造波板の間に距離を設けてあるのは、内水路に設置する模型構造物からの反射波を分散させ、造波板からの再反射波の影響を軽

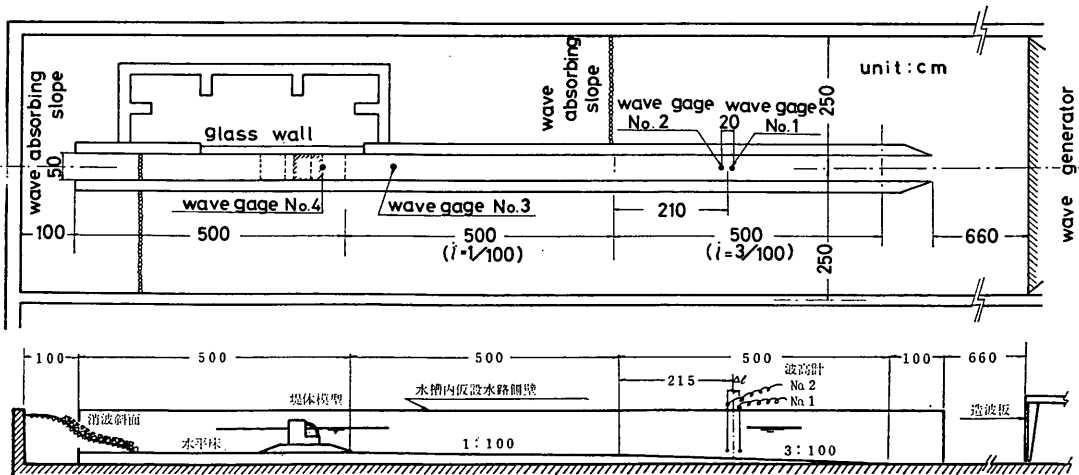


図-4 不規則波仮設水路

曲面スリットケーンソンの水理特性に関する実験的研究

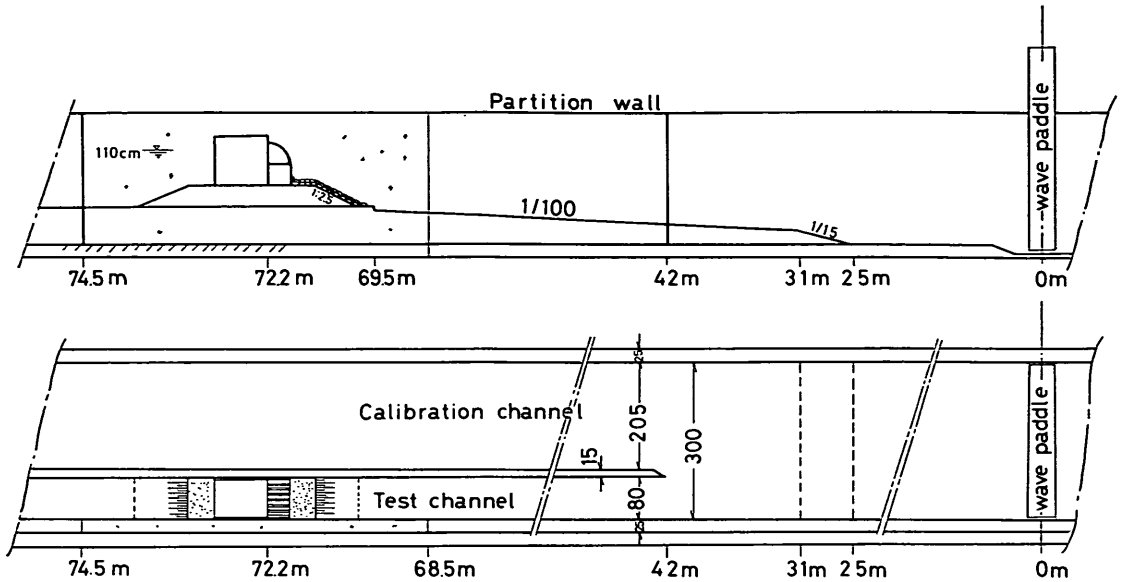


図-5 105 m 大型造波水路

減させるためである。

堤体模型設置付近の内水路壁片面は長さ約 3 m にわたり、観測用ガラス窓としており、その外側は止水壁で囲んである。水路床は造波板中立位置から 7.6~12.6 m の 5 m 区間を 3/100 勾配、つづいて 17.6 m までの 5 m 区間を 1/100 勾配としてあり、残りの部分は水平床である。水路の終端および観測窓囲い壁の前部には碎石を模型消波ブロックで被覆した消波斜面としてある。この消波斜面の平均勾配は 1 : 3 程度である。

(2) 105 m 大型造波水路

本水路は長さ 105 m、幅 3.0 m、深さ 2.5 m の半地下式の大型造波水路で、図-5 に示しているように水路床は造波板中立位置から 27.5 m までが水平、そのあと勾配 1/15 のすり付け部を設け、31 m から 72 m の区間は 1/100 勾配である。また、水路途中から隔壁を設けており、幅 0.80 m と 2.05 m の水路に二分している。今回の実験において模型を設置したのは、このうち観測窓側の幅 0.80 m の方である。

本水路に設けてある造波装置は電動機駆動のペンデュラム式ユニバーサル型で、最大波高 80 cm 程度までの規則波を造波することができる。

3. 反射特性

3.1 模型および実験の方法

(1) 模型

反射波に関する実験に用いた曲面スリットケーンソンの模型は 図-6 に示す基本型と複合型の 2 種である。直

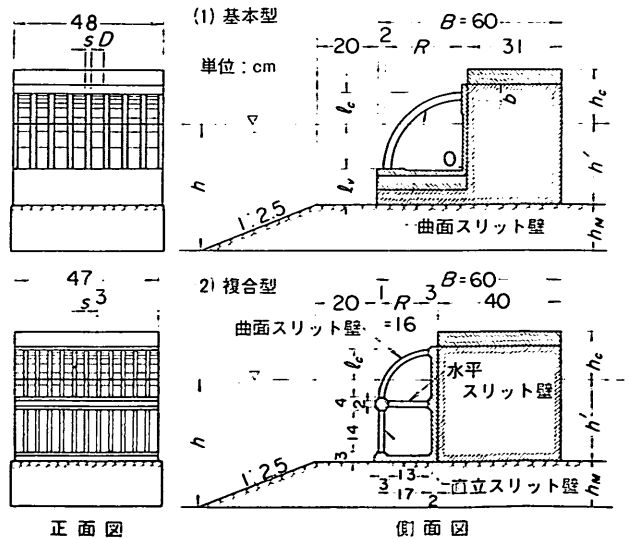


図-6 曲面スリットケーンソンの模型 (反射実験)

立部はいずれもコンクリートで製作したケーソン本体部にアクリル合成樹脂材で製作したスリット消波部をボルトで結合して一体化したものである。ただし、基本型の模型は、ケーソン全体の床版が一体のコンクリート版となるように、ケーソン本体部に張り出し版を設けてあり、その上にスリット消波部を固定するようにしてある。

図中記号で示し、数値を示していない諸元は実験ケースによって変化する量である。曲面スリット壁は断面において 1/4 の円弧をなし、円の中心を O 、外半径を R で表わす。基本型の R は 20 cm と 25 cm の 2 種を用意し、開口幅 s は任意に調節可能としてある。スリット部材の単位幅は 2 cm であるが、これを 2 本、3 本と密接することによって、4 cm、6 cm と部材幅 D を変えることができる。また、 $R=25$ cm については、部材厚 b が 1.5、3.0、4.5 cm の 3 種を用意した。以上、部材の断面形は長方形であるが、そのほか $R=25$ cm について、断面の直径 D が 3 cm の円形断面部材も用意した。

複合型の消波部は曲面スリット壁のほかに、直立および水平の透過壁を有する。今回の実験で対象としたのはいずれも長方形断面部材を用いたスリット壁である。曲面スリット壁の外半径 R は 16 cm、直立スリット壁の内寸高さは 14 cm、水平スリット壁の内寸長さは 13 cm であり、スリット部材幅 D および厚さ b はいずれも 3 cm および 2 cm で一定とした。ただし、開口幅 s は各スリットごとに任意に調節可能な構造としてある。

なお、曲面スリット壁の規模を表わすパラメータとして外半径 R を用いるが、本模型においてはスリット部材取付部を設けてあり、そのため前出の図-6 に示したように曲率の中心は遊水室後壁上に位置しない。他構造との比較においては消波部の規模を表わすパラメータとして、前面透過壁と後面不透過壁の最大幅で表わすのがよく、そのため透過壁厚を含めたこの最大遊水幅を B_0 で表わす。本模型における B_0 と R の間の関係は次のとおりである。

$$\text{基本型 } B_0 = R + 0.5 \text{ (cm)}$$

$$\text{複合型 } B_0 = R + 1.0 \text{ (cm)}$$

(2) 反射率の算定法

本実験の不規則波の反射率の算定は合田ほか⁴⁾の方法による入・反射波の分離推定法によった。これは近接した 2 点で同時に測定した波形を FFT 法により有限フーリエ級数で表示して、各成分波に対し入・反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る。この方法は分離に際して 2 点における位相差を用いるこ

とから、2 点位相差法とも呼ばれる。不規則波の反射率 K_R はこの入・反射波のエネルギーを E_I, E_R として、式 (1) により定義する。

$$K_R = \sqrt{E_R/E_I} \quad (1)$$

これは波群全体の平均的な反射率を表わすが、入・反射波の波高分布がレーリー分布にほぼ一致するような場合には代表波高同志の比、たとえば入・反射波の有義波高の比と考えてもよい。ただし、測点の間隔 Δl によって分離可能な周波数域が限定されるので、式 (1) のエネルギーの計算は有効周波数域に対してのみ行う。そのため、分離入射波高 H_I 、および反射波高 H_R はその自乗和が合成波の波高 H_S (2 点での平均) の自乗に等しいとにおいて式 (2) により推定する。

$$\left. \begin{aligned} H_I &= \frac{1}{\sqrt{1+K_R^2}} H_S \\ H_R &= \frac{K_R}{\sqrt{1+K_R^2}} H_S \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

この方法は厳密には不規則波が成分波の線型重ね合わせで表わされ、非線型干渉がなく、かつ反射波のスペクトルが著しく乱されない場合に成り立つものであるが、実際には広い条件に対しかなり上手く適用できる便利な方法である。

本実験においては、分離計算のための波形の測定は前出図-4 中に示した測点 No. 1, No. 2 に設置した 2 台の容量式波高計によった。この地点は 3/100 勾配水路床上のほぼ中央にあたる。入・反射波の分離推定法は一定水深に対するものであるが、 Δl は周期により 10~20 cm であり、この間での水深の変化は小さい。そのため、2 点における平均水深を用いて、一定水深に対する入・反射波の分離推定法をそのまま適用した。この平均水深を h^* で表わすと、本実験の場合堤体設置位置での水深 h との関係は次のようになる。

$$h^* = h + 11.5 \text{ (cm)}$$

本報告における不規則波実験の目標スペクトルはすべて Bretschneider・光易型⁵⁾である。解析においては非定常性の強い初期の波を捨て、ほぼ定常と考えられる 100~120 波を対象とした。また、反射実験における入射波の諸元は、周期については測点 No. 1, No. 2 における合成波の周期をそのまま用い、波高については水深 h^* における分離入射波高から浅水変形を考慮して水深 h における波高に換算した値を用いた。

(3) 実験ケース

反射波に関する実験は曲面スリットケーソンの反射特

曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究

性を明らかにするとともに、設計において消波性能の面からスリット構造を決定する際の指針を得るため実施したものである。実験の内容は次の2種に大別できる。

- 1) スリット構造諸元による反射率の変化
- 2) 水理条件による反射率の変化

つまり、1) は水理条件を一定にしておいてスリット部の構造条件を種々に変化させたときの反射率の変化を調べたものであり、2) は構造条件を一定にしておいて波高、周期および潮位といった水理条件を変化させたときの反射率の変化を調べたものである。

表-1 スリット部構造条件による実験ケース

ケース No.	部材の断面形	h_0 (cm)	R (cm)	b (cm)	D (cm)	l_c (cm)	s_A (cm)	s_B (cm)	s_C (cm)	ϵ_A	ϵ_B	ϵ_C
基本型- 1	長方形	13	25	1.5	4.0	9.5	0.5	—	—	0.111	—	—
2	"	"	"	"	"	"	1.25	—	—	0.238	—	—
3	"	"	"	"	"	"	2.0	—	—	0.333	—	—
4	"	"	"	3.0	"	"	0.0	—	—	0.0	—	—
5	"	"	"	"	"	"	0.5	—	—	0.111	—	—
6	"	"	"	"	"	"	1.25	—	—	0.238	—	—
7	"	"	"	"	"	"	2.0	—	—	0.333	—	—
8	"	"	"	"	2.0	"	0.25	—	—	0.111	—	—
9	"	"	"	"	"	"	0.625	—	—	0.238	—	—
10	"	"	"	"	"	"	1.0	—	—	0.333	—	—
11	"	"	"	"	6.0	"	0.75	—	—	0.111	—	—
12	"	"	"	"	"	"	1.875	—	—	0.238	—	—
13	"	"	"	"	"	"	3.0	—	—	0.333	—	—
14	"	"	"	4.5	4.0	"	0.5	—	—	0.111	—	—
15	"	"	"	"	"	"	1.25	—	—	0.238	—	—
16	"	"	"	"	"	"	2.0	—	—	0.333	—	—
17	"	"	"	3.0	"	4.5	1.25	—	—	0.238	—	—
18	"	8	20	"	"	"	"	—	—	"	—	—
19	"	13	"	"	"	9.5	"	—	—	"	—	—
20	円形	"	25	"	3.0	"	0.375	—	—	0.111	—	—
21	"	"	"	"	"	"	0.937	—	—	0.238	—	—
22	"	"	"	"	"	"	1.5	—	—	0.333	—	—
複合型- 1	長方形	11	16	2.0	3.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	"	"	"	"	"	"	0.75	0.75	0.75	0.200	0.200	0.200
3	"	"	"	"	"	"	1.0	1.0	1.0	0.250	0.250	0.250
4	"	"	"	"	"	"	1.5	1.5	1.5	0.333	0.333	0.333
5	"	"	"	"	"	"	3.0	3.0	3.0	0.500	0.500	0.500
6	"	"	"	"	"	"	∞	∞	∞	1.000	1.000	1.000
7	"	"	"	"	"	"	1.0	1.5	1.0	0.250	0.333	0.250
8	"	"	"	"	"	"	"	3.0	"	"	0.500	"
9	"	"	"	"	"	"	"	1.0	0.75	"	0.250	0.200
10	"	"	"	"	"	"	"	"	1.5	"	"	0.333
11	"	"	"	"	"	"	"	"	∞	"	"	1.000

表-2 水理条件 (基本型)

水深 h (cm)	42			
有義波周期 $T_{1/8}$ (s)	1.10	1.45	1.90	2.10
有義波波長 L (cm)	172	255	355	399
相対水深 h/L	0.244	0.165	0.118	0.105
有義波高 $H_{1/8}$ (cm)	4.5 ~ 16 (各周期につき2種)			
波高水深比 $H_{1/8}/h$	0.11 ~ 0.38			

表-3 水理条件 (複合型)

水深 h (cm)	42					
有義波周期 $T_{1/8}$ (s)	0.73	0.87	1.08	1.30	1.58	2.03
有義波波長 L (cm)	83	116	167	220	282	384
相対水深 h/L	0.506	0.362	0.251	0.191	0.149	0.109
有義波高 $H_{1/8}$ (cm)	3.6	5.0	6.7	7.6	10.0	11.6
スティーブネス $H_{1/8}/L$	0.043	0.043	0.040	0.035	0.035	0.030

このうち、1)の実験ケースは表-1に示したとおりで、基本型を主体としている。また、この場合の水理条件は表-2および3に示したとおりである。すなわち、1)の実験は堤体設置水深 h を42 cmの一定とし、有義波周期 $T_{1/8}$ が1.10~2.10 sの4種の波に対し、以下のようなスリット部構造の影響を調べたものである。

基本型に対して、

- ① 開口比の影響…… $\varepsilon_A=0.0, 0.111, 0.238, 0.333$
- ② スリット壁厚の影響…… $b=1.5, 3.0, 4.5$ cm
- ③ スリット部材幅の影響…… $D=2.0, 4.0, 6.0$ cm
- ④ 曲面スリット壁半径の影響…… $R=20, 25$ cm
- ⑤ 曲面スリット壁設置高さの影響…… $l_c=4.5, 9.5$ cm

⑥ スリット部断面形状の影響……長方形, 円形
複合型に対しては各スリット壁の開口比の影響のみを調べている。ここに、開口比 ε は次の式で定義したものである。

$$\varepsilon = \frac{s}{D+s} \quad (3)$$

ただし、添字 A, B, C を付しているが、これらはそれぞれ曲面スリット壁, 直立スリット壁, 水平スリット壁の値であることを表す。また、 $\varepsilon=0.0$ は全開, す

なわち透き間のない状態であり、 $\varepsilon=1.0$ は全開で、表-1中の実験ケース複合型-6はスリット壁による消波部が全く無い、通常の直立ケーソンの状態である。

そのほか、次の条件は一定である。

- マウンドの厚さ $h_M=15$ cm
- マウンド上の水深 $d=27$ cm
- ケーソン全幅 $B'=60$ cm

2)の水理条件による反射率の変化は前述したように、波高, 周期, および潮位の影響を調べるものである。まず、波高の影響については、前出の表-1の基本型-6の構造条件で波高を種々に変化させたときの反射率を測定した。周期については1)の実験において既に種々の周期で反射率を測定していることになるが、これとは別に潮位の変化と合わせて新たに実験を行った。これはマウンドやケーソンの構造条件を一定にしておいて、表-4, 5に示すように水深および周期を変化させたものである。すなわち、水深は基本型 ($R=25$ cm) の場合 $h=39\sim 48$ cmの間で4種、複合型の場合 $h=42\sim 48$ cmの間で3種に変化させているが、これは潮位の変化に対応し、これによって l_c/R は基本型の場合 $0.20\sim 0.56$, 複合型の場合 $0.31\sim 0.69$ の範囲で変化する。

周期については $T_{1/8}=0.76\sim 2.07$ sの範囲で7種に

表-4 周期および潮位変化に対する実験条件

構造	基本型 $R=25\text{ cm}$			複合型 $R=16\text{ cm}$		
	h (cm)	h_c (cm)	l_c (cm)	l_c/R	h_c (cm)	l_c (cm)
39	21	14	0.56	—	—	—
42	18	11	0.44	18	11	0.69
45	15	8	0.32	15	8	0.50
48	12	5	0.20	12	5	0.31

変化させた。これはピーク周波数の異なる7種の目標スペクトルに対し、それぞれ4種ずつの波列を作成して、これを入力したときの有義波周期の平均値である。入力信号は水深を変化させても同じ信号を用いており、表-5中には基本型について $4 \times 4 = 16$ 、複合型について $4 \times 3 = 12$ 、計 28 回測定した結果の平均値と標準偏差を示しておいた。波列の種類や水深によって周期がやや変化するが、その標準偏差は平均値の 3.8% 以下である。このように、同一スペクトルを目標としても波列によって実現波の代表値が異なるのは不規則波特有の性質であり、今回の実験のように一つの波列が 100 波程度の場合、有義波周期は理論的にも 3.5% 程度の標準偏差を伴うことが知られている⁶⁾。

なお、周期および潮位変化の実験におけるマウンドの厚さは 16 cm で構造条件による反射率の変化に関する実験より 1 cm 厚い。スリット壁の開口比は 0.25 で一定としている。

3.2 スリット部の構造による反射率の変化

(1) 開口比の影響

図-7 は基本型 $R=25\text{ cm}$ 、 $l_c=9.5\text{ cm}$ 、 $D=4\text{ cm}$ 、 $b=3\text{ cm}$ の場合（基本型-4~7）の開口比と反射率の関係を示したものである。この例に認められるように、反射率は開口比によって変化する。特に、反射波軽減効果が高いとき、すなわち図において h/L が大きいとき、変化が大きく、反射率を極小とする開口比があることがわかる。このように反射率を極小とする開口比を最適開口

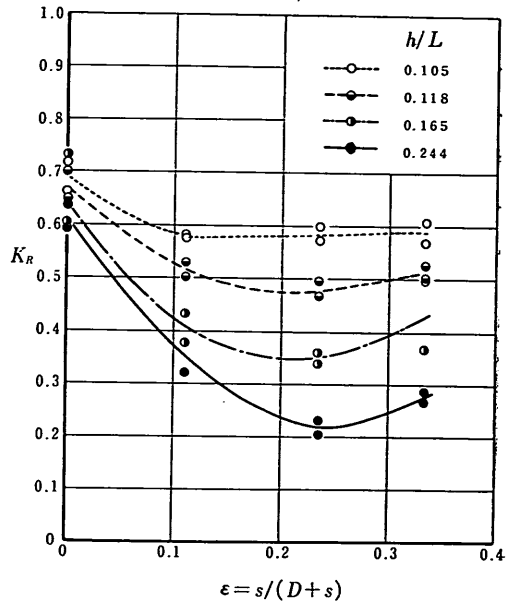


図-7 開口比による反射率の変化（基本型）

表-5 実験波の周期と波長

$T_{1/3}$ (s) 平均値±標準偏差	$h=39\text{ cm}$		$h=42\text{ cm}$		$h=45\text{ cm}$		$h=48\text{ cm}$	
	L (cm)	h/L	L (cm)	L/h	L (cm)	h/L	L (cm)	h/L
0.76 ± 0.02	89	0.438	90	0.467	90	0.500	90	0.533
0.89 ± 0.02	120	0.325	120	0.350	121	0.372	122	0.393
1.09 ± 0.02	167	0.234	170	0.265	172	0.262	174	0.276
1.31 ± 0.04	217	0.180	222	0.189	227	0.198	231	0.180
1.59 ± 0.06	279	0.140	286	0.147	294	0.153	301	0.159
2.04 ± 0.05	374	0.104	386	0.109	397	0.113	408	0.118
2.07 ± 0.05	380	0.103	392	0.107	404	0.111	415	0.116

比, そのときの反射率を極小反射率と呼ぶ。こうした傾向は基本型他の実験ケースについても同じであり, 各構造条件における最適開口比 ϵ_0 と極小反射率 $(K_R)_{\epsilon, \min}$ を各周期条件別に示すと 表-6 のとおりである。この場合, 最適開口比は h/L が小さくなるにつれて小さくなり, 極小反射率は大きくなる傾向にある。しかし, 前出の 図-7 に認められるように h/L が小さいとき, 開口比

による反射率の変化は緩慢であり, これを考慮すると長方形断面部材の場合 (基本型-1~16), 開口比を 0.20~0.25 程度とするのがよいといえる。これに対し, 円形断面部材の場合は開口比を 0.15~0.20 とやや小さくした方がよいようである。

以上, 基本型の結果を述べたが, 図-8 に複合型の開口比による変化の例を示す。これは $\epsilon_A = \epsilon_B = \epsilon_C$ と各ス

表-6 最適開口比と極小反射率 (基本型)

構造条件	基本型-1~3		基本型-4~7		基本型-8~10		基本型-11~13		基本型-14~16		基本型-20~22	
	h/L	ϵ_0	$(K_R)_{\epsilon, \min}$	ϵ_0	$(K_R)_{\epsilon, \min}$	ϵ_0	$(K_R)_{\epsilon, \min}$	ϵ_0	$(K_R)_{\epsilon, \min}$	ϵ_0	$(K_R)_{\epsilon, \min}$	ϵ_0
0.105	0.15	0.52	0.13	0.58	0.13	0.52	0.20	0.51	0.19	0.54	0.10	0.57
0.118	0.25	0.45	0.21	0.47	0.15	0.46	0.22	0.46	0.22	0.49	0.11	0.49
0.165	0.23	0.32	0.22	0.35	0.17	0.31	0.24	0.30	0.23	0.33	0.15	0.37
0.224	0.24	0.27	0.24	0.22	0.20	0.24	0.26	0.22	0.24	0.22	0.20	0.29

