

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

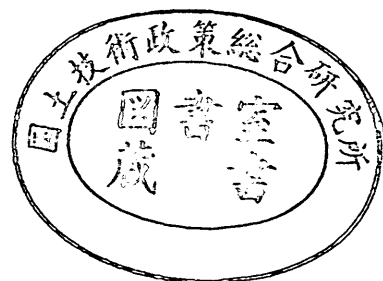
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 20

NO. 2

JUNE 1981

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第20巻 第2号 (Vol. 20, No. 2), 1981年6月 (June 1981)

目 次 (CONTENTS)

1. 混成防波堤のマウンド形状による衝撃砕波力の発生と対策について
.....谷本勝利・高橋重雄・北谷高雄..... 3
(Experimental Study of Impact Breaking Wave Forces on a Vertical-Wall Caisson of Composite Breakwater
.....Katsutoshi TANIMOTO, Shigeo TAKAHASHI and Takao KITATANI)
2. 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
.....谷本勝利・原中祐人・富田英治・村永 努・鈴木諭司..... 41
(A Hydraulic Experimental Study on Multi-celler Caisson Breakwaters
.....Katsutoshi TANIMOTO, Suketo HARANAKA, Eiji TOMIDA,
Tsutomu MURANAGA and Satoshi SUZUMURA)
3. 蛍光砂を用いた砕波帯内における局所的砂移動の観測
.....灘岡和夫・田中則男・加藤一正..... 75
(Field Observation of Local Sand Movements in the Surf Zone Using Fluorescent Sand Tracer.....Kazuo NADAOKA, Norio TANAKA and Kazumasa KATO)
4. 地盤の圧密沈下による斜杭の曲げに関する実験的研究 (第2報)
—野外実大実験—高橋邦夫..... 127
(Experimental Study on the Bending of Batter Piles due to Ground Settlement (2nd Report) —Field Experiment—Kunio TAKAHASHI)
5. 大型タンカーの接岸力に関する研究.....上田 茂..... 169
(Study on Berthing Impact Force of Very Large Crude Oil Carriers
.....Shigeru UEDA)
6. 港湾内貨物流動に関する研究 (第1報)