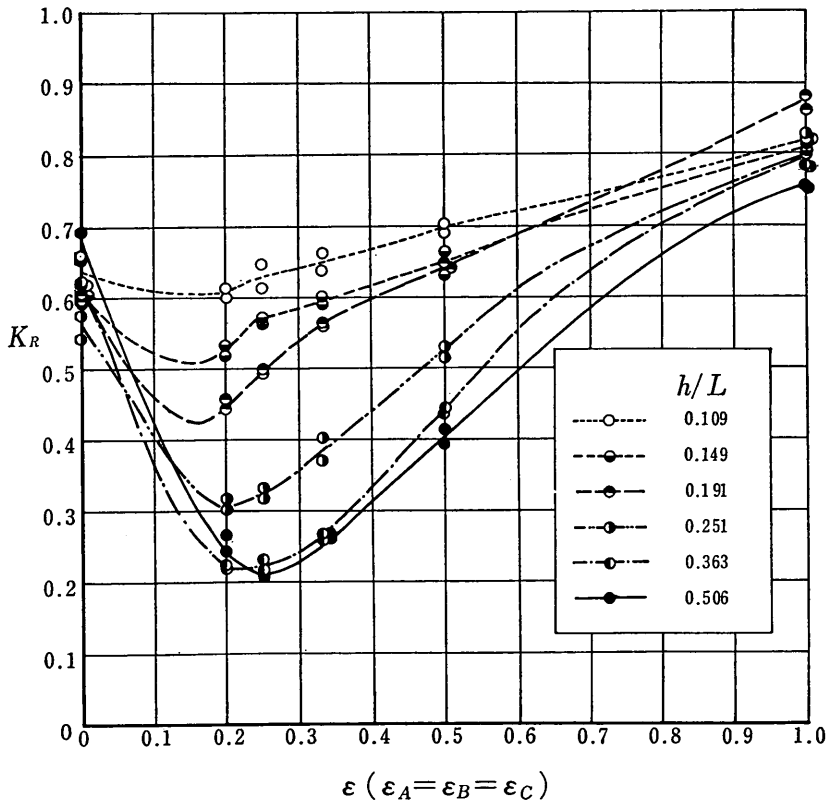


図-8 開口比による反射率の変化 (複合型)

表-7 最適開口比と極小反射率
(複合型-1~6)

h/L	ϵ_0	$(K_R)_{\epsilon \min}$
0.109	0.15	0.61
0.149	0.16	0.52
0.191	0.18	0.43
0.251	0.20	0.31
0.363	0.22	0.22
0.506	0.25	0.21

リット壁の開口比を等しくして変化させたときの結果である(複合型-1~6)。表-7に各周期別の最適開口比と極小反射率の値を示した。基本型と同様な結果であり、複合型においてもスリット壁の開口比は0.20~0.25程度とするのがよいようである。

一方、図-9は曲面スリット壁、水平スリット壁の開

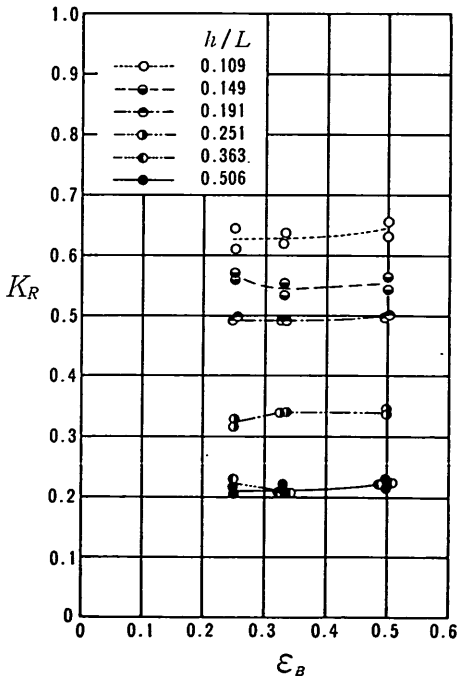


図-9 直立スリット壁開口比による反射率の変化

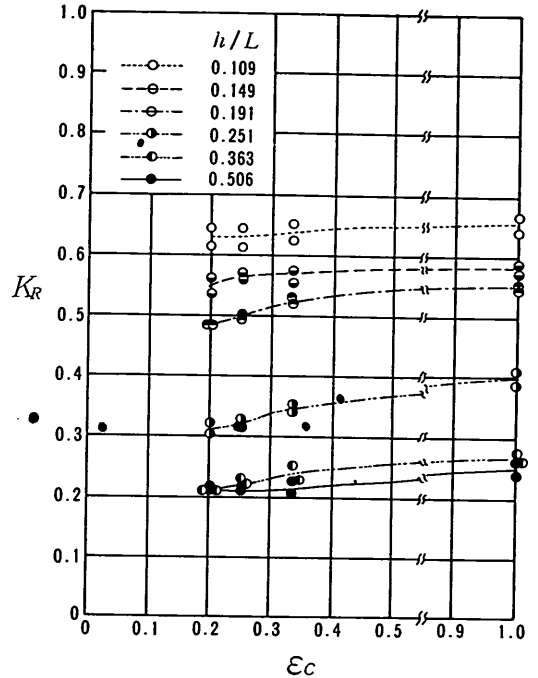


図-10 水平スリット壁開口比による反射率の変化

口比 ϵ_A , ϵ_0 を 0.25 と一定にしておいて、直立スリット壁の開口比 ϵ_B を変化させたとき(複合型-3, 7, 8)、図-10は曲面スリット壁、直立スリット壁の開口比 ϵ_A , ϵ_B を 0.25 とし、水平スリット壁の開口比 ϵ_0 を変化させたとき(複合型-3, 9~11)の結果を示したものである。これらによる反射率の変化は、 ϵ_0 を 0.2 とやや小さくした方がよい程度で、それほど大きくない。各スリット壁の開口比の中では曲面スリット壁の開口比が最も重要のようである。

(2) スリット部材厚と部材幅の影響

スリット部材厚 b および幅 D の影響については、基本型 $R=25$ cm, $l_0=9.5$ cm で、部材幅を 4 cm として厚さを変えた実験、および部材厚を 3 cm として幅を変えた実験を行って調べた。図-11はその結果をまとめて示したものである。ただし、反射率はそれぞれの条件で最適開口比に対する極小反射率 $(K_R)_{\epsilon \min}$ をとっている。周期によってやや傾向が異なるようでもあるが、いずれにしても本実験の範囲では部材厚、幅の影響は大きくない。したがって、スリットの部材厚や幅については極端でなければ、部材の強度設計および製作上の観点から決めてよいようである。

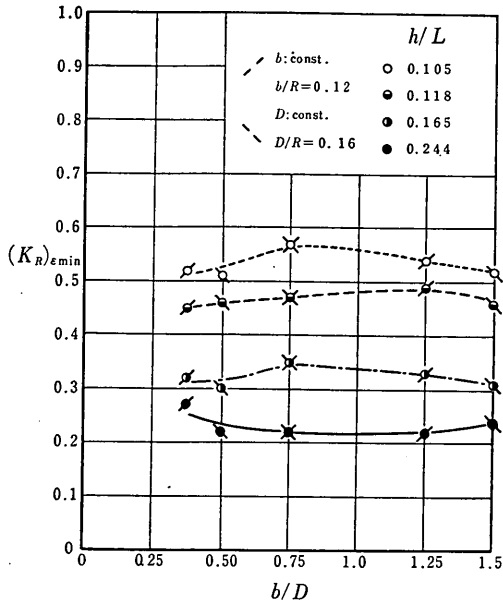


図-11 スリット部材厚と幅による反射率の変化 (基本型)

(3) 曲面スリット壁の半径と設置高さの影響

曲面スリット壁の半径をどのように決めればよいか、

またそれをどの高さに設ければよいかは本構造における非常に重要なポイントである。図-12 は $R=20$ cm および 25 cm の基本型について、 $l_0=4.5$ cm, 9.0 cm としたときの反射率の変化を示したものである。 $R/h'=0.741$ が $R=20$ cm の結果 (基本型-18, 19), $R/h'=0.926$ が $R=25$ cm の結果 (基本型-6, 17) を表わしているが、 R/h' や l_0/R によって反射率が変化することがわかる。しかし、半径 R は曲面スリット壁が適当な高さに設けられておれば、入射波の波長との関係でみた方が分りやすく、また設置高さは静水面を基準とすれば潮位によって変化する。そのため、曲面スリット壁の半径および設置高さについては 3.3 の水理条件による反射率の変化のところできさらに検討することにし、ここでは 図-12 の結果を示しておくに留める。

(4) スリット部材断面形状の影響

図-13 は曲面スリット部材の断面形状を長方形としたとき (基本型-4~7) と円形としたとき (基本型-20~22) の反射率を比較したものである。それぞれ周期ごとに最適開口比としたときの極小反射率を示したものである。結果は長方形断面とした方がややよいようであるが、円形断面であっても相当程度の反射波軽減効果が期待できる。ただし、円形断面の場合前述したように、長方形断

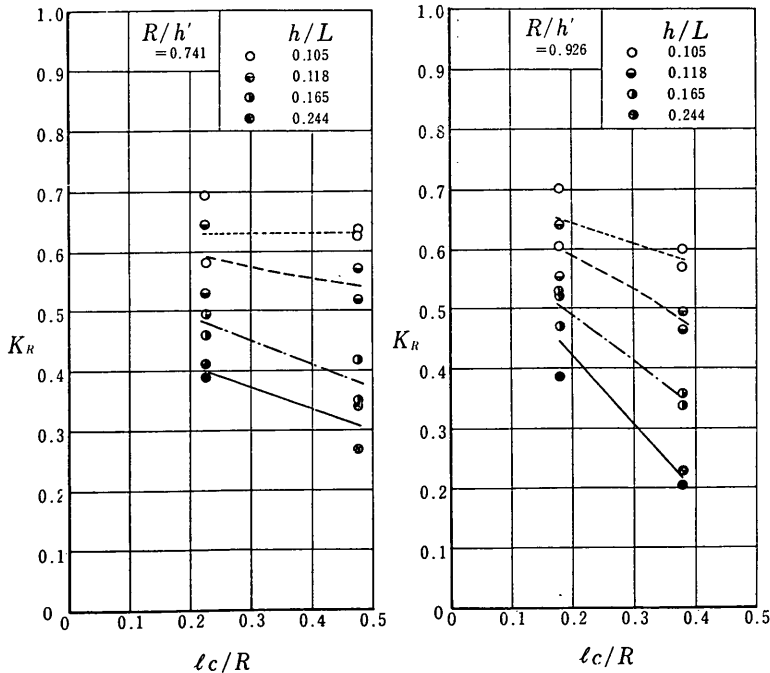


図-12 曲面スリット壁の半径と設置高さによる反射率の変化 (基本型)

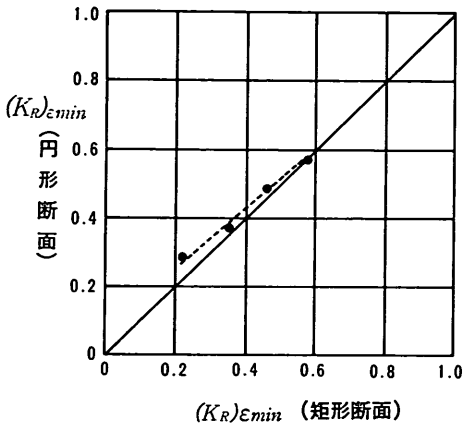


図-13 スリット部材断面形状による反射率の比較 (基本型)

面の場合より開口比をやや小さくした方がよい。これは流入・流出口として円形断面の方が滑らかであるためと考えられる。

3.3 水理条件による反射率の変化

(1) 波高による反射率の変化

直立の多孔ケーソンなどを対象とした既往の研究によると、反射率は非常に多くのパラメータに影響される^{7),8)}。中でも前述した開口比や遊水幅と入射波長の比が重要であるが、そのほかエネルギー消費の機構に関連して波高によって反射率が変化し、反射率を支配するパラメータの一つとして入射波の波形勾配 H/L が選定できる。そのため、今回対象としている曲面スリットケーソンについても、波高を変化させたときの反射率を測定してみた。実験条件は基本型-6と同じであり、図-14はその結果を示したものである。周期は4種類で、横軸に有義波の波形勾配をとっている。これによると、 $h/L=0.105$ の場合には波高増大とともに反射率の漸減傾向が認められるが、 $h/L=0.118\sim 0.244$ の結果ではそれほど変化していない。ただし、 $h/L=0.105$ の場合は $H_{1/3}/h=0.47$ までの結果であり、マウンドによる碎波の影響がある程度入っていると考えられる。しかし、いずれにしても今回の実験の範囲においては、波高による変化よりも周期による変化が卓越しており、強度の碎波の影響を受けない範囲では、波高による変化は周期による変化に比較して著しくないといえる。こうした波高による変化の程度が曲面スリットケーソンという形状的特徴によるものか、あるいは不規則波ということによってそれほど目立たなくなるものか等については、今後さらに基礎的なかたちで検討を続けていきたいと考えている。今回の検討は曲面

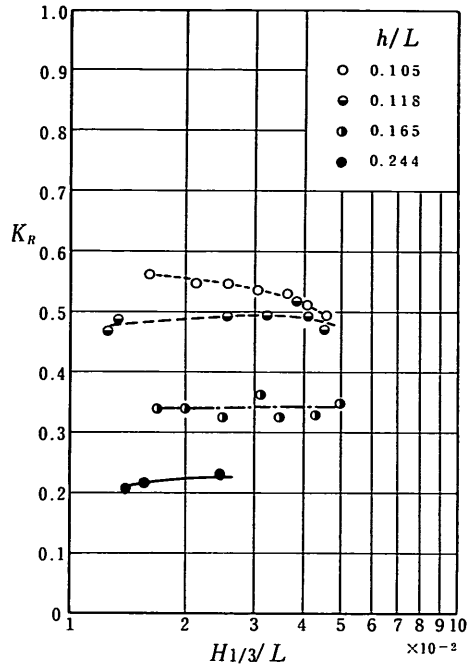


図-14 入射波高による反射率の変化

スリットケーソンの反射特性に関する実験を適当な波形勾配を選定して行っているのに対し、その結果が波高の多少の変化によってそれほど大きく変わらないということを示すものである。

(2) 周期および潮位による反射率の変化

周期による反射率の変化についてはこれまでの実験結果でも検討できるが、3.1の(3)でも述べたように潮位の変化と合わせて別に実験を行っているので、ここではその結果を示すことにする。

図-15は、横軸に曲面スリット壁の外半径 R と入射波の有義波長 L の比をとって、基本型の場合の結果を示したものである。 $h=39$ cmを基準水深とし、潮位を $\pm 0.0\sim +9.0$ cmの範囲で変化させ、これによる4種の l_c/R についての結果をプロットしてある。図中の説明図の断面諸元は便宜上模型縮尺を $1/30$ としたときの現地換算値である。このとき、基準水深は 11.7 m、潮位変化は $\pm 0.0\sim +2.7$ m、曲面スリット壁の外半径は 7.5 mとなる。また、入射波の有義波周期は $4.2\sim 11.2$ sの範囲である。図中の曲線は実験値の平均的関係を表わしている。

反射率はこの結果からも明らかのように、周期や潮位によって変化する。 $l_c/R=0.32\sim 0.56$ の条件では、 $R/L=0.15\sim 0.20$ のとき反射率は極小値をとり、 $0.18\sim 0.23$

程度である。しかし、 $R/L=0.065$ 程度であっても反射率は 0.5 以下であり、 R/L による反射率の変化は比較的緩やかである。 $l_c/R=0.20$ の場合には反射率はやや高

くなり、本実験の範囲では R/L が大きくなるにつれて反射率が低くなる傾向を示す。

図-16 は複合型に対する同様な実験結果を示したもの

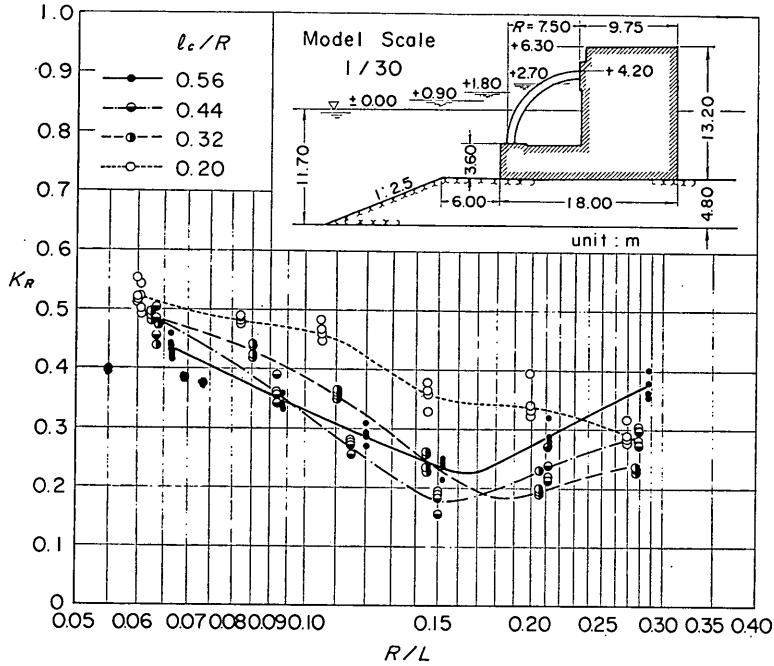


図-15 周期および潮位による反射率の変化（基本型）

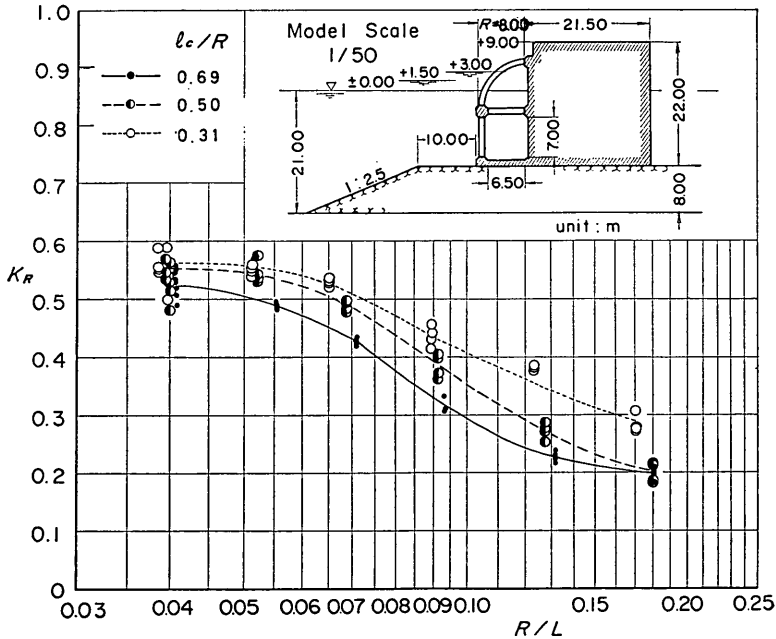


図-16 周期および潮位による反射率の変化（複合型）

である。図中の説明図における諸元は模型縮尺を 1/50 として現地量に換算した値であり、基準水深は 21m、潮位変化は $\pm 0.0 \sim +3.0$ m、曲面スリット壁の外半径は 8.0m、入射波の有義波周期は 5.4~14.4 s である。この場合 R/L の値は 0.18 以下であり、反射率の極小条件を確認できないが、 $l_c/R=0.50 \sim 0.69$ についてはその傾向から $R/L=0.18 \sim 0.20$ で極小値をとるものと推定できる。 $l_c/R=0.31$ の場合反射率はやや高くなるが、 $R/L=0.04$ 程度であっても反射率は 0.6 以下である。

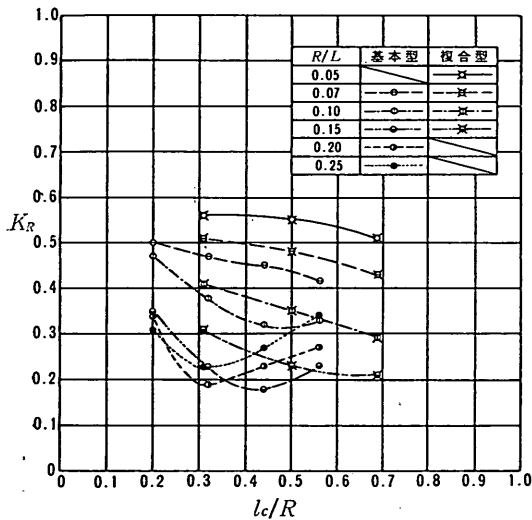


図-17 曲面スリット壁天端高による反射率の変化

図-17 は R/L の値を一定としたときの l_c/R による反射率の変化を、図-15, 16 の平均的關係から推定して示したものである。基本型の $R/L=0.10 \sim 0.25$ の結果では、 $l_c/R=0.30 \sim 0.45$ の範囲で極小値をもつような変化を示しているのに対し、複合型の場合には l_c/R が大きいほど反射率が小さくなる傾向を示している。これは基本型においては下部が不透過壁であり、 l_c/R がある限界を越えて大きくなるとこの不透過壁の占める役割が相対的に増大し、反射率が大きくなるのに対し、複合型においてはそうした不透過壁がないこと、および l_c/R が大になるにつれて水平スリット壁が水面近くになり、これによる消波効果が増大することなどによる違いと考えられる。しかし、複合型においても $R/L=0.15$ の場合には l_c/R が大きくなるにつれて極小値に近づくような傾向を示しており、 l_c/R が 0.7 よりさらに大きい、あるいは R/L が基本型のように 0.20, 0.25 と大きい

条件に対しては極小値をもつような変化を示すと推測される。

また、基本型の場合の極小値を過ぎたあとの反射率が大きくなる領域を除き、複合型の反射率が基本型の反射率よりやや大きい値を示している。この理由ははっきりとしないが、基本型と複合型では R の絶対値に違いがあり、 R/L や l_c/R のほかに h/L や R/h' などの影響があるのかもしれない。そのほか、下部に適当な不透過壁を設けることが、スリット開口部の流入・流出を増大させる効果を発揮することも考えられる。しかしながら、これらについては今回の実験では確認していない。

以上、基本型と複合型の違いを強調したが、実際上の問題としては図-15, 16 を比較してわかるように、それほど消波性能に違いがあるわけではない。一応反射率を 0.4 以下とすることを目標とすると、基本型、複合型ともに R/L を 0.10 程度、 l_c/R を 0.30 程度とすればよいといえる。ここに、 L は反射波が問題になる頻度の多い波の最大有義波波長を考え、 l_c は H.W.L. を基準に考えるのがよいであろう。潮差が著しく大きい場合には複合型を用いることによって対応できる。なお、 R/L がたとえ 0.05 程度であっても反射率は 0.6 程度以下であるところに曲面スリットケーソンの大きな特徴がある。

3.4 他構造との比較

(1) 通常のケーソン堤の反射率

通常のケーソン式混成堤は直立不透過壁によって波の作用を受けるため、反射率の高い構造である。今回の実験においても複合型の $\epsilon_A = \epsilon_B = \epsilon_0 = 1.0$ とした条件は、スリット部のない通常のケーソン堤に相当しているが、前出の図-8 に示しておいたように反射率は 0.75~0.89 と曲面スリットケーソン堤と比較すると明らかに高い反射率が得られている。

図-18 はこれまでに行ってきた通常のケーソン堤についての不規則波実験の結果得た反射率のデータをまとめて示したものである。この場合、反射率は入射波の周期や直立部の天端高、マウンドの形状などによって若干変化するが、最も支配的なのは碎波の影響であり、そのため横軸に $H_{1/3}/d$ をとっている。すなわち、ほとんど碎波を生じないと考えられる $H_{1/3}/d$ が 0.5 以下の条件では反射率は 0.8 程度以上であるが、碎波の著しい $H_{1/3}/d = 1.0$ 程度では 0.50~0.65 程度の反射率に低下する。しかし、このように相当程度碎波する場合でも反射率がそれほど小さくならないところに不規則波の反射率の特徴がある。すなわち、不規則波の場合には大小さまざま

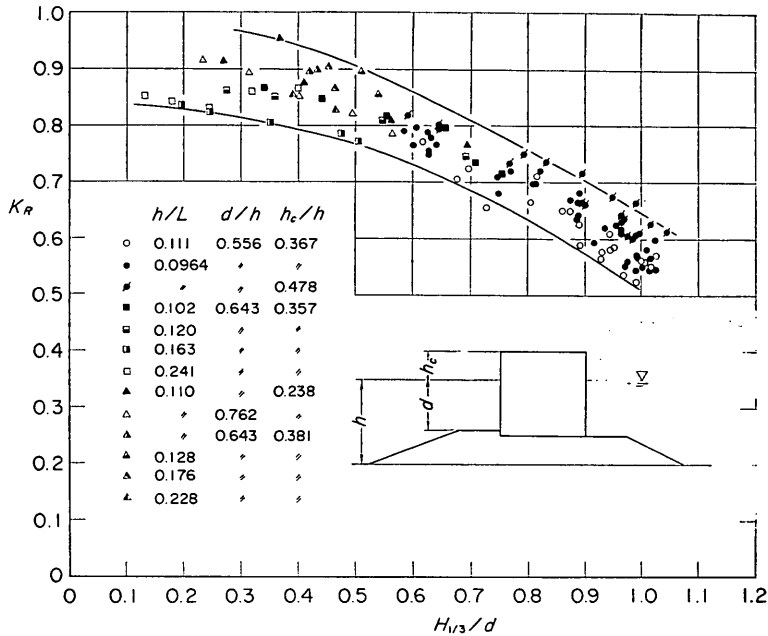


図-18 通常のケーソン式混成堤の反射率

な波高の波があり、全ての波が砕波するわけではない。したがって、波高の小さい波は反射されることになり、堤体の設置水深が余程浅い所でない限り、相当程度の反射波が生じることになるわけである。

一方、既述の曲面スリットケーソン堤の反射に関する実験は、水深による砕波の影響がほとんどない比較的波高の小さい条件で実施したものが大半である。しかし、この場合 R/L が 0.04~0.05 であっても反射率は 0.6 程度以下であり、比較的長周期の非砕波の波が作用したとしても、通常のケーソン堤に砕波の影響の著しい波が作用したときの反射率とはほぼ同程度であることがわかる。曲面スリットケーソン堤に著しい砕波が作用するときには、反射率は 0.5 程度以下になると考えてよい。

(2) 消波ブロック被覆堤の反射率

わが国における従来の消波型防波堤の代表的構造はケーソンの前面に消波ブロックを投入した消波ブロック被覆堤である。筆者らは空隙率 50% の消波ブロック（テトラポッド）を用いた被覆堤について不規則波による反射実験を実施しており^{9),10)}、図-19 はそれらの結果をまとめて示したものである。ここに、横軸の B_{00}/L の B_{00} は図中説明図に示しているように消波ブロック被覆部の静水面における幅である。結果は波の条件によってばらついているが、 B_{00}/L が大きくなるにつれて反射率が低

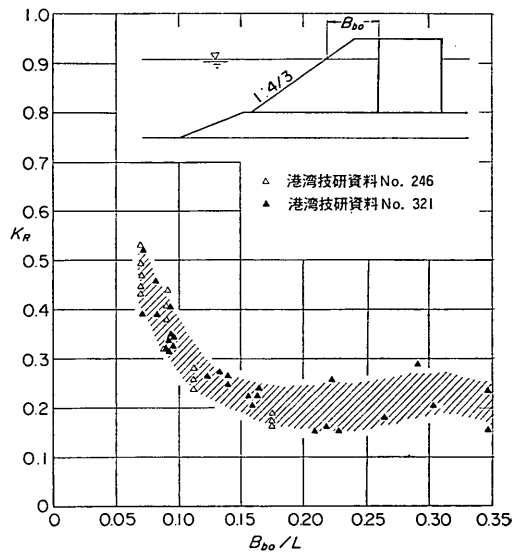


図-19 消波ブロック被覆堤の反射率

下し、ほぼ一定値に近づく傾向が認められる。反射率は $B_{00}/L=0.07$ のとき 0.39~0.53, $B_{00}/L=0.10$ のとき 0.27~0.38 程度であり、 $B_{00}/L=0.14$ 以上では 0.15~0.30 程度である。これと曲面スリットケーソンの反射率を B_{00}/L と R/L を対応させて比較すると、曲面ス

リットケーソン堤の場合 l_0/R によってやや高い反射率を示すが、適切な l_0/R の条件に対してはほぼ同程度の反射率であるといえる。

(3) 直立多孔ケーソン堤の反射率

直立消波ケーソンの代表的構造である多孔ケーソンの反射特性については、これまで多くの研究成果が報告されている。筆者らも昭和 49 年度から 50 年度にこれをとりあげ、反射・越波および滑動波力などの一通りの水理実験を実施した¹¹⁾。図-20 はそのうち不規則波による

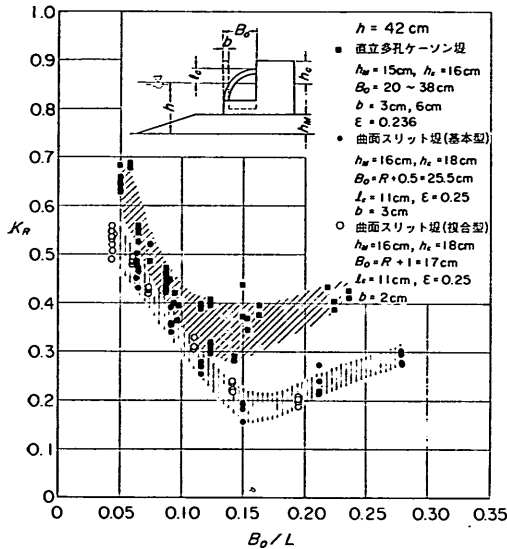


図-20 直立多孔ケーソン堤の反射率との比較

反射実験結果を今回の曲面スリットケーソン堤の結果と合わせて示したものである。ここに、 B_0 は透過壁厚を含めた遊水室の最大幅である。実験条件などできるだけ近い条件のものを示しているが、全く同じではない。また、曲面スリットケーソンの結果は l_0/R が基本型の場合 0.44、複合型の場合 0.69 と比較的好条件の結果である。

反射率は両構造とも B_0/L の増大につれて最初低下し、極小値に達したのち増大する傾向を示しているが、本条件に関する限り曲面スリットケーソン堤の反射率が直立多孔ケーソン堤の反射率より全体に小さい結果となっている。これは直立多孔ケーソンが水平運動の流入・流出によってのみエネルギーを消費するのに対し、曲面スリットケーソンの場合不透過壁面で卓越する鉛直運動によるエネルギー消費が期待できるほか、曲り斜面壁上

における部分的碎波、はいりおよび戻り流れによるエネルギー消費が付加されることによっているものと推測される。特に、後者の効果は基本型において開口比を 0 としたときの反射率が 0.59~0.73 と小さくなることによって確認されており、開口部がなくても曲面構造であることによって相当程度反射波が軽減されることは明らかである。

(4) 直立縦スリットケーソン堤の反射率

曲面スリット壁を直立にすると直立縦スリットケーソンとなり、曲面であることの効果はこれと比較することによってさらに明らかになると考えられる。そのため、直立縦スリットケーソンの既往の実験結果による反射率を示す。

縦スリットケーソンの反射率については、支柱材として港外側の角を落した駒型断面を用いた構造について合田・岸良¹²⁾、細川・三好・菊地¹³⁾、および山口・外山・鶴谷・岸良¹⁴⁾などの実験結果がある。このうち、合田ほかおよび山口ほかによる結果はケース数が少ないので、細川ほかによる結果を示すと図-21 のとおりである。これは図中説明図に示しているように駒型の縦スリット壁中静水面付近に 2 段の横棧を設けた構造であり、遊水室上部は上床版によって閉じられている。規則波および不規則波の反射率をプロットしてあるが、規則波では $B_0/L=0.14$ で 0.2 程度の反射率が得られているのに対し、

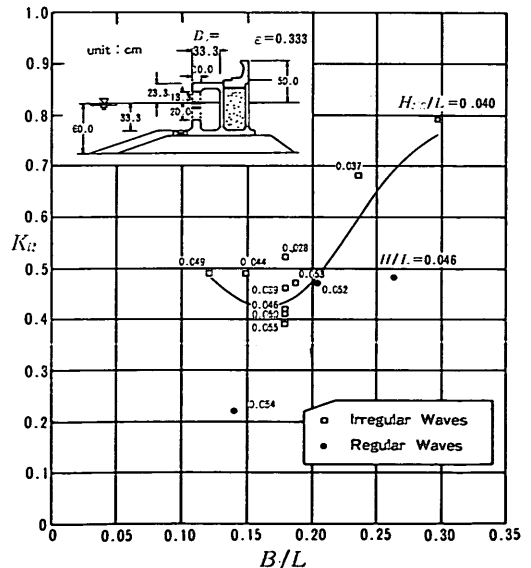


図-21 直立縦スリットケーソン堤の反射率

不規則波による極小反射率は0.4程度と大きくなっている。 $B_0/L=0.18$ に対する不規則波の結果では、入射波の波形勾配が大きくなるにつれて反射率が小さくなる傾向を示している。図中の曲線はこれを考慮して $H_{1/3}/L=0.05$ に対する反射率を推定したものである。これと図-20の曲面スリットケーソンの結果と比較すると、直立縦スリットケーソンの反射率がかなり高いことがわかる。また、(3)の直立多孔ケーソンと比較してもやや反射率が高いが、これは遊水室上部を閉じた構造であるためと推測される。この天端面(上床版)の開口率の影響については前出の合田ほかおよび山口ほかが検討しており、合田ほかの結果によると遊水室上部を完全に閉じたときの反射率は全開と比較して0.07程度増大する結果を得ている。ただし、 $h_c/H_0'=0.25\sim 0.42$ と低天端の場合の結果である。

以上、各種構造の反射率と曲面スリットケーソンの反射率を比較したが、これらの結果から曲面スリットケーソン堤は適切な条件であれば、同程度の遊水幅をもつ直立の多孔ケーソンや縦スリットケーソン堤より反射波軽減効果が高く、消波ブロック被覆堤とほぼ同じ効果を期待できる構造といえる。

4. 越波および伝達波

4.1 実験の方法

本実験は曲面スリットケーソン堤の越波および伝達波の特性が通常のケーソン堤と比較してどのように異なるかを把握するため事例的に実施したものである。実験に用いた水路は反射実験と同じく不規則波仮設水路であり、水深 h は45 cm で一定とした。堤体の構造条件は表-8に示したとおりで、 $R=25$ cm の基本型および $R=16$ cm の複合型のほか、通常のケーソン堤を対象としている。この通常のケーソン堤は複合型の模型において、消波部を取り除いたものである。ケーソン上部工の静水面上の天端高 h_c は基本型について16.0, 21.0 cm、複合型および通常のケーソン堤について16.5, 21.5 cm とそれぞれ2種に変化させた。マウンドは碎石をモルタル

で固めたもので、被覆材として碎石を詰めた金網枠の箱を並べている。ケーソン基面水深 h' は30 cm、マウンド被覆材天端上の水深 d は25 cm、マウンド水平肩幅 B_1 は20 cm、法勾配は1:3である。また、伝達率の実験においては、水路側壁と堤体の間にベニヤ板を詰め、そこからの透過波がないようにした。

実験波は同一目標スペクトルに対し作成した4種の入力信号を用いて、造波機入力時の基準電圧を変えることによって波高を変化させた。実験波の有義波周期は2.45 s、有義波高は14.4 cm から25.1 cm までの5種である。ここに、有義波周期は波列の種類、波高、測点位置によって若干変化するが、前出図-4の測点 No. 1, No. 2 および No. 3, No. 4 において、堤体設置以前の状態にて測定した全データの平均値である。ただし、有義波高は堤体のやや前方における入射波高として、測点 No. 3での値を用いている。一つの波列に対する解析時間は非定常性の強い初期の波を捨てた250 s 間であり、サンプリング周波数は8.192 Hz、したがってデータ数は2,048個である。また、実験波の波数は130波である。

越波量の測定は図-22に例示しているように、ケーソン天端上水路幅方向の中央に導水樋を固定し、これを通して背後に導びかれる越波水を容器で受け、その重量を測定することによった。越波水を受ける時間は波の解析と同一時間とし、計時にはストップウォッチを用いた。導水樋はブリキ板で製作したもので、越波水量の大小に

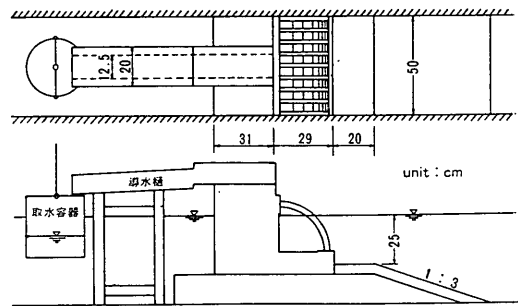


図-22 越波量の測定法

表-8 越波・伝達波実験の構造条件

型 式	R (cm)	D (cm)	b (cm)	ϵ	l_c (cm)	h_c (cm)	h' (cm)	d (cm)	B (cm)	B'
基本型	25.0	4.0	3.0	0.25	7.0	16.0, 21.0	30.0	25.0	32.5	60.0
複合型	16.0	3.0	2.0	0.25	7.0	16.5, 21.5	30.0	25.0	42.0	60.0
通常ケーソン	—	—	—	—	—	16.5, 21.5	30.0	25.0	40.0	—

曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究

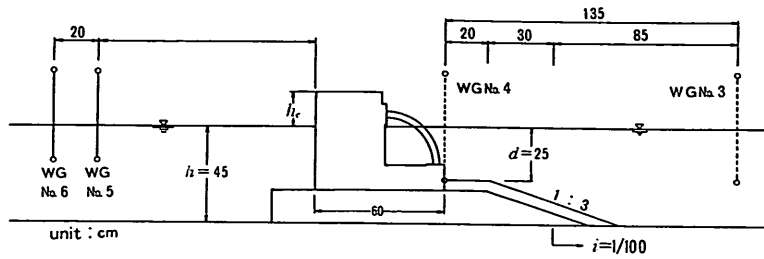


図-24 伝達波の測定法

応じ幅 12.5 cm の樋と 20 cm の樋を使い分けている。

伝達波の測定は 図-23 に例示しているように、ケーソン背面から 1.0 m (測点 No. 5) と 1.2 m (測点 No. 6) の 2 地点に設置した容量式波高計によった。伝達波高はこの 2 測点での波形記録から求めた代表波高の平均値で定義している。ただし、越波による背後水路での滞水量の変動に対応して測定波形に長周期変動が現われる。そのため、先に消波ブロック被覆堤の伝達波に関する実験で行ったと同様に、測定波形から 0.2 Hz 以下の低周波

成分を数値フィルターでカットしたのち、ゼロアップクロス法で代表波高を求める手法を用いた^{15),16)}。伝達波の解析時間は入射波の解析時間と同じ 250 s 間であり、解析におけるサンプリング周波数は入射波の場合の 2 倍の 16.384 Hz とし、したがってデータ数は 1 測点あたり 4096 個である。

4.2 越波特性

図-24 は越波実験の結果を示したものである。ここに、 q は越波量の測定値を導水樋の幅と取水時間で割った単

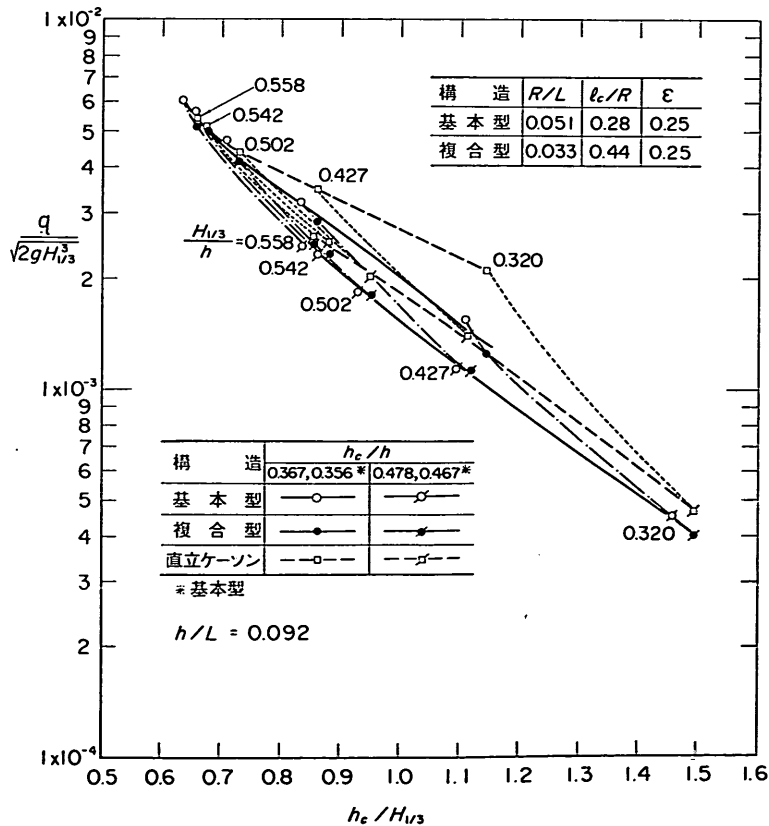


図-24 越波流量

位法線長あたりの平均越波流量であり、有義波高、越波流量ともに4種の波列による結果の平均値を用いている。曲面スリットケソン堤の場合基本型と複合型では、 h_c/h , R/L , l_c/R の値が異なるけれども、両構造の越波流量にそれほど大きな違いはない。図中の実線は h_c/h が0.356(基本型), 0.367(複合型), および0.467(基本型), 0.478(複合型)に対する曲面スリットケソン堤の越波流量の平均的関係を示したものであり、一点鎖線は同一の $H_{1/3}/h$ の値を結んだものである。一方、通常のケソン堤に対しては h_c/h が同一の結果を破線で、 $H_{1/3}/h$ が同一の結果を点線で結んでいる。これらの結果、本実験の範囲では曲面スリットケソン堤の越波流量は同一先端高の通常のケソン堤に比較して同程度かやや小さくなるということが出来る。特に、 $h_c/h=0.367\sim 0.356$ の結果では $h_c/H_{1/3}$ が大きくなるにつれて越波軽減効果が高くなっている。

また、実験における観察によると、通常のケソン堤の場合波面の直立壁への衝突によって跳波が著しい条件であっても、曲面スリットケソン堤では跳波がやや小さく越流するといったように越波の形態に相違が認められる。こうした越波の形態は消波ブロック被覆堤の場合に類似しており、防波護岸などに用いる場合には適切な波返し工を設けることによって越波を制御しやすい構造といえよう。

4.3 伝達率

図-25は相対先端高 $h_c/H_{1/3}$ に対する有義波高の伝達率を同時に測定した反射率の結果と合わせて示したものである。ただし、この場合4種の波列による結果を別々にプロットしてある。ここに、有義波高の伝達率は入射波の有義波高に対する伝達波の有義波高の比で定義したものである。

曲面スリットケソンの反射率は基本型と複合型で

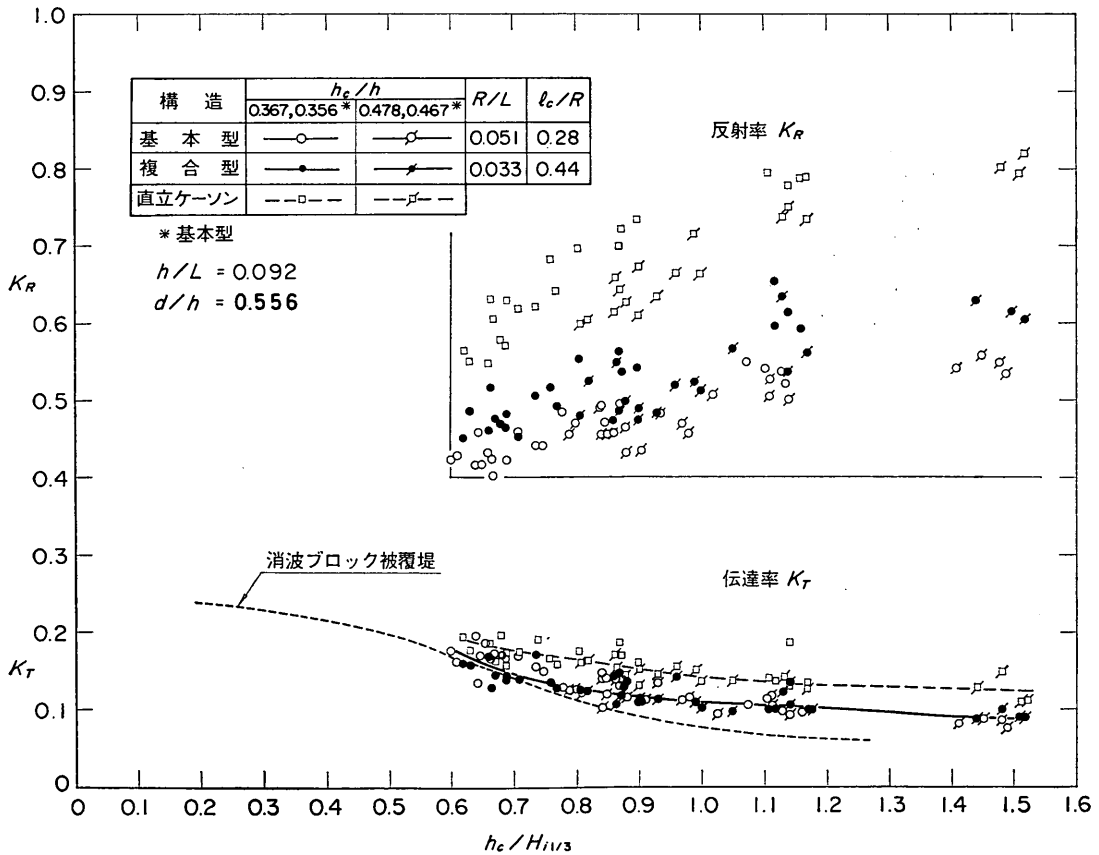


図-25 有義波高の伝達率

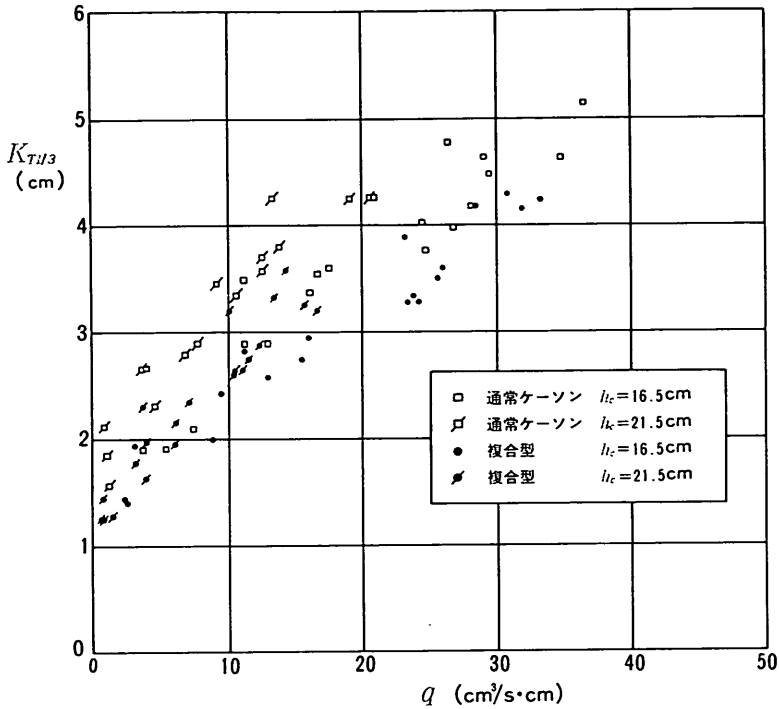


図-26 越波流量と伝達波の有義波高の関係

R/L や l_c/R が異なるため両型式に明らかな相違があり、基本型の反射率が低い。しかし、伝達率について両型式の間に明瞭な差が認められず、図中の実線はこれらの平均的関係を示したものである。通常のケーソン堤の平均的関係を破線で示しているが、これと比較すると曲面スリットケーソン堤の伝達率がやや小さくなっていることがわかる。また、図中消波ブロック被覆堤の伝達率も合わせて示しておいたが、これと比較すると特に高天端の条件において曲面スリットケーソンの伝達率がやや大きい。

一方、反射率は特に通常のケーソン堤の場合 h_c/h によって明らかな違いが認められるが、これは横軸を相対天端高にとっているための見掛け上の違いであり、たとえば横軸を水深に対する相対波高にとってプロットすると、高天端の場合の反射率がやや高くなる程度で両者にそれほど大きな差はない。また、 $h_c/H_{t1/3}$ が小さくなるにつれて反射率が低下するのは主として波高の増大によって碎波に伴うエネルギー消費が大きくなるためである。

なお、図-26 は同一の条件における越波流量と伝達波

の有義波高の関係をプロットしたものである。越波流量が増大するにつれて伝達波高が大きくなる傾向がはっきり認められる。ただし、 q が 0 近くになっても 1~2 cm の伝達波高が存在している。これはケーソンとマウンドの間からの透過波が若干あるほか、越波量を水路幅方向中央の 20 cm 幅で測定しているのに対し、実際には横揺れ現象のため水路幅方向に一様に越波せず、中央部で越波がなくても側壁付近で生じることがあるためと推測される。

以上、有義波高の伝達率を示したが、不規則伝達波の場合、各代表波高の伝達率は必ずしも同じでない。また伝達波の周期は入射波の周期に比較してかなり短くなる。こうした不規則伝達波の特性については、消波ブロック被覆堤の例について文献 10)、15) に若干検討しているので参照されたい。

5. 部材に働く波力

5.1 模型および実験の方法

(1) 模型

曲面スリットケーソンの各部材に働く波力を明らかに

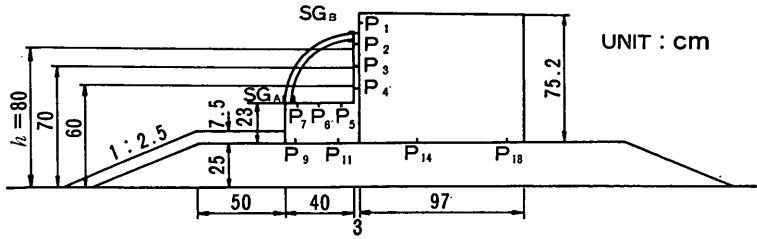


図-27 部材波力実験基本型模型

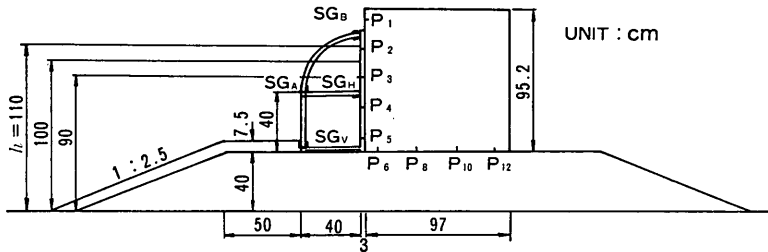


図-28 部材波力実験複合型模型

するために、スリット部材にはストレンゲージをはり、壁面には波圧計を取り付けて、105 m 大型造波水路で実験を行った。図-27, 28 はこの部材波力実験に用いた基本型、複合型の模型を示したものである。ケーソン本体は厚さ 12 mm のステンレス鋼で制作したもので、前面にアクリル合成樹脂材で別に製作した曲面スリット消波部を固定し、一体化している。ただし、基本型下部の箱型床版部はステンレス鋼で制作したものである。

曲面スリット壁の外半径 R は基本型、複合型ともに 40 cm、スリット部材幅 D は 6 cm、厚 b は 3 cm、開口比 ϵ は 0.25 である。ただし、複合型の水平スリット部材は幅 4 cm、厚 2 cm、開口比 0.50 としたが、これには特別な意味はない。

マウンドは 20~40 gf の碎石で形成し、前肩および法面は 200 gf 程度の碎石 2 層積みで被覆した。マウンドの厚さ h_M は基本型の場合 25 cm、複合型の場合 40 cm である。

(2) 部材波力の測定法

前述したようにスリット部材に働く波力はストレンゲージにより、壁面に働く波力は波圧計により測定した。用いたゲージは箔フェステルゲージで、ゲージ長 5 mm、ゲージ抵抗 120 Ω 、ゲージファクター 2.10、ベース長 10 mm、幅 3.7 mm のものである。波圧計センサーは受圧面直径 30 mm、容量 100 および 200 gf/cm²、固有振動数

は 300 Hz 程度のものである。測点の位置は前出の図-27, 28 に示しておいた。すなわち、図中 SG_A, SG_B, \dots 等がストレンゲージの位置、 P_1, P_2, \dots 等が波圧測点を表わしている。ただし、波圧測点の No. はケーソン壁面にあらかじめ設けておいた取り付け孔の No. で示しており、必ずしも連続していない。これらのセンサーを動けず測定器に接続し、データレコーダに記録する。

ひずみ測定用のスリット部材は曲げひずみの出力を大きくするため、一端を切り離れた片持梁とし、固定端付近の両縁にストレンゲージをはり付けている。特に曲面スリット部材については、下端固定の部材 A と上端固定の部材 B の 2 本の曲り片持梁を一对の測定部材とし、それぞれの曲げひずみから曲面スリット部材に働く合力と作用角を求めることができるようにしてある。その原理は以下のとおりである。

曲面スリット部材に働く波力の合力を P_D とすると、図-29 に示しているように P_D の作用線は必ず曲率の

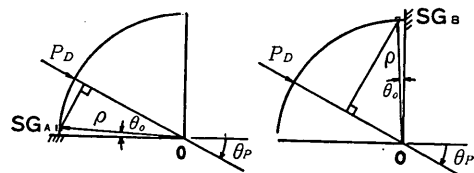


図-29 曲面スリット部材に働く波力の測定法

中心 O を通る。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 で表わす。合力 P_D は部材Aと部材Bで等しいと考えることができるから、部材Aのストレングージ位置での曲げモーメント M_A 、部材Bのストレングージ位置での曲げモーメント M_B は次の式で表わされる。

$$M_A = P_D \rho \sin(\theta_P - \theta_0) \quad (4)$$

$$M_B = P_D \rho \cos(\theta_P + \theta_0) \quad (5)$$

ここに、 ρ は部材中心軸の曲率半径、 θ_0 は曲率中心と SG_A あるいは SG_B を結ぶ直線と水平面あるいは鉛直面との間のなす角度である。

式 (4)、(5) から、 P_D と θ_P は次のように表わされる。

$$P_D = \frac{\sqrt{M_A^2 + 4M_A M_B \cos \theta_0 \sin \theta_0 + M_B^2}}{\rho(\cos^2 \theta_0 - \sin^2 \theta_0)} \quad (6)$$

$$\theta_P = \tan^{-1} \left\{ \frac{M_A \cos \theta_0 + M_B \sin \theta_0}{M_A \sin \theta_0 + M_B \cos \theta_0} \right\} \quad (7)$$

したがって、曲げモーメント M_A 、 M_B を知れば、 P_D 、 θ_P を求めることができる。

一方、曲りよりの縁ひずみ ε_1 、 ε_2 は次式で与えられる¹⁷⁾。

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{EbD} \left\{ N - \frac{M}{\rho} + \frac{M}{\rho^2 \kappa} \frac{b}{2-b/\rho} \right\} \quad (8)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{EbD} \left\{ N - \frac{M}{\rho} - \frac{M}{\rho^2 \kappa} \frac{b}{2-b/\rho} \right\} \quad (9)$$

ここに、 E は部材の弾性係数、 N は軸方向力、 M は曲げモーメントであり、式中の κ は b が ρ に比較して小さいので次式で与えることができる。

$$\kappa = I_2 / bD\rho^2 \quad (10)$$

ここに、 I_2 は断面二次モーメントである。

したがって、ひずみを2ゲージ法で $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ のかたちで測定すると、 b/ρ の値は小さいことを考慮して、

$$\varepsilon_a = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = 2 \frac{M}{EI_2} \frac{b}{2} \quad (11)$$

の関係を得る。したがって、部材Aから出力されるひず

みを ε_{aA} 、部材Bから出力されるひずみを ε_{aB} とすると、

$$M_A = \frac{EI_2}{b} \varepsilon_{aA} \quad (12)$$

$$M_B = \frac{EI_2}{b} \varepsilon_{aB} \quad (13)$$

式 (12)、(13) を式 (6)、(7) へ代入して、ひずみ測定結果から P_D 、 θ_P を決定できる。本実験の場合、 θ_0 は 1.5° である。

弾性係数 E は検定試験によって求める必要がある。図-30 は1例として基本型の試験結果を示したものであ

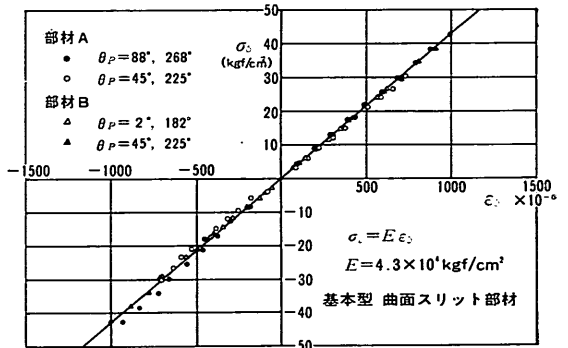


図-30 弾性係数検定試験結果の一例

る。自由端および中央付近に種々の大きさの荷重を曲率の中心方向およびその逆方向に載荷したときの曲げひずみ $\varepsilon_b (=0.5\varepsilon_a)$ と応力 σ の関係をプロットしたものであるが、直線性はよい。図中の直線は $E=4.3 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ としたときの ε_b と σ の関係を表わしている。表-9 は各ひずみ測定用部材の諸元と試験結果をまとめて示したものである。表中 T_n は自由振動試験結果から求めた固有振動周期、 β は減衰比である。

(3) 実験ケース

本実験においては、ケーソン等の構造条件は一定にし

表-9 ひずみ測定用スリット部材の諸元

型式	部材名	ρ or l (cm)	D (cm)	b (cm)	I (cm ⁴)	θ_0 or l_0 (°) (cm)	E (kgf/cm ²)	空中固有振動		水中固有振動	
								T_n (s)	β	T_n (s)	β
基本型	曲面スリット部材	38.5	6.0	3.0	13.5	1.5	4.3×10^4			0.055	0.063
複合型	曲面スリット部材	38.5	6.0	3.0	13.5	1.5	3.8×10^4	0.038	0.048	0.050	0.041
	鉛直スリット部材	34.5	6.0	3.0	13.5	1.0	3.6×10^4				
	水平スリット部材	36.0	4.0	2.0	2.67	1.0	3.9×10^4				

表-10 部材波力の実験条件 ($R=40\text{ cm}$)

型式	h (cm)	l_c (cm)	$\frac{l_c}{R}$	R/L				$\frac{d}{h}$	$\frac{H}{h}$
				$T=2.0\text{ s}$	$T=2.5\text{ s}$	$T=3.0\text{ s}$	$T=3.5\text{ s}$		
基本型	60	28	0.70	0.092	0.071	0.058	0.049	0.458	0.30~0.75
	70	18	0.45	0.087	0.066	0.054	0.045	0.536	0.33~0.76
	80	8	0.20	0.083	0.063	0.051	0.043	0.594	0.34~0.70
複合型	90	30	0.75	0.079	0.060	0.048	0.041	0.472	0.17~0.74
	100	20	0.50	0.077	0.057	0.046	0.039	0.525	0.23~0.73
	110	10	0.25	0.075	0.055	0.044	0.037	0.568	0.29~0.70

において、水深や波の条件を変化させた。表-10 はその水理条件をまとめて示したものである。実験水深は基本型に対し 60, 70, 80 cm の 3 種、複合型に対し 90, 100, 110 cm の 3 種である。こうした水深の変化は潮位の変化に対応するもので、これによって l_c/R の値は 0.20~0.75 の範囲となり、異常に低い条件から高い条件まで含んでいる。また、 d/h は 0.458~0.594 となり、通常のケーソン堤においては衝撃砕波力の発生のあるやや高マウンドの条件である。

実験波はすべて規則波で、周期 T は 2.0~3.5 s の範囲で 4 種を選んでおり、これと水深によって R/L の値は 0.037~0.092 の範囲となる。波高 H は各周期条件ごとに非砕波から砕波後までの波を対象とし、それぞれ 5 種を選定した。

なお、実験は同一条件で 2 回づつ繰り返して行い、データの解析に用いた波の波数は約 10 波である。

5.2 波の作用状況と衝撃圧の発生

(1) 基本型への波の作用状況と記録の例

曲面スリットケーソン堤への波の作用は波の条件や潮位によって異なり複雑であるが、図-31 は潮位が比較的高く、かつ波高が大きいときの基本型への典型的な作用状況のスケッチを示したものである。同図には、あわせて曲面スリット部材に働く波力の推測による分布も示してある。

図の (1) は波面上昇時を表わしており、遊水室への流入に伴って曲面スリット部材には外から内側へ向かう波力が働く。このとき、潮位がそれほど高くなく、かつ波形勾配の大きいときには、写真-1, 2 に認められるように、曲面スリット壁外側での波面上昇が早く、あたかも巻波状の砕波が衝突するような状況を呈することがある。しかし、一般には写真-3 にみられるように、波

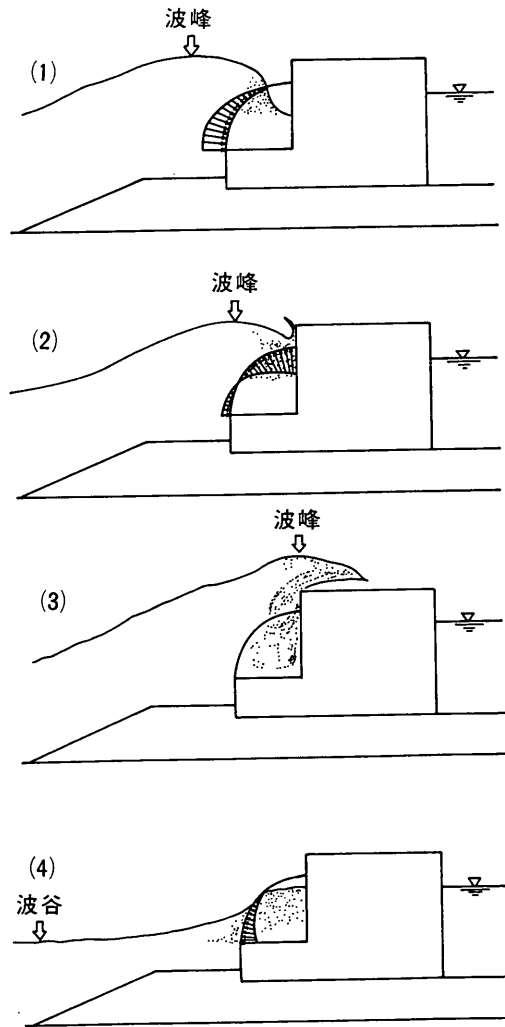


図-31 基本型への波の作用状況のスケッチ

曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究



写真-1 波の作用状況 (基本型, $h=70$ cm, $T=2.0$ s, $H=40.0$ cm)



写真-2 波の作用状況 (基本型, $h=70$ cm, $T=2.0$ s, $H=40$ cm)

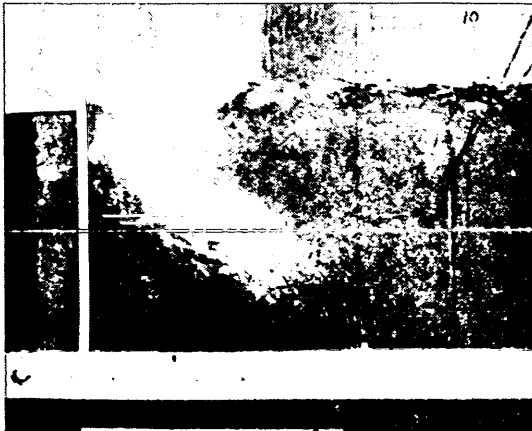


写真-3 波の作用状況 (基本型, $h=80$ cm, $T=2.5$ s, $H=47.5$ cm)



写真-4 波の作用状況 (基本型, $h=80$ cm, $T=2.5$ s, $H=47.5$ cm)



写真-5 波の作用状況 (基本型, $h=80$ cm, $T=2.5$ s, $H=47.5$ cm)

峰の接近に伴って遊水室内波面が上昇するとともに、外側波面先端も同時に進行してケーソン上部工の前部に達する。図の(2)はこのときの状況を示したものであるが、後述の記録例で示すように、この瞬間に遊水室内に衝撃圧が発生して、スリット部材には特に上辺において内から外側へ向かう波力が働く。しかし、このときにおいても下部ではまだ流入していると考えられ、スリット部材下端付近においては外から内向きの波力が卓越している場合もあると推測される。

図の(3)は波峰が直立壁に達したときの状況を示すもので、写真-4に認められるように気泡が著しく発生す

る。この状態では、スリット部材は完全に水没しており、これに働く波力はもはや弱くなっている。図の(4)は波面が下降しているときの状態を表わす。このときは写真-5に認められるように、開口部から流出が生じており部材には内から外向きの波力が働く。

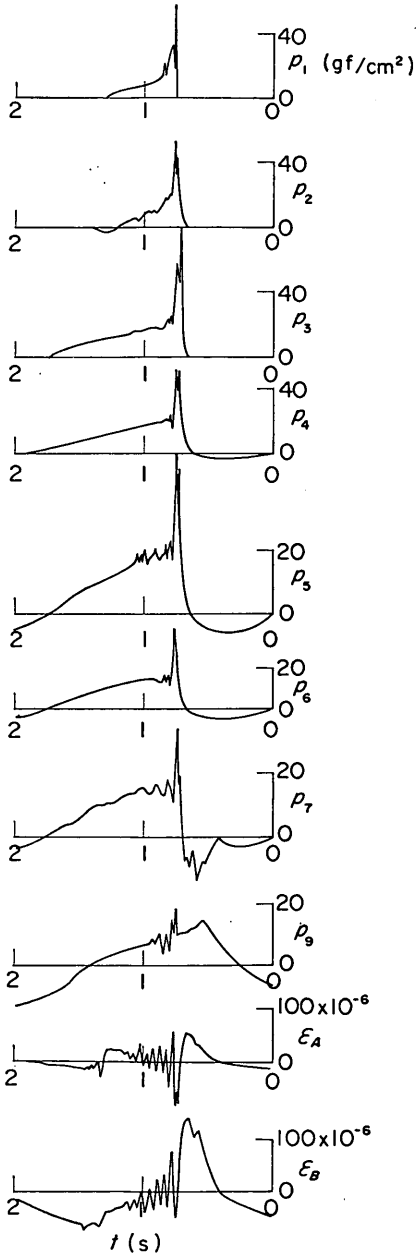


図-32 波圧およびひずみの記録例（基本型， $h=70$ cm， $T=2.0$ s， $H=40.0$ cm）

以上、波の作用状況と曲面スリット部材に働く波力の定性的関係を述べたが、こうした一周期にわたる波の変化に対応して、その他の部材にも変動波力が働く。図-

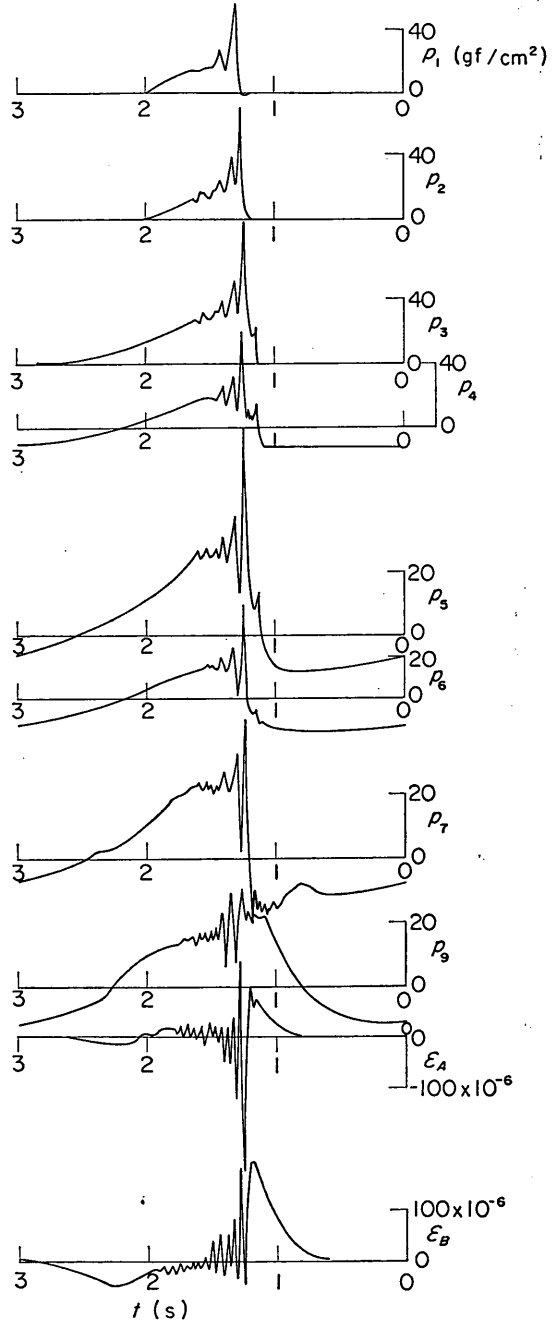


図-33 波圧およびひずみの記録例（基本型， $h=70$ cm， $T=3.0$ s， $H=49.0$ cm）

曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究

32~35 は基本型の波圧およびひずみの記録を例示したものである。ここに、 p_1 は曲面スリット壁外側のケーソン上部工前面での波圧、 $p_2 \sim p_4$ および $p_5 \sim p_7$ は遊水室内の直立壁および床版での波圧、 p_8 はケーソン底面での揚圧力であり、 ϵ_A および ϵ_B は曲面スリット部材下

端および上端近くでの曲げひずみである（前出 図-27 参照）。ひずみの符号は部材の内側が圧縮される向きを正としている。したがって、ひずみは外から内側へ向かって力が作用するとき正、内から外側へ向かって作用する

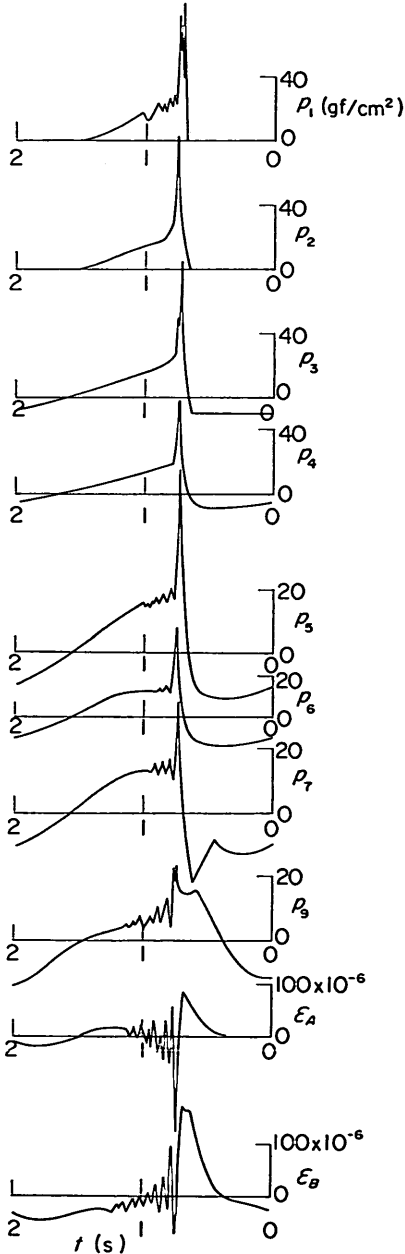


図-34 波圧およびひずみの記録例（基本型、 $h=80$ cm、 $T=2.0$ s、 $H=47.0$ cm）

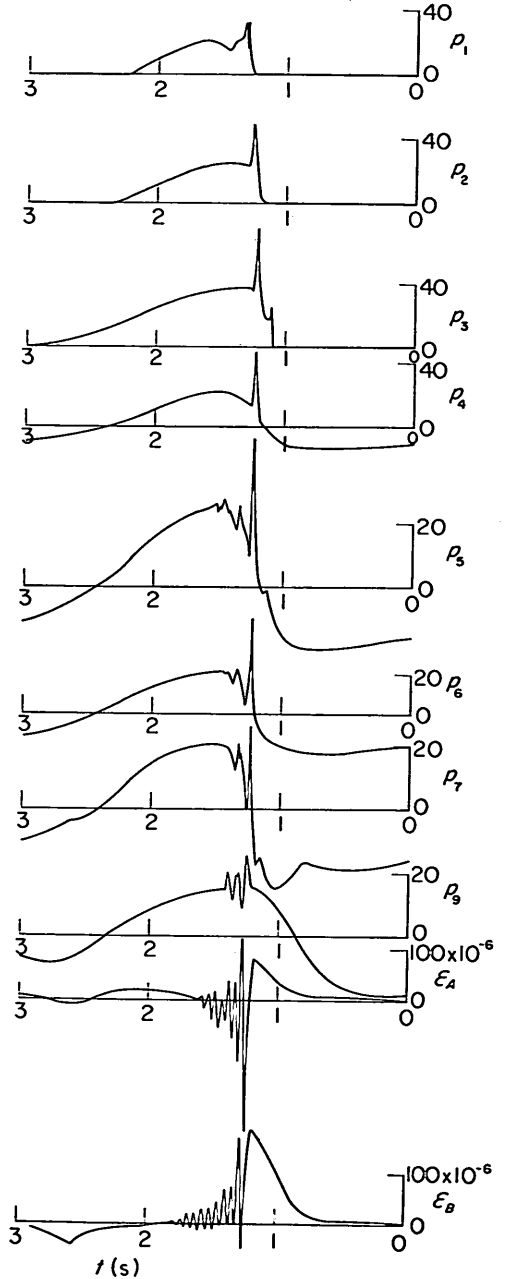


図-35 波圧およびひずみの記録例（基本型、 $h=80$ cm、 $T=3.0$ s、 $H=50.5$ cm）

とき負となる。以下、これらの例に基づいて波圧やひずみの現われ方の特徴を述べる。

まず、図-32 は $h=70\text{ cm}$, $T=2.0\text{ s}$, $H=40.0\text{ cm}$ のときの記録であるが、遊水室内の波圧のピークが、たとえば p_3 に典型的例が認められるように、二回現われることが多い。このうち、最初のピークは作用時間が短く、曲面スリット壁を通過した波面の先端が直立壁に衝突するときの衝撃圧と考えられる（前出 写真-1 参照）。したがって、これは波圧計の位置によって変化するほか、潮位や波浪条件による変化が著しい。図-33 や 35 の $T=3.0\text{ s}$ の条件では第二のピークとの時間差が大きい。かつ第一のピークは弱く、波圧計位置が常に水没している場合にはこれが現われない。逆に、図-34 の p_2 や p_3 などは第二のピークとほとんど同時に生じていると考えられ、こうした場合大きな波圧となる。曲面スリット壁外側の p_1 に生じる衝撃圧は外側波面の直接作用によるものであり、時折り極めて急な立ち上りを示す。

これに対し第二のピークは曲面スリット壁外側の波面がケーソン上部に達したとき、あるいは遊水室内波面が上昇し曲面スリット壁上端下面に衝突したときに生じる衝撃圧と考えられる。この衝撃圧の作用時間は波面の直接的作用による衝撃圧より長く、遊水室内のどの波圧計にもほぼ同時に現われる。また、このときスリット部材のひずみも急激に負となっており、前述したように遊水室内から外側へ向かって力が作用していることがわかる。

この第二のピークに対応する衝撃圧は遊水室外へも伝わり、ケーソン底面の揚水圧 p_0 の記録にも減衰したかたちで現われている。これが衝撃圧を受けた堤体の振動に起因するものでないことは、曲面スリット壁下端のやや前方の水路側壁に固定した波圧計にも同様な衝撃圧が記録されることによって確認している。

ひずみ ε_A , ε_B の記録は比較的穏やかな変化で正のピークに達したのち、遊水室内での衝撃圧の発生のため急激に負のピークに逆転する。その後、顕著な減衰振動が続くが、この振動数は $16\sim 17\text{ Hz}$ であり、部材の固有振動と見なせる。

(2) 複合型への波の作用状況と記録の例

複合型への波の作用も基本型とほぼ同様であるが、この場合下段も遊水室となっているため、そこでも水の流動が生じる。特に、波高の大きい場合には波の谷のとき、水平スリット部材が完全に露出することが多い。写真-6~9 は、 $h=100\text{ cm}$, $T=3.0\text{ s}$, $H=70\text{ cm}$ のとき

のこうした波の作用状況を示すものである。この場合、入射波の波高は曲面スリット壁外半径 R の 1.75 倍と非常に大きい。

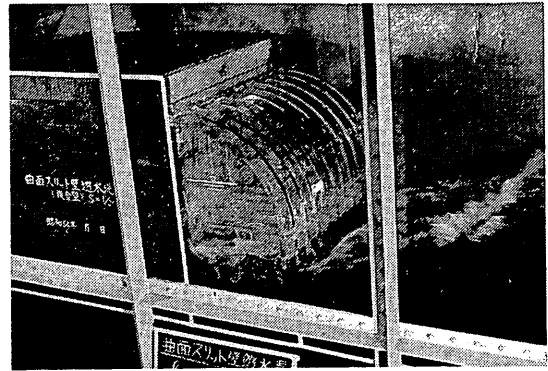


写真-6 波の作用状況（複合型, $h=100\text{ cm}$, $T=3.0\text{ s}$, $H=70.0\text{ cm}$ ）

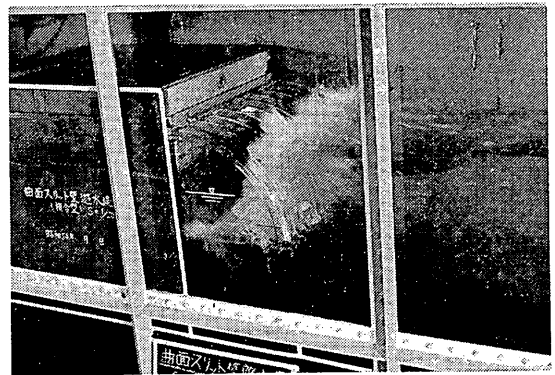


写真-7 波の作用状況（複合型, $h=100\text{ cm}$, $T=3.0\text{ s}$, $H=70.0\text{ cm}$ ）



写真-8 波の作用状況（複合型, $h=100\text{ cm}$, $T=3.0\text{ s}$, $H=70.0\text{ cm}$ ）

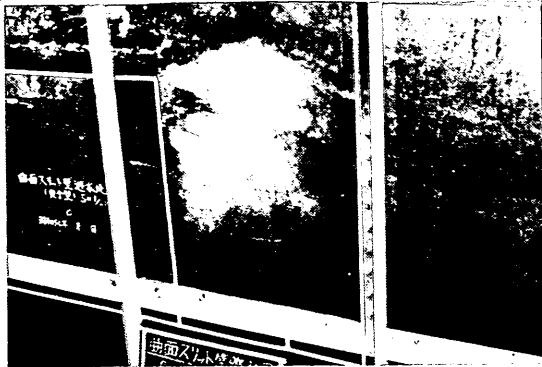


写真-9 波の作用状況 (複合型, $h=100$ cm, $T=3.0$ s, $H=70.0$ cm)

図-36~38 はそれぞれ $h=90, 100, 110$ cm の場合の波圧およびひずみの記録例である。いずれも $T=3.0$ s の例であり、波高 H はそれぞれ 59, 70, 71 cm である。図中 p_1 は曲面スリット壁外側でのケーソン上部工前面

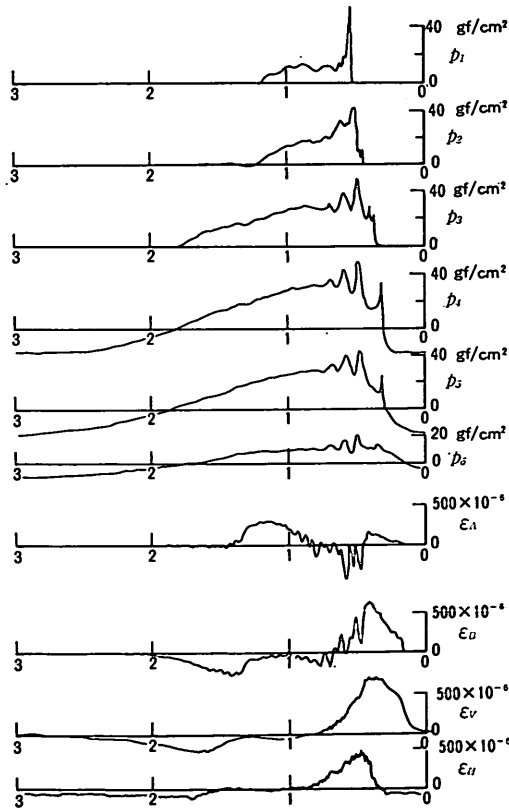


図-36 波圧およびひずみの記録例 (複合型, $h=90$ cm, $T=3.0$ s, $H=59.0$ cm)

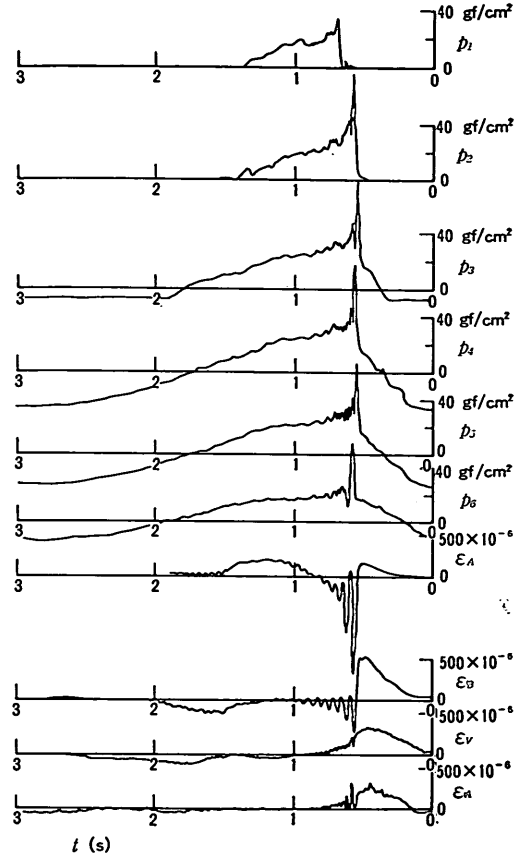


図-37 波圧およびひずみの記録例 (複合型, $h=100$ cm, $T=3.0$ s, $H=70.0$ cm)

での波圧, p_2, p_3 は上段遊水室後壁, p_4, p_5 は下段遊水室後壁での波圧, p_6 はケーソン底面での揚圧力であり, ϵ_A, ϵ_B は曲面スリット部材, ϵ_V は鉛直スリット部材, ϵ_H は水平スリット部材でのひずみである (前出図-28 参照)。ここに, ϵ_V は外から内側へ向かって力が働くとき, ϵ_H は下から上へ向かって力が働くときを正としている。水平スリット部材には波面の下からの衝突があるはずであるが、これらの例の場合急な立ち上りは認められない。これは部材が露出したとしても波の谷付近のみであり、衝突するときの波面の上昇速度が小さいためと推測される。遊水室内で衝撃圧が発生すると同時に、水平スリット部材や鉛直スリット部材のひずみも低下しているが、曲面スリット部材ほどには顕著でない。図-36 の $p_3 \sim p_5$ において、10 Hz 程度の顕著な減衰振動が認められる。これがどのような現象によるものか明らかでないが、上段遊水室に大量の空気層が閉じ込めら

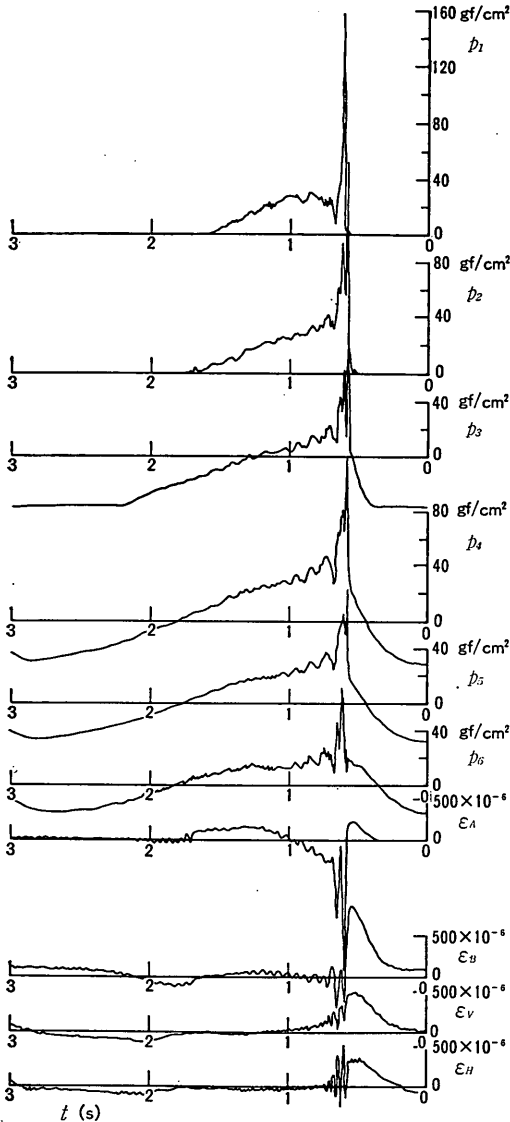


図-38 波圧およびひずみの記録例 (複合型, $h=110$ cm, $T=3.0$ s, $H=71.0$ cm)

れて、その空気層の圧縮振動が現われているのかもしれない。

(3) 衝撃圧の発生について

以上、基本型および複合型への波の作用状況と記録例を示したが、条件によって遊水室内にほぼ同時に衝撃圧が発生することが明らかとなった。こうした衝撃圧の発生はたとえば直立の縦スリットケーソンなどで、遊水室に上床版があるときにも生じる^{18),19)}。すなわち、この場

合には縦スリット壁前後での波面上昇の振幅の違い、および位相の遅れによって、遊水室の上部に空気塊が閉じ込められ、この圧縮を介して上床版に衝撃揚圧力が働くと同時に、遊水室内各壁に衝撃圧が働く。そのため、上床版に適切な開口率の空気孔を設けて、空気を逃がすことによって衝撃圧を軽減できるが、数%程度以上の開口率とすると空気圧縮衝撃圧のうち、波面上床版下面に直接作用することによる衝撃圧が働くようになる。さらに、10%程度になるともはや空気圧縮による衝撃圧は現われず、波面の直接作用による衝撃圧のみとなる。そして、このときの圧力は空気孔を設けない無孔上床版の場合の圧力より大きなことが多く、条件によっては $5w_0H$ 程度以上にも達する。

さて、ここで対象としている曲面スリットケーソンの場合は、前面縦スリット壁と開口率の大きい上床版を曲面状のスリット壁で一体化したものに相当する。開口比は25%と大きく、遊水室内波面の波面上昇のみによっては空気圧縮を介しての圧力が発生することはないと考えてよい。しかし、曲面スリット壁の外側の波面が遊水室内波面の波面上昇より早くケーソン上部工の前面に達し、水流の壁によって空気塊を閉じ込めることはあり得る。この場合には空気圧縮を介しての衝撃圧が発現するものと考えられる。このように空気圧縮を介して生じる衝撃圧の大気圧下での縮尺実験の結果は、単に Froude 則に基づいて現地換算すると一般に過大な値を与えることになる。

実験における観察においても、遊水室に空気塊を閉じ込める状態が認められるが、しかし多くの場合には遊水室内波面上昇によって室内が気泡まじりの水で満たされると、外側波面によって閉じ込められるのがほぼ同時のように観察される。このときの衝撃圧の発生因は、曲面スリット壁上辺への波面の下からの直接的衝突が主であり、スリット部材には上向きの衝撃力が働くとともに、それまでの上昇運動がスリット部材によって相当部分しゃ断されることによる水撃作用によって遊水室全体に衝撃圧が発生するものと推測される。条件によっては外側波面がまだ閉じ込める以前に遊水室内波面が曲面スリット壁上辺に衝突することもあるようである。

以上のように曲面スリットケーソン遊水室内における衝撃圧の発生には種々の状態があるようであり、複雑である。また、衝撃圧は極めて短時間の現象であり、実験時の観察や写真によってのみでは十分把握することができない。そのため、衝撃圧の発生機構のこれ以上の解明に

ついでには今後の課題とし、とりあえず実験結果をそのまま整理することにした。

(4) 曲面スリット部材の衝撃応答

曲面スリット部材には衝撃力が作用するため、ひずみ測定における衝撃応答が問題となる。すなわち、測定される曲げひずみは衝撃応答の結果であり、真の作用波力を求めるためには必要により測定部材の衝撃応答の影響を補正しなければならない。そのためには、衝撃力の時間波形を推測することが必要であるが、これについては遊水室内壁での波圧波形を考える。波圧計の固有振動数は 300 Hz 程度であり、ある程度適確にこの場合の衝撃圧波形をとらえていると考えることができる。

波圧波形記録によると衝撃圧の作用時間は 0.03~0.06 s 程度であり、時間波形を二等辺三角形とすると、測定用曲面スリット部材の固有振動周期 T_n は 0.05~0.06 s 程度、減衰比 β は 0.05 程度であるので、衝撃応答係数 φ は 図-39 からわかるように 1.1~1.4 程度

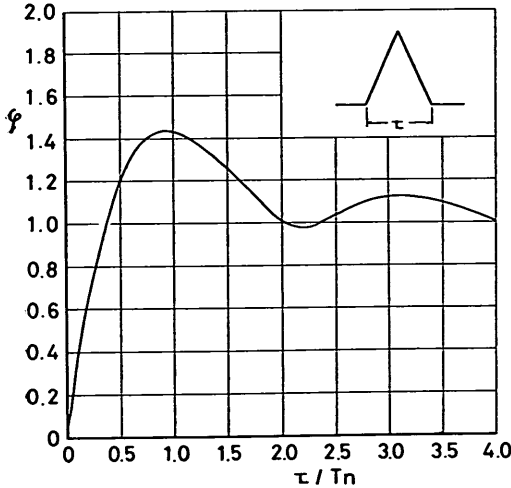


図-39 衝撃応答係数

となる²⁰⁾。すなわち、補正係数 $1/\varphi$ は 0.7~0.9 程度である。したがって、作用波力は記録された値の静的換算値より小さくなるが、時間波形など推測にすぎないので、本報告においては記録の値そのままを用いて整理することにする。

5.3 スリット部材に働く波力

(1) 曲面スリット部材

スリット部材に働く波力強度は両面に働く波圧の差を定義し、中心軸に軸線と直角に働くものとする。曲面ス

リット部材に働く波力と波の位相の関係は既に 5.2 の (1) で述べたところであるが、これは実験時の 8 mm フィルムや写真と測定記録をながめて推測したものである。本実験結果の整理では、これに対応して曲面スリット部材軸に沿って働く波力強度の一般式を式 (14) のように表わす。

$$p = p_A \cos^2 \theta + p_B \sin^2 \theta \quad (14)$$

ここに、 θ は 図-40 に示しているように曲面スリット

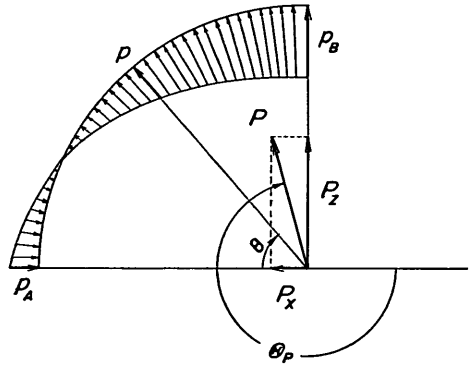


図-40 曲面スリット部材に働く波力分布

部材軸上各位置の曲率の中心 O からの方向と水平面と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。波力強度は遊水室の外から内側へ向かうとき正、内から外側へ向かうとき負と定義する。ただし、式 (14) は設計で対象とする部材にとって最も厳しい状態での波力分布たとえば内向きの波力が最大となるとき、および外向きの波力が最大となるときなどを対象とした一般式として想定したものであり、任意の位相の波力分布を表わすものではない。

式 (14) の波力分布を仮定するとき、曲面スリット部材に働く波力の合力 P_D の水平成分 P_x 、および鉛直成分 P_z は次式で与えられる。

$$P_x = P_D \cos \theta_P = \frac{\rho D}{3} (2p_A + p_B) \quad (15)$$

$$P_z = P_D \sin \theta_P = \frac{\rho D}{3} (p_A + 2p_B) \quad (16)$$

したがって、測定ひずみから求められる P_D, θ_P を用いて、次式により p_A, p_B を決定できる。

$$p_A = \frac{P_D}{\rho D} (2 \cos \theta_P - \sin \theta_P) \quad (17)$$

$$p_B = \frac{P_D}{\rho D} (2 \sin \theta_P - \cos \theta_P) \quad (18)$$

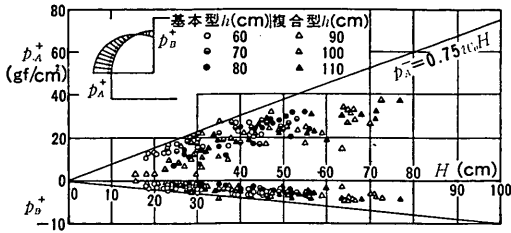


図-41 外から内側へ向かう波力が最大となるときの曲面スリット部材端波力強度

図-41 はこのようにして求めた外から内側へ向かって作用する波力が最大となる時、すなわち前出の図-31の(1)に対応するときの p_A^+ と p_B^+ (右肩に + を付して表わす) を、横軸に波高 H をとってプロットしたものである。結果は波の周期や潮位によってばらついているが、基本型と複合型で傾向的違いは認められない。 p_A^+ についてはほぼ上限をとると $0.75w_0H$ 程度である。 p_B^+ についてはほぼ $-(0.1\sim 0.2)w_0H$ 程度であるが、部材にとっては0とする方が厳しく、設計においては0と考えるのがよいであろう。

なお、このように p_B^+ が負の値で現われているが、これは実際に上端においてこれが作用していることを意味するものではなく、波力分布を式(14)のように仮定したことによって現われてくる見掛け上の値である。つまり、 p_A と p_B を結果のように与えれば式(14)を仮定したとき、その合力 P_D と作用角 θ_P が実験値と一致するという意味の値である。したがって、現象的には p_B^+ が0に近い方がより実際の分布を仮定したことになる。結果は p_A^+ と比較して p_B^+ の絶対値は相当程度小さく、式(14)の仮定も比較的簡単な表示としてはほぼ妥当であるといえる。

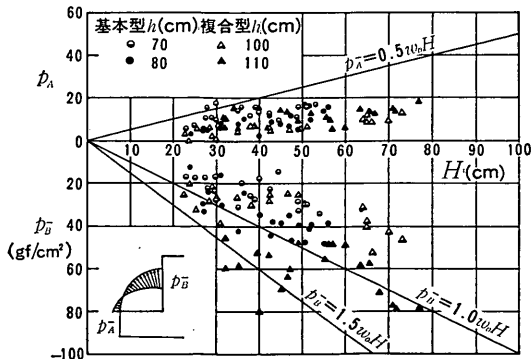


図-42 内から外側へ向かう波力の鉛直成分が最大となるときの曲面スリット部材端波力強度

図-42 は内から外側へ向かう波力の鉛直成分が最大となるときの、すなわち前出図-31の(2)に対応するときの p_A^- と p_B^- (右肩に - を付して表わす) を同様にプロットしたものである。この場合、 p_A^- は正、 p_B^- は負の値となる。このときの波力は潮位によって傾向的に異なり、実験条件の範囲では潮位が高いほど大きい波力となる。基本型の $h=60$ cm、複合型の $h=90$ cm の条件では、潮位が低くて顕著な衝撃圧が発生しないことが多く、データを示していない。結果は必ずしも波高に比例しているわけではなく、ある程度以上では波高が大きくなってそれほど波力は増大しないという傾向が認められる。衝撃圧の発生機構と関連していると考えられるが、今のところこれを適切に表現できるパラメータを選定するには至っていない。そのため、とりあえず波高に比例するかたちで表わすと、 p_A^- は $(0\sim 0.5)w_0H$ 、 p_B^- の下限は若干下回るものもあるけれども $-1.5w_0H$ 程度である。部材設計の上からは $p_A^- = 0$ とした方が厳しい。

このほか、曲面スリット部材の設計において考えるべき荷重状態は前出図-31の(4)の引き波時に対応するものがあるが、このときの波力は一般に小さく、上述の $p_A^- = 0$ としたときの波力分布で十分カバーされていると考えてよいであろう。

(2) 複合型の鉛直および水平スリット部材に働く波力

複合型の場合には、曲面スリット部材のほか鉛直および水平スリット部材に働く波力を考慮しなければならない。これらについては簡単のため等分布荷重と仮定する。

図-43 は鉛直スリット部材に働く波力強度の正および

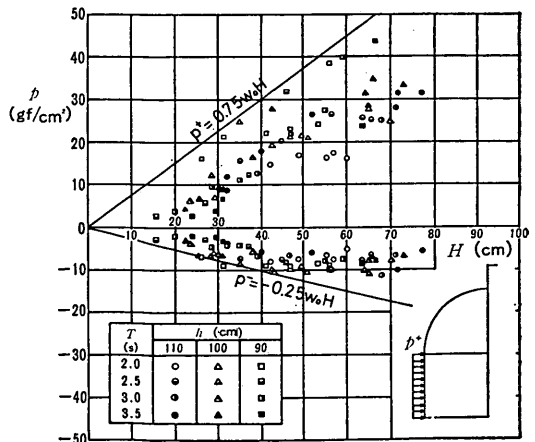


図-43 複合型鉛直スリット部材に働く波力強度

負のピーク値をプロットしたものである。負の値は遊水室内に衝撃圧が発生したときにも生じうるが、最小値はほとんど流出時に現われている。流入時のピーク値を p^+ で表わす。周期や潮位によってばらついており、潮位の低い方がやや大きい傾向が認められるが、上限をとれば $p^+ = 0.75w_0H$ 程度である。流出時のピーク値を p^- で表わすと、その下限はほぼ $p^- = -0.25w_0H$ 程度である。

図-44 は同様に水平スリット部材に働く正および負のピーク値をプロットしたものである。流入時に下から上

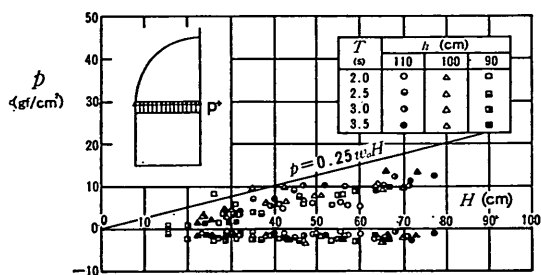


図-44 複合型水平スリット部材に働く波力強度

向きに働く正の波力のピーク値 p^- の上限は $0.25w_0H$ 程度である。実験においては、前述したように波の谷のとき水平スリット部材が空中に露出し、波面上昇に伴って直接衝突する状態が含まれているが、そのときの上昇速度が小さくそれほど大きな波力とならないようである。上から下向きに働く波力はこの場合非常に小さい。遊水室内に衝撃圧が生じたとき、水平スリット部材にも当然この圧力が作用するが、上・下面で相殺して波力はそれほど大きくなりようである。ただし、今回の実験においては水平スリット部材の開口比を 0.50 と大きくしている。これが小さいときには上から下向きの圧力が卓越することも考えられる。そのため、これを考慮して $p^- = -0.25w_0H$ 程度を考えておけばよいと思われる。

5.4 遊水室内壁に働く波圧

(1) 波圧分布

図-45~47 は基本型、図-48~50 は複合型について、各水深条件ごとに波圧の正のピーク値の分布を示したものである。基本型については後壁と床版、複合型については上段および下段遊水室後壁における分布である。た

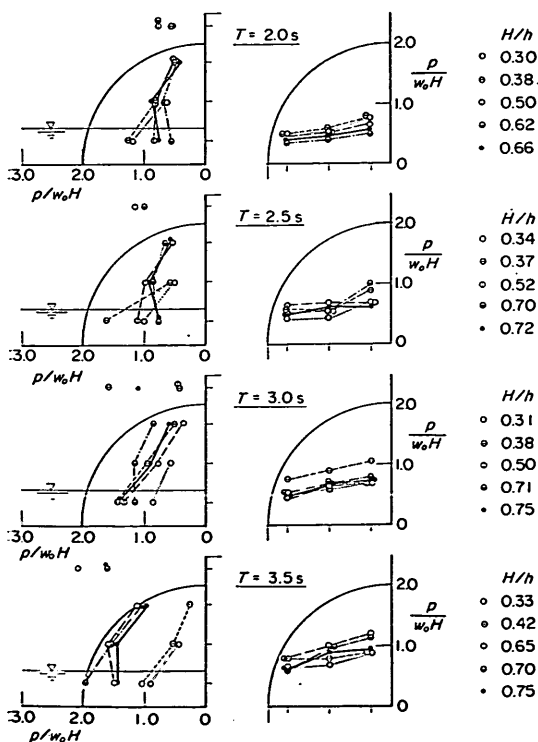


図-45 遊水室内壁に働く波圧分布 (基本型, $h=60$ cm)

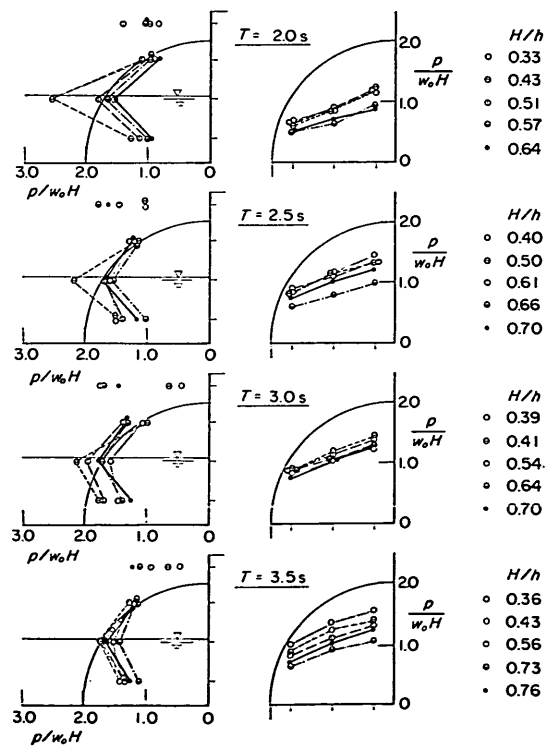


図-46 遊水室内壁に働く波圧分布 (基本型, $h=70$ cm)

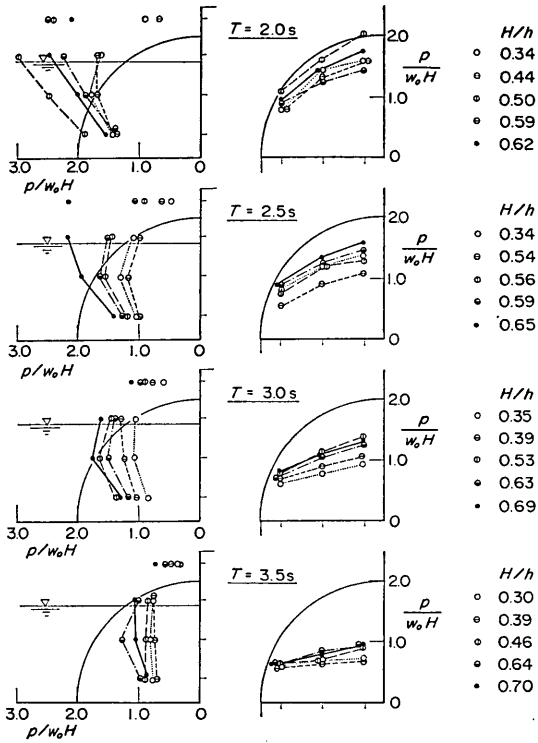


図-47 遊水室内壁に働く波圧分布 (基本型, $h=80$ cm)

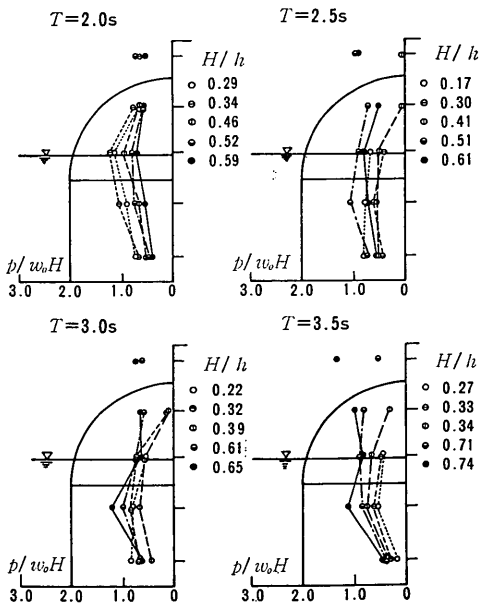


図-48 遊水室内壁に働く波圧分布 (複合型, $h=90$ cm)

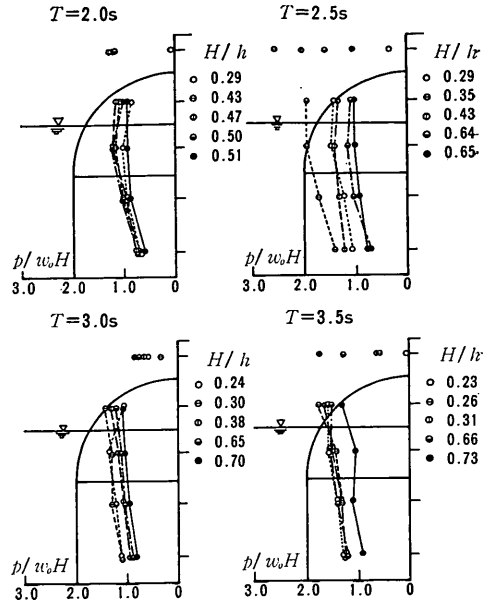


図-49 遊水室内壁に働く波圧分布 (複合型, $h=100$ cm)

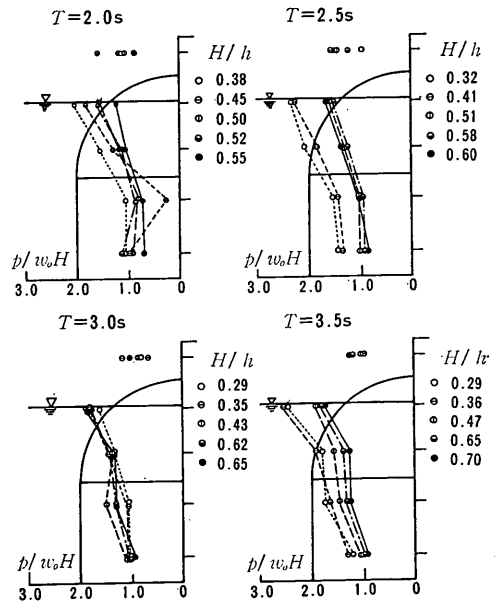


図-50 遊水室内壁に働く波圧分布 (複合型, $h=110$ cm)

だし、ケーソン本体上部工前面における波圧もプロットしてあるが、これは遊水室内の波圧とは連続でないので、線で結んでいない。遊水室後壁に働く波圧は静水面付近で大きい傾向が認められる。また、基本型床版に働く波

圧は奥で大きく、スリット壁側で小さいほぼ直線変化の分布を示す。

なお、遊水室後壁での波圧は既に 5.2 で述べたように顕著なピークが二度現われることがあり、条件によっては最初の波面の接触による衝撃圧が遊水室が閉塞されたときに生じる衝撃圧を上回ることがある。しかしながら、波面の直接作用による衝撃圧は局所的で場所的変動が著しく、作用時間も非常に短い。したがって壁全体としてはほぼ同時にピークを示す後者の波圧を対象とすればよいと考えられる。そのため、波圧データをカット周波数 100 Hz のローパスフィルターを通し、第一のピークがある程度小さくしたのち電算機で解析した。そのときのサンプリング周波数は 1000 Hz としている。図の結果はこうした解析結果における各測点ごとの最大値の平均値である。カット周波数 100 Hz のローパスフィルターを通してることによって、遊水室内壁の最大波圧はほぼ同時分布と考えることができるが、実際には非常に大きな局所的衝撃圧が働くときなど、個々の波における最大値が完全に同時でない場合もあり得る。以下、このような最大波圧の各壁ごとの平均波圧強度について述べる。

(2) 遊水室後壁に働く平均波圧

図-51 は上段遊水室後壁について平均波圧強度 \bar{p} を求めて、波高 H に対してプロットしたものである。图中 $\bar{p}=1.0w_0H$ 等の直線は H と \bar{p} の関係をわかりやすくするために適当にひいたものである。結果は 5.3 の (1) で述べた曲面スリット部材に働く p_B と同様 l_c が小さくなるにつれて、大きな波圧強度となる傾向が認められる。また、必ずしも波高に比例しているわけではないが、本実験における潮位や周期を包含したかたちで、ほぼ上限をとると $\bar{p}=2.0w_0H$ 程度である。しかし、曲面ス

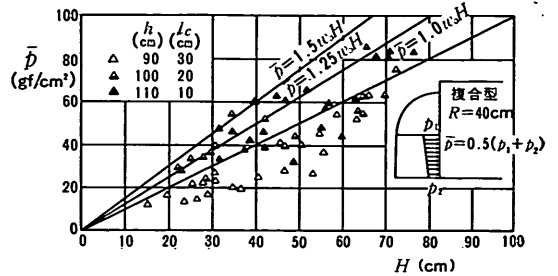


図-52 複合型下段遊水室後壁に働く平均波圧強度

リット部材と同様、波高が外半径に比較してはるかに大きいような場合にはやや小さくなるようである。

さらに、図-52 は複合型下段遊水室後壁に働く平均波圧強度を示したものである。ほぼ上限を波高に比例するかたちで表わすと $\bar{p}=1.5w_0H$ 程度となるが、この場合水平スリット壁の開口比が 0.5 と大きく、これを 0.25 程度とすると減衰がやや大きくなるものと推測される。

(3) 遊水室底版に働く平均波圧

複合型の下段遊水室底版に働く波圧は測定していないので、基本型のみを 図-53 に示す。やや上回るものもあるが、 $\bar{p}=1.25w_0H$ 程度が上限である。

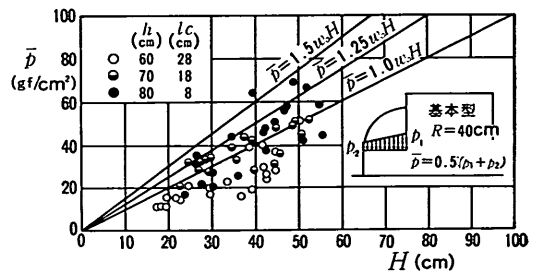


図-53 基本型遊水室底版に働く平均波圧強度

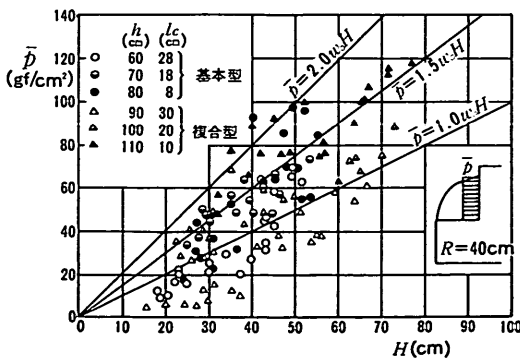


図-51 上段遊水室後壁に働く平均波圧強度

5.5 部材の設計に用いる波力

以上、曲面スリットケーソンの部材に働く波力実験の結果を示したが、波力は潮位や波の条件によって複雑に変化し、これを精密に定式化することはむづかしい。また、衝撃圧の発生機構についてはいまだ不明な点があり、特に曲面スリット部材の設計にあたってはある程度安全側に考えておくのがよいと思われる。図-54, 55 は部材としての重要度なども考慮して、当面曲面スリットケーソンの部材の設計に用いるのに適当と思われる波力の分布を示したものである。このうち、部材波力分布 I は前出の図-31 の (1)、分布 II は (2) に対応し、曲面ス

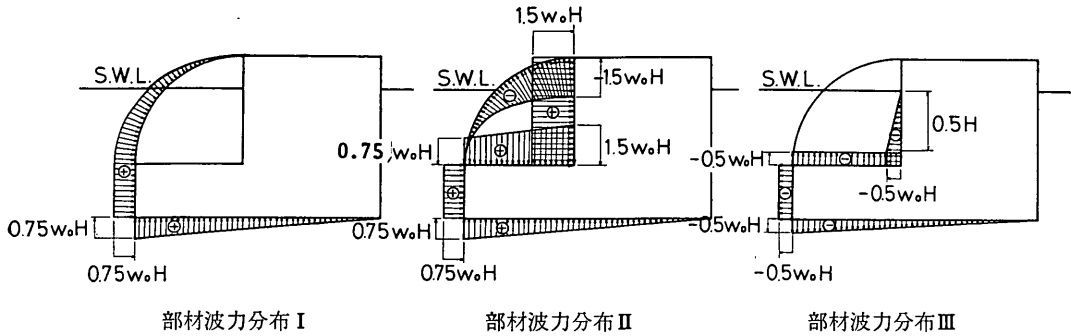


図-54 基本型部材設計波力

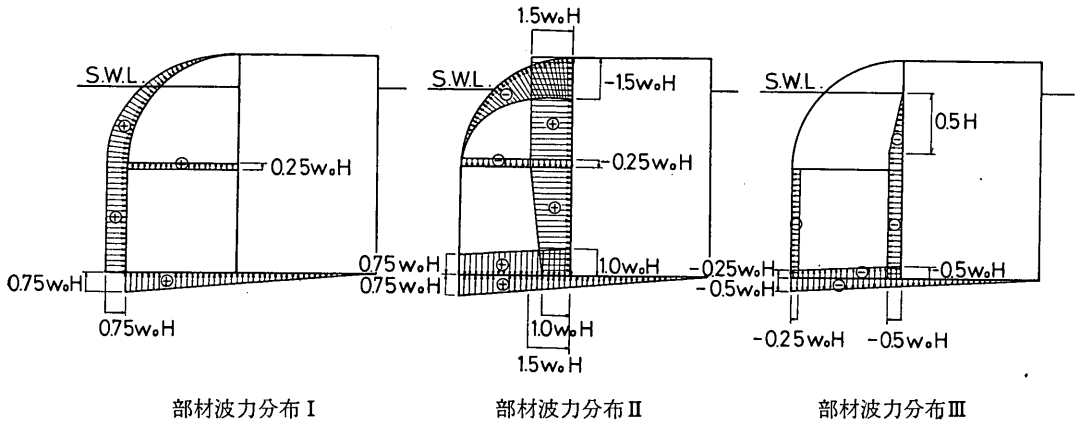


図-55 複合型部材設計波力

リット部材に働く波力は式 (14) においてそれぞれ次のように与える。

分布Ⅰのとき: $p_A = 0.75w_0H$, $p_B = 0$

分布Ⅱのとき: $p_A = 0$, $p_B = -1.5w_0H$

分布Ⅲは波面の下降時および波の谷のときに対応する波力であるが、これは実験結果に基づくというよりも、静水面下波高の 1/2 だけ水面が低下したときの静水圧変化を考えたものである。設計計算に用いる波高 H としては最高波高 H_{max} を用いるべきである。

これによって部材設計波力の一応の算定が可能であるが、先にも述べたように種々の条件によって波力は変化し、実際の適用に際しては個々の設計条件に適應したかたちで模型実験を行って検討することが必要であろう。

6. ケーソン全体に働く波力および滑動安定性

6.1 実験の方法

(1) 全波力実験の方法

5. において各部材に働く波力に関する実験結果につ

いて述べた。ケーソン全体の安定性の検討に用いる波力はこうした各部材に働く波力の同時性を考慮した合波力を考えればよいが、既に述べたように曲面スリットケーソンに働く波力は非常に複雑で、綿密なかたちでこれを定式化するには至っていない。そのため、安定性の検討に用いる波力については、部材の設計に用いる波力とは別に、ケーソンに働く全波力および滑動安定性に関する実験を行って、これにより検討する。以下、まず全波力に関する実験の方法について述べる。

全波力に関する実験は反射、越波・伝達波実験と同様に不規則波水路で実施した。ただし、この場合部材波力と同様規則波による検討である。全波力の測定は三分力検出器を用いたが、基本型については一部六分力検出器も使用した。ただし、これは六成分の測定を目的としたものではなく、ただ実験の実施時期によってたまたま三分力検出器が本実験に利用できず、六分力検出器を代用したにすぎない。このうち三分力検出器は防水型で、図-56 に例示しているようにケーソン背面の水中で模型を

曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究

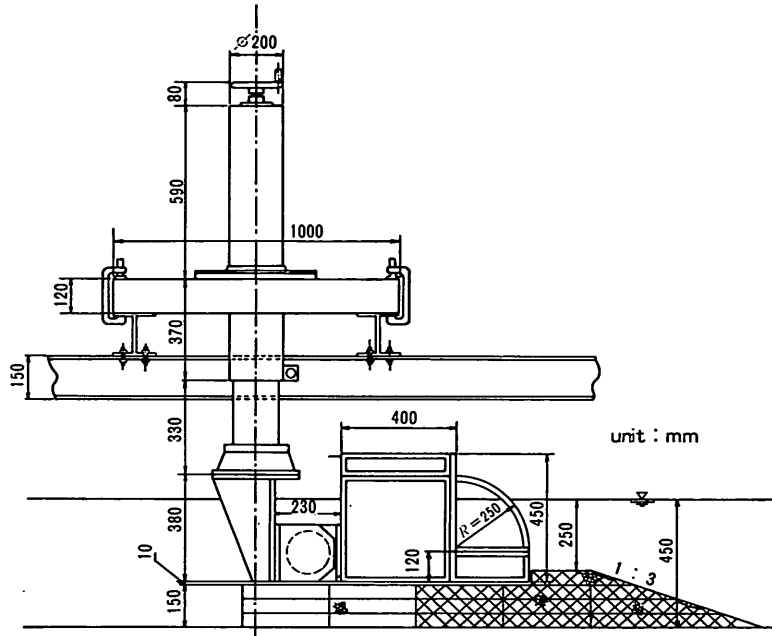


図-56 三分力検出器による全波力測定実験 (基本型 $h=45$ cm の例)

剛結し、これによってケーソン全体に働く波力の水平成分 F_H 、鉛直成分 F_V 、モーメント M_0 を測定する。

図-57 に三分力検出器取り付け部の詳細を示しているが、モーメント M_0 はセンサー中心のまわりの値を出力するため、ケーソン底面後しのまわりの転倒モーメント M を求めるためには、次の式により補正する必要がある。

$$M = M_0 + F_H z_0 - F_V x_0 \quad (19)$$

ここに、 x_0 および z_0 はセンサー中心とケーソン底面後しとの間の水平および鉛直距離であり、本条件の場合 $x_0=11.5$ cm、 $z_0=10.0$ cm である。ただし、水平波力 F_H はケーソンを背後へ押す方向、鉛直波力 F_V はケーソンを持ち上げる方向、転倒モーメント M は後しのまわりに背後へ倒す方向をそれぞれ正とする。三分力検出器の定格は $F_H=100$ kgf、 $F_V=100$ kgf、 $M_0=50$ kgf·m である。

一方、六分力検出器は防滴型ではあるが、水中で用いることはできないので、この場合図-58 に示しているようにケーソン本体部の上部工上面で模型を剛結する方法によった。このときのケーソン底面後しのまわりの転倒モーメント M と水平波力 F_H 、鉛直波力 F_V との関係は次のようになる。

$$M = M_0 + F_H z_0 + F_V x_0 \quad (20)$$

ここに、 F_H 、 F_V 、 M の符号の定義は三分力検出器を用いたときと同じであり、 M_0 は六分力検出器のモーメ

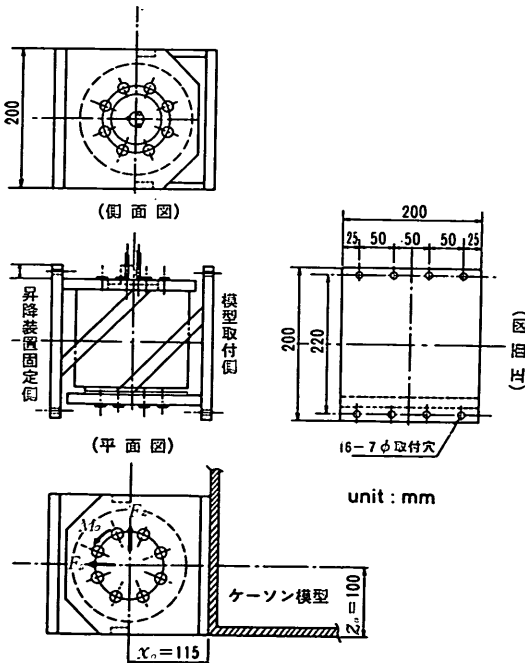


図-57 三分力検出器取り付け部の詳細図

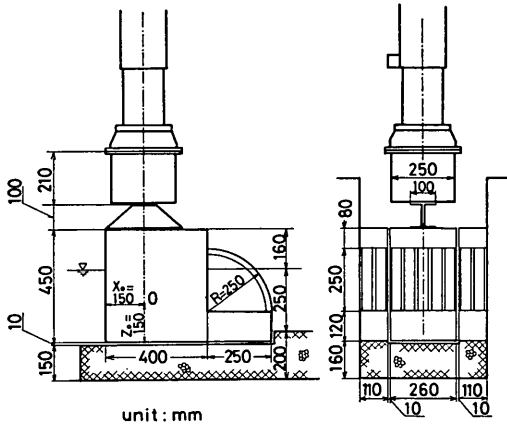


図-58 六分力検出器による全波力測定実験
($h=45\text{ cm}$ の例)

ントの中心 O のまわりのモーメント, x_0, z_0 はケーソン後しとモーメントの中心 O の水平および鉛直距離である。六分力検分器のモーメントの中心はセンサー下面から 40 cm 下方であり, 本条件の場合 $x_0=15\text{ cm}, z_0=15\text{ cm}$ である。六分力検出器の定格は $F_H=50\text{ kgf}, F_V=75\text{ kgf}, M_0=20\text{ kgf}\cdot\text{m}$ である。

三分力検出器, 六分力検出器ともに架台に固定した昇降装置に剛結し, ケーソン模型を付けたまま上下に移動できる。今回の実験では金網枠に詰めた捨石マウンド底面との間に 1 cm 程度の間隔を設け, ケーソンがマウンドに接触しないようにした。

本実験に用いた模型は全てアクリル合成樹脂板で製作したもので, 諸元は表-11 に示したとおりである。ここに, 表中 () 内は六分力検出器を用いたときの条件であり, l_0, h_0, h' の条件が三分力検出器を用いたときと 1 cm だけ異なる。基本型の模型は水路幅方向に三つに分けて製作し, 中央 26 cm の部分のみ検出器に取り付け, その両側にダミーとして 11 cm の模型を配した。複合型の模型は水路幅方向に一体として, 48 cm の模型について測定した。

さらに, 三分力検出器を用いたときと六分力検出器を

用いたときの基本型模型には, 前者ではケーソン本体部は水詰めめ, かつ遊水室には側壁を設けない構造であったのに対し, 後者では測定用ケーソン本体部は水密構造として中空とするとともに, 遊水室に側壁を設けた点に相違がある。このように六分力検出器を用いた実験において遊水室側面に側壁を設けたのは, 特に現地において側壁を有した構造を対象としたものではなく, 基本型の測定用ケーソンは水路幅方向の長さが短かいので, これによってダミーケーソンとの間の透き間の影響を避け, 二次元性を確保するように改良したものである。

さて, 測定系の固有振動であるが, これは測定用ケーソンを取り付けた検出器の特性によって決まる。三分力検出器を用いた実験の場合, 測定用ケーソンと取付け金具を含めた空中重量は基本型の場合 32.6 kgf , 複合型の場合 65.4 kgf である。固有振動は連成運動であるため複雑であるが, 試験結果によると水中でそれぞれ 15 Hz , および 12 Hz 程度である。また, 六分力検出器を用いた実験の場合の取付け金具を含めた測定用ケーソンの空中重量は 27.7 kgf であり, 水中固有振動数は 8.3 Hz , 減衰比 β は 0.07 程度である。したがって, いずれの場合も 5. で述べた曲面スリット部材に働く波力の測定と同様, 衝撃力の作用に対する応答が問題となるが, 今回の実験においては応答値そのままを整理する。

全波力実験の実験水深 h は $35.0, 45.0, 55.0\text{ cm}$ の 3 種に変化させた。実験波の周期 T は $1.54, 2.00, 2.50\text{ s}$ の 3 種を標準とし, 六分力検出器を用いた基本型についてのみ 3.0 s を加えた。波高は非碎波から碎波後までの波を対象とすることを原則とし $4\sim 6$ 種である。ここに, 波高は堤体模型設置以前の状態でケーソン設置予定地点から沖半波長の間で 6 点同時測定し, 水路端からの反射波の影響を補正した通過波高を求めた。また, ケーソン設置予定地点での碎波後の波に対しては, ケーソンに働く波力が一般に進行波のときや前方で碎ける波によって最大となることを考慮して, 上述の 6 測点内での最大波高を実験波高とした。ただし, このときにも, 反射波の影響が非碎波のときと同じ割合で現われると仮定

表-11 全波力実験の構造条件

型 式	R (cm)	D (cm)	b (cm)	ϵ	l_0 (cm)	h_0 (cm)	h' (cm)	l (cm)	d (cm)	B (cm)	B' (cm)
基本型	25.0	4.0	1.5	0.25	9.0 (8.0)	17.0 (16.0)	28.0 (29.0)	45.0	25.0	40.0	65.0
複合型	16.0	3.0	2.0	0.25	9.0	14.0	28.0	42.0	25.0	40.0	57.0

() 内は六分力検出器を用いたときの条件

表-12 滑動実験の構造条件 ($h=45$ cm)

型 式	R (cm)	D (cm)	b (cm)	ϵ	l_c (cm)	h_c (cm)	h' (cm)	l (cm)	d (cm)	B (cm)	B' (cm)	W_0 (gf/cm)
基本型	25.0	4.0	3.0	0.25	7.0	15.0	30.0	45.0	25.0	32.5	60.0	1347~4954
複合型	16.0	3.0	2.0	0.25	7.0	16.5	30.0	46.5	25.0	42.0	60.0	1583~4968
通常ケーソン	—	—	—	—	—	16.5	30.0	46.5	25.0	40.0	—	1455~5970

して補正した値を用いている。

(2) 滑動実験の方法

滑動実験も全波力実験と同様不規則波仮設水路で行った。ただし、ケーソン模型は反射、越波・伝達波実験に用いたものと同じであり、不規則波によっている。

表-12 は滑動実験の構造条件をまとめて示したものである。曲面スリットケーソンのほか、複合型模型において曲面スリット部を取り除いた通常のケーソン堤についても実験を行っている。表中 W_0 は水路幅方向単位長さあたりのケーソン模型水中重量であり、基本型では 1347~4954 gf/cm の 8 種、複合型では 1583~4968 gf/cm の 8 種、通常ケーソンでは 1455~5970 gf/cm の 10 種に変化させた。水深 h は 45 cm, ケーソン基面水深 h' は 30 cm, マウンド被覆工天端上の水深 d は 25 cm で一定である。また、表中には示していないが、マウンド前肩幅は 20 cm, 法勾配は 1:3 である。ケーソンとの滑動面となるマウンド部分は碎石をセメントモルタルで固めた剛マウンドとした。実験の前後に摩擦係数 μ の検定試験を実施したが、その結果は $\mu=0.55\sim0.65$ である。

実験波は Bretschneider・光易型を目標スペクトルとした不規則波である。E波, G波と称する 2 種の周期を目標とした標準入力信号をそれぞれ 4 種づつ (E1~E4 波, G1~G4 波) 作成し、波高は入力に際して基準電圧を変えることによった。前出の 図-4 に示した測点 No. 1 と No. 2 (平均水深 56.5 cm), および No. 3 (水深 45.9 cm) での堤体を設置する以前における測定波形から求めた有義波周期 (平均値±標準偏差) は次のとおりである。

E波: $T_{1/3}=2.14\pm0.07$ (s)

G波: $T_{1/3}=2.45\pm0.09$ (s)

波高は E波, G波についてそれぞれ 5 および 6 種に変化させており、図-59, 60 は各波列ごとの約 120 波中の最高波高 H_{max} および有義波高 $H_{1/3}$ を沖波換算波高に対してプロットしたものである。ただし、 H_{max} , $H_{1/3}$ はケーソン設置予定地点から 135 cm 沖にあたる測点 No.

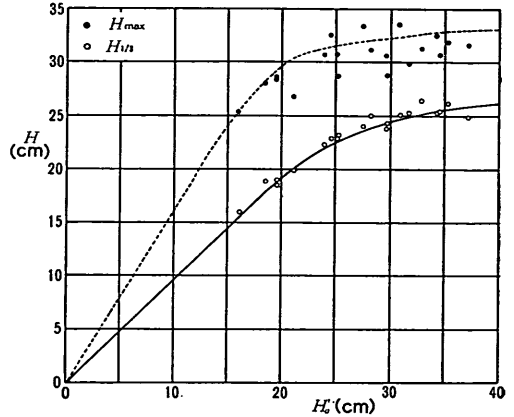


図-59 測点 No. 3 における有義波高と最高波高 (E波)

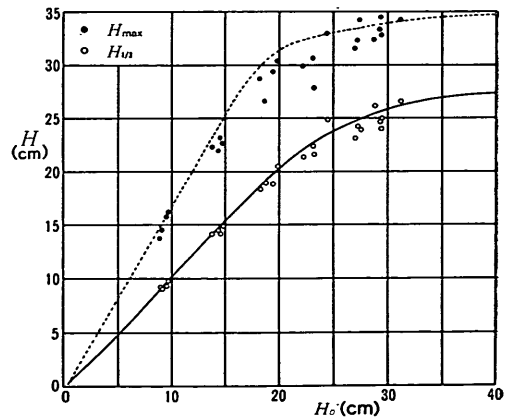


図-60 測点 No. 3 における有義波高と最高波高 (G波)

3 における値であり、 H_0' は沖側測点 No. 1 と No. 2 の有義波高の平均値から、海底勾配を 3/100 として合田の碎波変形理論²²⁾により推定した値である。また、図中の曲線は海底勾配を 1/100 として H_0' から同碎波変形理論を用いて計算した測点 No. 3 における有義波高, 最高波高の関係を表す。ただし、この最高波高は 120 波中の

期待値であり、1/80 最大波高に相当し、砕波変形の影響を受けない範囲では $H_{max}/H_{1/3}=1.64$ の関係にある。実験値は 3/100 から 1/100 勾配へ変わる水路床上での測定値であるが、本条件の場合単一勾配としたときの推定値とかなりよく合っている。これは勾配の変化がそれほど大きくないこと、および測点 No. 3 が 1/100 勾配の始点からある程度後方の地点であることによると思われる。

測定値は図中において区別していないけれども、E1～E4 あるいは G1～G4 の波列によってばらついている。これは既に 3.1 の (3) で述べたように不規則波特有の性質による。表-13 はこれら 4 種の波列の平均値を前述

表-13 不規則実験波の諸元

波種	$T_{1/3}$ (s)	測定値				推定値	
		H_0' (cm)	$H_{1/3}$ (cm)	H_{max} (cm)	$\frac{H_{max}}{H_{1/3}}$	$H_{1/3}$ (cm)	H_{max} (cm)
E波	2.14	18.5	18.1	27.6	1.52	17.6	27.5
		23.8	22.0	30.2	1.37	21.8	31.3
		27.7	24.0	31.0	1.29	23.6	32.0
		32.1	25.2	31.6	1.25	25.0	32.5
G波	2.45	34.8	25.4	31.0	1.22	25.4	32.8
		9.4	9.3	15.1	1.62	9.5	15.6
		14.5	14.4	22.6	1.57	14.9	24.4
		19.2	19.2	28.8	1.50	19.8	30.7
G波	2.45	23.3	22.6	30.4	1.35	22.9	32.7
		27.8	24.4	32.6	1.34	25.0	33.5
		29.7	25.1	33.5	1.33	25.7	33.8

の推定値と合わせて示したものである。 $H_{max}/H_{1/3}$ は沖波波高の増大とともにE波で 1.52 から 1.22, G波で 1.62 から 1.33 まで低下しており、砕波の影響の相当強い条件まで含んでいる。最高波高を推定値と比較すると、測定値の方がやや小さいものもあるが、その違いは 8% 以内であり、後述の実験結果における H_{max} には推定値を用いることにした。

なお、測点 No. 1, 2 での波形から反射率を求めると、本実験条件の場合 0.18 以下である。図-61 はこのときの分離入射有義波高と合成波のゼロアップクロス法により求めた有義波高（測点 No. 1 と No. 2 の平均値）の関係を示したものであるし、有義波高に関する限り反射波の影響は小さく、合成波の諸元をそのまま用いてよいといえる。また、図-62 は通常のケーソン模型を

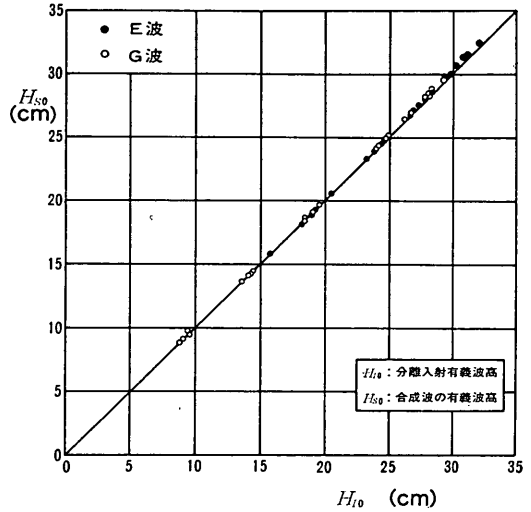


図-61 堤体設置以前の状態で分離入射波高と合成波の波高

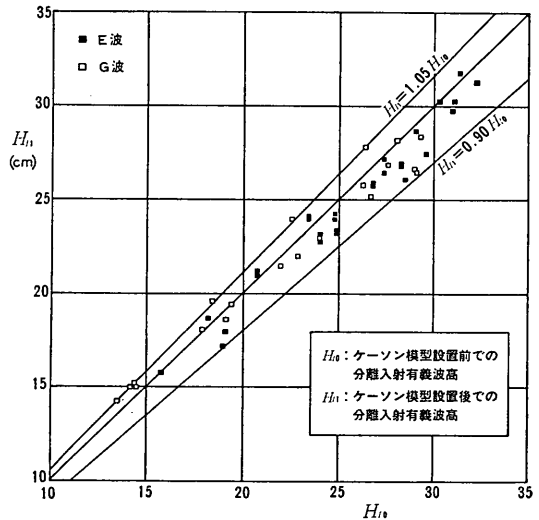


図-62 堤体設置以前での分離入射波高と通常ケーソン堤設置後の分離入射波高

設置した状態での分離入射波高と比較したものである。この場合、反射率は強度の砕波を含む場合でも 0.50 程度以上と高いが、堤体設置時の分離入射波高は堤体設置以前での分離入射波高の 0.90～1.05 倍の範囲に入っている。造波板からの再反射波の影響が強ければ堤体設置時の分離入射有義波高も大きく変化する筈であるが、本水路の場合模型堤体からの反射波は幅 0.5 m の内水路においてのみ生じ、それが幅 4.9 m の外水路に分散するた

め、影響が小さく、通過波の諸元をそのまま滑動実験時の入射波の諸元と考えることにした。

ケーソンの滑動量の測定は背面水中に取り付けた差動トランス式変位計の出力をペン書きオシログラフに記録する方法によった。測定は同一条件で2回繰り返している。

6.2 全波力

(1) 測定記録の例

図-63 は三分力検出器による測定記録の例を示したものである。図の上半分は基本型、下半分は複合型の記録であり、周期 2.00 s のときの $h=35, 45, 55$ cm における最も厳しい波高条件に近い例を示している。図中 η はケーソン前面で同時に測定した水位である。

水平波力 F_H は前面水位の上昇に伴って正（背後へ押す方向）の波力となり、水位が最大となる付近で衝撃的变化を示す。これは 5. で述べた遊水室内に衝撃圧が発生した瞬間に対応するものである。図中縦の実線はこの衝撃力がピークを示した瞬間を表わす。衝撃力に続き顕著な振動が認められる例が多いが、これは測定系の固有振動と考えられる。

一方、鉛直波力 F_V は F_H より早く正（上向き）となり、比較的緩やかな変化でピークを示す。この時刻を点線で示しているが、遊水室内に衝撃圧が発生して F_H が最大となるときより時間的に前であり、ケーソン底面に働く揚圧力が最大となった瞬間に対応するものと推測される。このときの水平波力は一般に小さいが、複合型の $h=45$ cm, 55 cm の例ではこのときわずかなピークが認められる。これは切り立った波面が直立縦スリット壁に衝突した瞬間に対応するものと考えられる。通常の直立ケーソンの場合にはこのとき著しく大きな衝撃力が生じるが、本構造の場合スリット壁でこれを受けるため、それほど大きくならない。曲面スリットケーソンの著しい

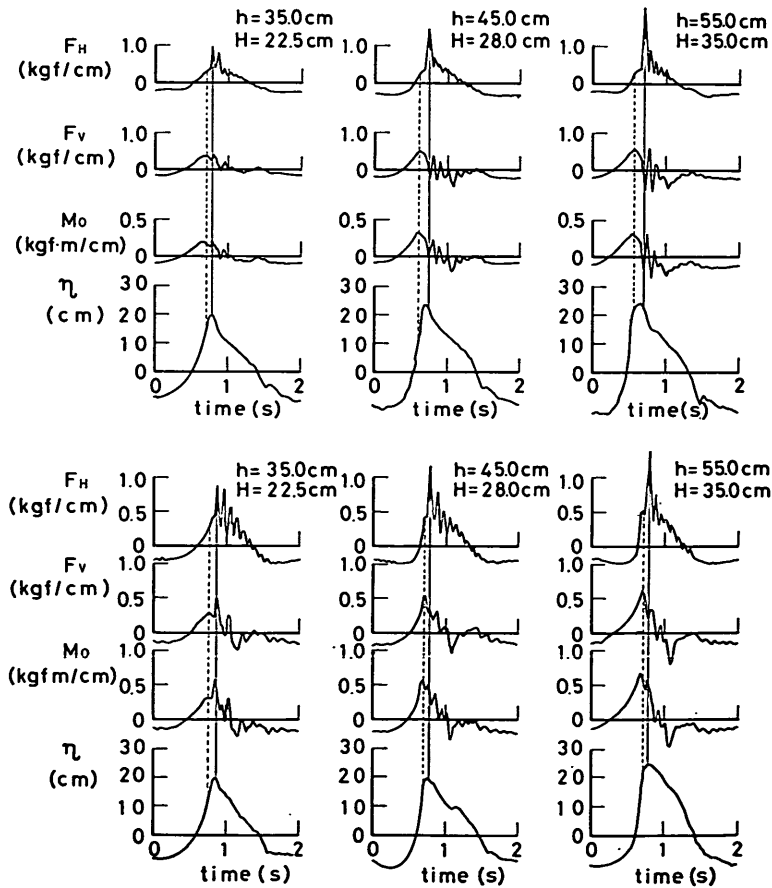


図-63 三分力検出器による記録の例 ($T=2.0$ s)

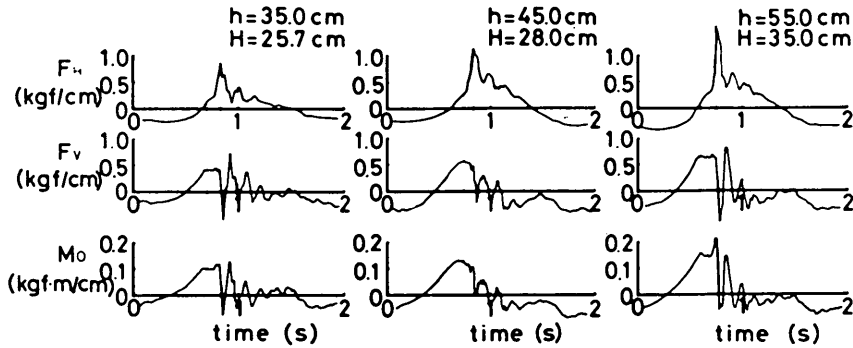


図-64 六分力検出器による記録の例 (基本型, $T=2.0$ s)

特徴はそのあとに生じる衝撃力であり、前述したように F_H が最大になるとともに、これに対応して F_V も急激に変化する。基本型の $h=45, 55$ cm 例の中では F_V が急激に低下して負（下向き）のピークを示している。これは遊水室内に衝撃圧が発生したとき、遊水室底版にも下向きの力が働き、それがケーソン底面に働いている上向きの揚圧力や曲面スリット部材に働く波力の上向き成分より卓越することを意味する。ただし、記録は測定系の衝撃応答の結果であり、増幅あるいは減衰している可能性はあるが、この例は衝撃力の発生によって水平波力が急激に増大すると同時に、鉛直波力が急激に減少することを明らかに示している。

しかし、複合型の場合には衝撃圧が発生したとき F_V は必ずしも低下せず、 $h=35$ cm の例では逆に増大している。これは 5. でも述べたように複合型では遊水室底版は相対的に深く、そこに働く衝撃圧が減衰しており、曲面スリット部材に働く波力の上向き成分が卓越するためと推測される。衝撃圧の発生後、振動を示しているが、波面は正であるにもかかわらず、 F_V は平均的にみて負の傾向にある。これは越波による下向きの打ち込み波圧の影響と考えられる。モーメント M_0 の記録はセンサーの中心のまわりの値であり、鉛直波力に対する腕の長さが水平波力に対する長さより長く、そのため鉛直波力に類似した変化を示している。

図-64 は六分力検出器による基本型の記録の例を示したものである。三分力検出器による記録とほぼ同様な傾向が認められるが、振動の現われ方がやや違っている。遊水室内に衝撃圧が発生して水平波力が急増するとともに鉛直波力も急に低下しているが、それぞれのピーク値の現われる時間が 0.03 s 程度ずれる。この理由は十分に解明しているわけではないが、衝撃応答による位相の

遅れとも考えられるので、遅れを無視して値を読みとることにした。

(2) 水平波力の最大値

図-65 は三分力検出器による記録から求めた水平波力の最大値とそのときの鉛直波力を波高に対してプロットしたものである。ただし、水平波力はケーソンの全高 l で割った平均波力強度 \bar{p}_H で、また鉛直波力はケーソン本体の幅 B に三角形分布で働くとしたときの前端での揚圧力強度 p'_u で表わしている。つまり、これらと F_H, F_V とはそれぞれ次の関係にある。

$$\bar{p}_H = F_H / l, \quad p'_u = 2F_V / B \quad (20)$$

結果はばらついているが、 \bar{p}_H のほとんどは $0.5w_0H$ と $1.25w_0H$ の範囲にあり、周期や水深による傾向的な

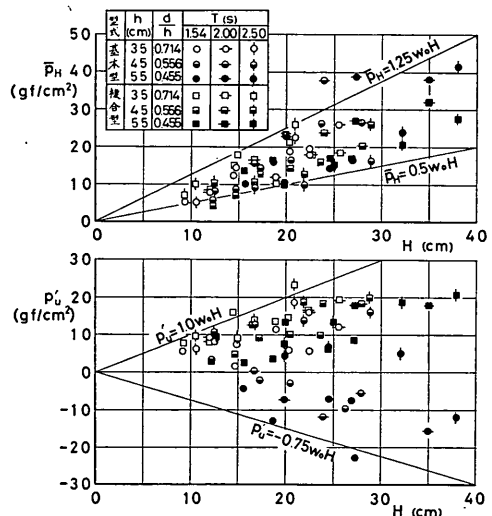


図-65 最大水平波力とそのときの鉛直波力 (三分力検出器による実験結果)

曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究

差は明らかでない。 p_u' はほぼ $1.0w_0H$ 程度以下であるが、前出の記録で述べたように負の値になることがあり、基本型全データの 38% に達している。複合型の場合には負となる例がないが、これは前述のように基本型と比較して遊水室底版が相対的に遠く、かつ幅が狭いことによるものと考えられる。このときの水平スリット部に働く衝撃力が小さいことは 5. で述べたとおりである。

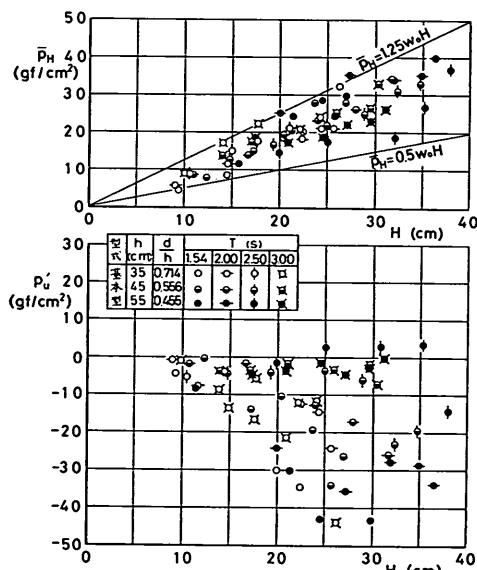


図-66 最大水平波力とそのときの鉛直波力 (六分力検出器による実験結果)

図-66 は六分力検出器による結果から求めた基本型の最大水平波力とそのときの鉛直波力を示したものである。 \bar{p}_H はほぼ $0.5w_0H$ と $1.25w_0H$ の範囲に分布しており、前出の三分力検出器による結果と大差ない。しかし、 p_u' はほとんど負となっており、前出の結果とは異なる。これが遊水室に側壁を設けてダミーとの透き間から衝撃圧の逃げを防いだことによる違いか、あるいは検出器の衝撃応答特性による違いか明らかでない。ケーソンの安定性の面からは鉛直波力が大きい方が危険となるので、後の検討では安全側のデータとして三分力検出器による結果を用いる。

(3) 鉛直波力の最大値

図-67 は六分力検出器による基本型の最大鉛直波力とそのときの水平波力を示したものである。ただし、鉛直波力は衝撃圧が発生する以前の比較的緩やかな変化にお

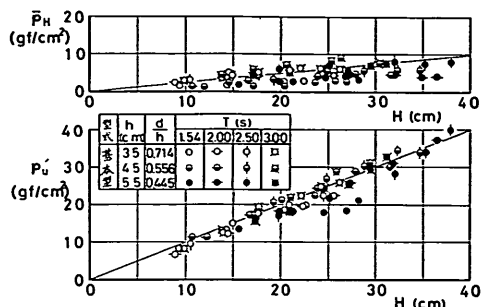


図-67 最大鉛直波力とそのときの水平波力 (六分力検出器による実験結果)

ける最大値である。つまり、ケーソン底面に働く揚圧力が最大のときの値と考えてよい。結果は p_u' が $1.0w_0H$ 程度、 \bar{p}_H が $0.25w_0H$ 程度であり、ケーソン底面に働く揚圧力が最大となるときの水平波力は小さいことが明らかである。

(4) 水平波力と鉛直波力の滑動に対する合成効果

以上、水平波力と鉛直波力の最大値を調べたが、鉛直波力が最大となるときの水平波力が小さく、滑動に対しては水平波力が最大となるときの厳しいと考えてよい。そこで、このときの水平波力と鉛直波力の滑動に対する合成効果を調べてみる。

滑動限界状態においては次の関係が成り立つ。

$$F_H = \mu(W_0 - F_V) \quad (21)$$

ここに、 μ は摩擦係数、 W_0 はケーソンの静水中重量であり、 W_0 が $(F_H + \mu F_V)$ より大きければ滑動しない。図-68 はこの滑動に対する水平波力と鉛直波力の合成波力を $\mu w_0 B l$ で割って無次元化して示したものである。横軸には H/d をとっている。無次元量 $(F_H/\mu + F_V)/w_0 B l$ には特別の意味はないが、滑動限界静水中所要重量と $B \times l$ のケーソン全体に働く浮力の比を表わしている。図中の曲線は通常のケーソン堤に用いられる合田

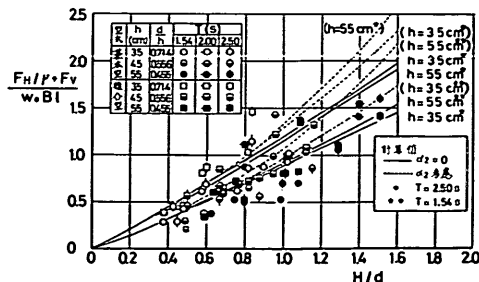


図-68 滑動に対する水平および鉛直合成波力

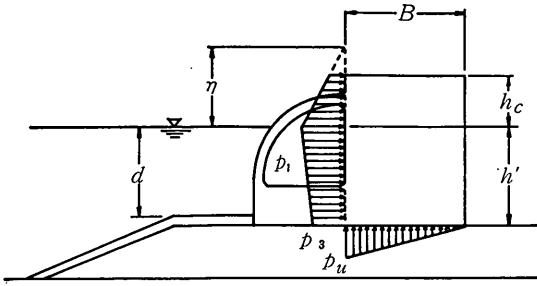


図-69 仮想波力分布

式²²⁾を適用して求めた基本型に対する合成波力を表わしている。ただし、図-69に示しているように消波部を無視したケーソン本体に波圧が作用するとしている。合田式による水平波力 F_{HG} 、鉛直波力 F_{VG} は直角入射の場合次の式で与えられる²⁴⁾。

$$F_{HG} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \alpha_3 + (1 + \alpha_4) \frac{h_c^*}{h'} \right\} (\alpha_1 + \alpha_2) w_0 H h' \quad (22)$$

$$F_{VG} = \frac{1}{2} \alpha_1 \alpha_3 w_0 H B \quad (23)$$

ここに、

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2 \quad (24)$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h_0 + d}{3h_0} \left(\frac{H}{d} \right)^2, \frac{2d}{H} \right\} \quad (25)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left[1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right] \quad (26)$$

$$\alpha_4 = 1 - h_c^*/\eta^* \quad (27)$$

$$h_c^* = \min \{ \eta^*, h_c \} \quad (28)$$

$$\eta^* = 1.5H \quad (29)$$

図中の計算値のうち実線は式(22)において波圧係数 α_2 を 0 としたときの値、破線はこれを考慮したときの値である。いずれも $h=35, 55$ cm に対する $T=1.54, 2.50$ s の例であり、 $\alpha_2=0$ としたときには水深の変化よりも周期の変化が大きく、 $h=35$ cm, $T=2.50$ s の条件が最大で、 $h=35$ cm, $T=1.54$ s の条件が最小となる。 α_2 を考慮したときにはマウンドが高く、 H/d が大きくなるにつれて大きな波力となる。そのため、マウンドの高い $h=55$ cm の結果が大きく増大している。

一方、実験結果は著しくばらついているが、 H/d が大きくなっても特に顕著な波力の増大傾向は認められない。 d/h についてはむしろ高マウンド条件の方が小さいようでもある。同様な傾向は多孔ケーソンなど通常の直立消波ケーソンにおいても認められるところであり²⁴⁾、

曲面スリットケーソンの場合にもマウンド形状による波力の異常増大については滑動安定性に関する限り注意を払う必要はないようである。基本型と複合型とを比較すると、複合型に働く波力が大きいものが多い。これは先に述べたように鉛直波力が基本型に比較して大きいことによる。周期の影響なども傾向的ではないが、全体的には $\alpha_2=0$ とした合田式を準用して波力を推定してもよいといえる。ただし、 $H/d=0.6 \sim 1.0$ の特に複合型においては計算値を上回るものが多く、なお検討の必要がある。

(5) 転倒モーメント

ケーソン後しのまわりの転倒モーメントは三分力の測定結果から前出の式(19)によって求められる。図-70

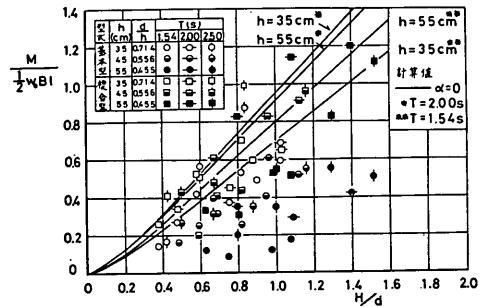


図-70 水平および鉛直波力による転倒モーメント

はそれぞれ基本型、複合型に対して、水平波力が最大となるときに転倒モーメント M を $w_0 B^2 l / 2$ で割って無次元化して、 H/d に対しプロットしたものである。合わせて(4)の合成波力と同様に合田式による波圧が働くとしたときの計算値も示してある。ただし、 $\alpha_2=0$ とした結果のみである。この合田式による転倒モーメント M_G は次式で与えられる。

$$M_G = \frac{1}{6} \left\{ 2 + \alpha_3 + 3(1 + \alpha_4) \frac{h_c^*}{h'} + (1 + 2\alpha_4) \left(\frac{h_c^*}{h'} \right)^2 \right\} \alpha_1 w_0 H h'^2 + \frac{1}{3} \alpha_1 \alpha_3 w_0 H B^2 \quad (30)$$

実験結果はモーメントに対しては鉛直波力の影響が大きいため、前出の滑動に対する合成波力の場合より著しくばらついている。また、基本型と複合型と異なり、基本型の方で全体に小さい。特に、衝撃圧の発生によって下向きの鉛直波力が作用するような場合には転倒モーメントは著しく小さくなる。複合型で一部計算値を上回

るものもあるけれども、転倒モーメントに対しては $\alpha_2 = 0$ とした合田式を準用する方法で検討すれば十分であるといえる。

6.3 滑動安定性

前節において全波力測定結果から求めた波力および転倒モーメントについて述べたが、本節においては不規則波による滑動実験の結果について述べる。

図-71 は種々のケーソン重量に種々の有義波高の波を作用させたときの滑動実験結果をまとめて示したものである。ここに、 S は約 120 波の作用による滑動量で、4 種の波列による 2 回繰り返し実験の平均値である。 H_{max} は 6.1 の (2) で述べた 120 波中の最高波高の期待値、 H_{CG} はケーソン重量に対し、合田式によって求めた滑動限界波高である。ただし、曲面スリットケーソンに対しては

前に述べたように曲面スリットによる消波部を無視したケーソン本体に、合田式において $\alpha_2 = 0$ とした波圧が作用するものとして求めている。この滑動限界波高 H_{CG} は $h_0 < 1.5H_{CG}$ の条件では、式 (21)、(22) および (23) の関係から、次式で与えられる。

$$H_{CG} = \frac{\mu W_0 / w_0 + \alpha_1 h_0^2 / 3}{\{(1 + \alpha_3) h' / 2 + h_0 + \mu B\} \alpha_1} \quad (31)$$

結果は、曲面スリットケーソンの場合基本型と複合型で傾向的相違が認められず、図中の実線はそれらの平均的関係を表わした曲線である。一方、通常ケーソンの場合には周期によってやや異なる傾向が認められるが、図中の破線はそれにかまわず平均的な関係を表わしたものである。両者を比較すると、曲面スリットケーソンに働く波力を $\alpha_2 = 0$ とした分だけ小さく見積っているのにも

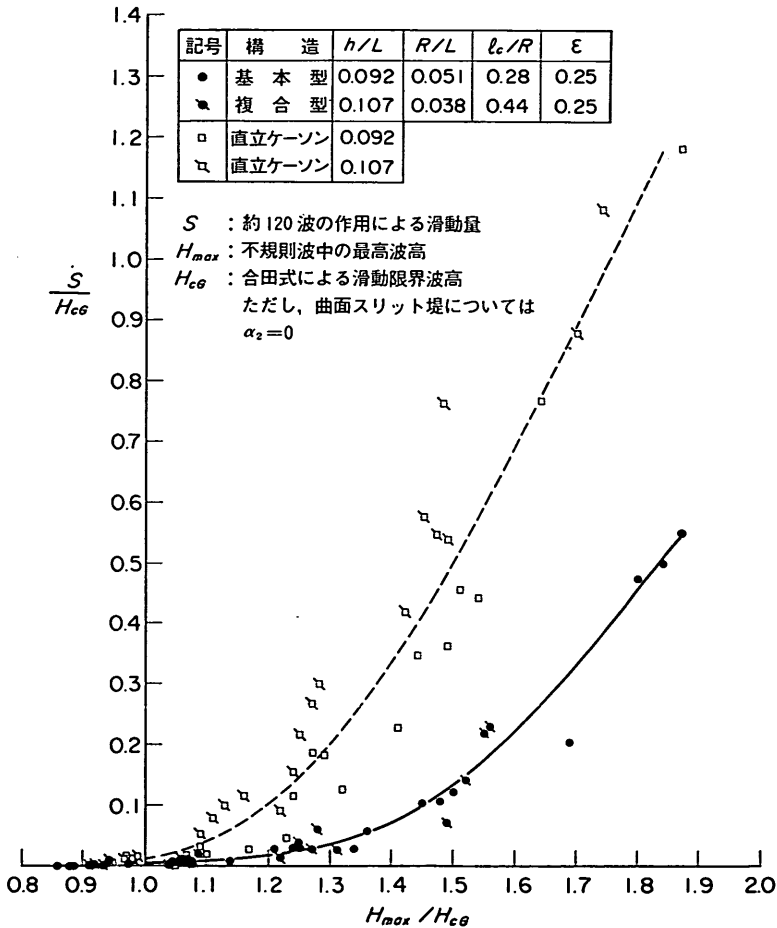


図-71 不規則波による滑動実験結果 (開マウンド)

かわからず、曲面スリットケーソンの滑動量が全体に小さいことがわかる。

また、同図は設計条件を上回る波の来襲を受けたときの滑動安定性の違いを表わしているとみることできる。たとえば、来襲波の H_{max} が滑動限界波高 H_{CG} を 50% 上回ったとすると、通常のケーソンは約 120 波の作用で H_{CG} の 0.50 倍程度の距離を滑動するのに対し、曲面スリットケーソンは H_{CG} の 0.13 倍程度しか滑動しない。つまり、 $H_{CG}=10\text{m}$ とすると、両者の滑動量はこの場合 5.0m と 1.3m で、曲面スリットケーソンの滑動量は通常ケーソンの滑動量の 1/3.8 となる。以上の点から、曲面スリットケーソンは滑動安定性に関する限り、通常ケーソンよりも粘り強い構造といえることができる。

6.4 安定性の検討に用いる設計波力

以上、曲面スリットケーソンに働く全波力と滑動実験結果について述べた。実際の設計においては滑動のみならず転倒、端し圧の検討等が必要となるが、これらについても全波力実験の結果から推測して通常ケーソンの場合より不利になるとは考えられない。したがって、当面曲面スリットケーソンの安定性の検討に用いる設計波力は合田式を準用して次のように算定すればよいと考える。

すなわち、前出図-69 に示したように曲面スリットによる消波部を無視したケーソン本体部に波圧が働くものとし、静水面上波圧強度が 0 となる高さ η^* 、静水面およびケーソン基面での波圧強度 p_1 , p_3 、前しでの揚圧力強度 p_u を次式により求めて波力を計算する。

$$\eta^* = 1.5H_{max} \quad (32)$$

$$p_1 = \alpha_1 w_0 H_{max} \quad (33)$$

$$p_3 = p_u = \alpha_3 p_1 \quad (34)$$

ここに、 α_1 , α_3 は前出の式 (24), (26) で与えられる係数である。最高波高 H_{max} のとり方は一般の場合と同様にする。

斜め入射波に対する波向き補正については実験的検討を行っていないが、本構造において問題となる衝撃圧が斜め入射の場合著しく減じられると推測されることから、低減できると思われる。当面通常ケーソンの場合と同様に、 η^* , p_1 とともに $(1+\cos\beta)/2$ を乗じて補正するのがよいであろう。ここに、 β は防波堤法線に直角方向と 15° の範囲で危険側に振った波の入射方向とのなす角度である。実際の適用に際してはできるだけ具体的条件に適応した模型実験によって検討するのが好ましいことは

いうまでもない。

7. 主要な結論

本研究の結果得た主要な結論をまとめると以下のとおりである。

1) 曲面スリットケーソンの反射波軽減効果は多孔壁や縦スリットケーソンなど通常の直立消波ケーソンよりやや高く、消波ブロック被覆堤と同程度の効果が期待できる。また、越波・伝達波は通常のケーソン堤と同程度かやや小さくなる。

2) 曲面スリット消波部の構造諸元のうち反射率に影響を及ぼす主要なものは曲面スリット壁の開口比 ϵ 、外半径 R 、および静水面上の天端高さ l_0 である。このうち開口比 ϵ は 0.25 とするのがよい。最適条件においては反射率を 0.2 程度とすることができるが、目標反射率を 0.4 とすると、外半径 R を消波対象の波の波長 L の 1/10 程度とし、外半径の 30% 程度が静水面上に出るようにすればよい。部材の幅 D や開口幅 s は反射率にほとんど影響を与えず、構造強度および施工性の面から決定してよい。

3) 曲面スリット壁外側波面の先端がケーソン上部工前面に達し遊水室をおおった瞬間、あるいは遊水室内波面が上昇して曲面スリット壁上端面下面に衝突した瞬間に、遊水室内に顕著な衝撃圧が発生する。ケーソンの安定性にとって最も厳しいのはこのときであるが、衝撃圧は遊水室周辺全ての部材に同時に働き、各部材に働く波力の相殺効果があるため、滑動および転倒に及ぼす合成波力としてはそれほど大きくならない。特に、通常のケーソン堤においてマウンドの形状により強大な衝撃碎波力が作用する条件であっても波力の著しい増大はない。

4) 安定性の検討に用いる設計波力は、曲面スリット壁による消波部を無視して、その背後のケーソン本体部に一般の合田式における波圧係数のうち α_1 のみ、すなわち $\alpha_2=0$ としたときの波圧が働くものとして算定すればよい。こうして設計したときの曲面スリットケーソンは万一反設計波を上回る波が来襲したとしても通常のケーソンと比較して滑動距離が小さく、部材の強度が十分確保されておれば滑動安定性に関する限り通常のケーソン堤より粘り強い構造といえる。

5) 部材の設計に用いる波力は種々の位相に対応して、① 波の峰の接近に伴う遊水室内への流入等で、ケーソン前面外側から内側へ向かう波力が卓越するときの

分布, ② 遊水室内に衝撃圧が発生して, 内側から外側へ向かう波力が卓越するときの分布, ③ 引き波時あるいは波の谷のときの分布の三つの状態を考えればよい。これに対し, 波の周期や潮位の影響を包含した値として, 図-54 (基本型), 図-55 (複合型) の分布を示したが, 当面これによって部材の設計を行うのがよい。

8. あとがき

以上, 曲面スリットケーソンの水理特性を実験的に検討し, 設計における曲面スリット壁消波部諸元の決定や安定性の検討および部材計算に用いる波力条件の与え方についての一応の指針を示した。しかしながら, 曲面スリットケーソンに働く波力は非常に複雑であり, 本報告で示した方法は概略設計などにおける一応の目安としてこれを適用し, 実施にあたっては個々の条件に応じた適切な模型実験によって検討することが必要であると考えられる。特に, 実際において問題となる斜め入射波に対しては本研究においては何ら検討していない。遊水室内に発生する衝撃圧は斜め入射によって著しく緩和されることも考えられ, これについては今後機会を得て検討していくことにしたい。

曲面スリットケーソンのアイデアの原点はまえがきで述べたように直立消波ケーソンと斜面ケーソンの結合であった。このうち, 直立消波ケーソンに期待した反射波軽減効果は予期どおり優れたものであることが確認できたが, 斜面ケーソンとしての効果は安定性や部材にとって最も重要な波力が遊水室内に生じる衝撃圧であることが明らかとなり, 当初の期待に反した。しかし, こうした遊水室内における衝撃圧の発生は上床版を有した通常の直立消波ケーソンにおいても生じるところであり, 曲面スリットケーソンに働く衝撃圧はこれと比べるとむしろ小さい。曲面スリット部材などプレストレスト・コンクリートとすることが必要であるが, 曲面であることによって強度の確保はしやすく, 構造形態としての利点を失なうものではない。ただし, プレストレスト・コンクリート部材の耐波設計法については今後十分検討していかなければならない課題である。これについては当所構造部における成果が期待される。

しかし, いずれにしても衝撃圧の発生は好ましいことではなく, 今後これを緩和するようにさらに工夫を重ねていく必要がある。一般に, 波面の上昇衝突による衝撃圧はそれを受ける部材の形状によって著しく異なり, 円形あるいはくさび形とすることによって緩和できる。そ

うした観点から秋田湾の実験堤²⁵⁾において現地観測に供する曲面スリットケーソン (基本型) では, スリット部材上方下面をくさび形とした部材が採用された。衝撃圧の発生機構の解明とともに, こうした緩和策についても追求していきたいと考えている。さらに, 万一の事故等によってスリット部材が棄損した場合の性能の変化, 安定性に及ぼす影響なども検討しておく必要がある。

なお, 本曲面スリットケーソンの開発は昭和 51 年度に始まった新防波堤構造開発ワーキング・グループでとりあげられ, 調査研究が進められたものである。本報告をまとめるまでに至り, 会議を通じて川上善久前コーディネータ, 合田良実現コーディネータを初め, 港湾局, 港湾建設局等のメンバーの各位から有益なる御助言を頂いた。また, 水理模型実験の実施は, 初期の段階においては元水工部防波堤研究室大里睦男技官 (現運輸省第二港湾建設局八戸港工事事務所) が主として担当した。そのほか全体を通して防波堤研究室北谷高雄技官の協力を得, さらに昭和 52 年度から昭和 54 年度の当所研修生福富耕二, 石川 卓, 藤堂 博の各氏 (ともに技研興業株式会社) の協力を得た。ここに記して関係各位に厚くお礼を申し上げる次第である。(1980 年 9 月 30 日受付)

参 考 文 献

- 1) Jarlan, G. E.: A perforated vertical wall breakwater, The Dock and Harbour Authority, Vol. 41, No. 488, April 1961, pp. 394~398.
- 2) Cote, G. I., and G. R. Simard: The breakwater quay at the Bay of Comeau, The Dock and Harbour Authority, Vol. 44, No. 552, April 1964, pp. 372~376.
- 3) 谷本勝利: 曲面スリット堤の水理特性について, 昭和 54 年度港湾技術研究所講演会講演集, 1979, pp. 1~27.
- 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) 光易 恒: 風波のスペクトルの発達 (2) —有限な吹送距離における風波のスペクトルの形について—, 第 17 回海岸工学講演会論文集, 1970, pp. 1~7.
- 6) Goda, Y.: Numerical experiments on statistical variability of ocean waves, Rept. Port and Harbour, Res. Inst., Vol. 16, No. 2, 1977, pp. 3~26.
- 7) Terrett, L. L., J. D. C. Osrio, and G. H. Lean: Model studies of a perforated breakwater, Proc. of 11th Conf. on Coastal Eng., London, 1968, pp. 1104~1120.
- 8) Richey, E. P., and C. K. Sollitt: Wave attenuation

- by porous walled breakwater, Proc. ASCE, Vol. 96, No. WW 3, pp. 643~663.
- 9) 谷本勝利・原中祐人・高橋重雄・小松和彦・轟 正彦・大里睦男: 各種ケーソン式混成堤の反射・越波および波力特性に関する 模型実験, 港湾技研資料, No. 246, 1976, 38 p.
 - 10) 谷本勝利・北谷高雄・大里睦男: 不規則波による消波ブロック被覆堤の模型実験例, 港湾技研資料, No. 321, 1979, 60 p.
 - 11) 前出 9) に同じ.
 - 12) 合田良実・岸良安治: 不規則波による低天端護岸の越波特性実験, 港湾技研資料, No. 242, 1976, 28 p.
 - 13) 細川恭史・三好英一・菊地 治: 直立消波護岸の水理特性および曝気能実験, 港湾技研資料, No. 312, 1979, 23 p.
 - 14) 山口晶敬・外山進一・鶴谷広一・岸良安治: 縦型スリットケーソンの越波および反射特性について, 第 26 回海岸工学講演会論文集, 1979, pp. 281~284.
 - 15) 谷本勝利・大里睦男: 消波ブロック被覆堤の不規則伝達波について, 第 26 回海岸工学講演会論文集, 1979, pp. 309~313.
 - 16) 前出 10) に同じ.
 - 17) たとえば, 小西一郎・横尾義貫・成岡昌夫・丹羽義次: 構造力学第一巻, 丸善, 1966, pp. 173~177.
 - 18) 谷本勝利・高橋重雄・村永 努: 直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力—空気圧縮モデルによる検討—, 港湾技術研究所報告, 第 19 巻第 1 号, 1980, pp. 3~31.
 - 19) 谷本勝利・高橋重雄: 直立消波ケーソンに働く空気圧縮揚圧力, 第 27 回海岸工学講演会論文集, 1980, pp.
 - 20) たとえば, 合田良実: 衝撃荷重の測定について—減衰振動系の衝撃応答特性—, 港湾技研資料, No. 33, 1967, 41 p.
 - 21) 合田良実: 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻第 3 号, pp. 59~106.
 - 22) 運輸省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 1979, pp. 2-106~2-108.
 - 23) 谷本勝利: 技術上の基準における波力の取り扱い, 港湾の施設の技術上の基準講習会テキスト, 日本港湾協会, 1979, pp. 41~58.
 - 24) 谷本勝利: 混成防波堤に働く波力について, 昭和 51 年度港湾技術研究所講演会講演集, pp. 1~26, 1976.
 - 25) 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所: 秋田湾地区開発と港湾技術調査について, 1979, 22 p.

主要記号表

- b : 曲面スリット部材の厚さ
 B : ケーソン本体部の幅 (曲面スリットケーソンの

- 場合には消波部を除いた幅)
 B' : 消波部を含めたケーソン全幅
 B_0 : 透過壁厚を含めた遊水室の最大幅
 B_{b0} : 消波ブロック被覆堤の静水面における被覆幅
 d : マウンド被覆材天端上の水深
 D : スリット部材の法線方向幅
 F_H : 水平合波力 (単位長あたり)
 F_{HG} : 合田式から求めた水平合波力 (単位長あたり)
 F_V : 鉛直合波力 (単位長あたり)
 F_{VG} : 合田式から求めた鉛直合波力 (単位長あたり)
 L : 波長, 不規則波の場合には有義波の波長
 M : ケーソン後しのみわりの波力モーメント
 M_G : 合田式により求めた同上波力モーメント
 p : 波圧あるいは波力強度
 p_A : 曲面スリット部材下端での波力強度
 p_B : 曲面スリット部材上端での波力強度
 p_1 : 合田式による静水面での波圧強度, あるいは測点 P1 における波圧強度
 p_3 : 合田式によるケーソン下端での波圧強度, あるいは測点 P3 での波圧強度
 p_u : 合田式によるケーソン前しでの揚圧力強度
 $p_{u'}$: 鉛直波力が曲面スリット消波部を無視したケーソン本体底面に三角形分布で働くとしたときの前しにおける揚圧力強度 ($=2F_V/B$)
 \bar{p}_H : 水平合波力から求めた平均波力強度 ($=F_H/L$)
 P_D : 1 本の曲面スリット部材に働く波力合力
 P_x : P_D の水平成分
 P_y : P_D の鉛直成分
 h : 堤体設置位置での水深
 h' : ケーソンの基面水深
 h_0 : ケーソンの静水面上の天端高
 h_M : マウンドの厚さ
 h^* : 入反射波分離計算用波形測定地点の水深 (測点 No. 1 と No. 2 の水深の平均値)
 H : 波高
 H_I : 分離入射波高
 H_R : 分離反射波高
 H_S : 合成波の波高
 $H_{1/3}$: ゼロアップクロス法で求めた有義波高
 H_{max} : 最高波高
 H_0' : 換算沖波有義波高
 H_{OG} : 合田式により求めた滑動限界波高
 K_R : 反射率

曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究

$\langle K_R \rangle_{\min}$: 最適開口比としたときの極小反射率

K_T : 有義波高の伝達率

l : ケーソンの全高 ($=h'+h_c$)

l_c : 曲面スリット壁外面の静水面上の天端高

q : 平均越波流量 (単位長あたり)

R : 曲面スリット壁外面の曲率半径

s : スリット部材の透き間の幅

T : 波の周期

$T_{1/3}$: 有義波周期

γ_0 : 水の単位体積重量

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$: 合田式における波圧係数

ϵ : スリット部材の開口比 ($=s/(D+s)$)

ϵ_0 : 反射率を極小とする最適開口比

η^* : 合田式における静水面上波圧強度が0となる高さ

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間の角度

μ : ケーソンとマウンドの間の摩擦係数

ρ : 曲面スリット部材中心軸の曲率半径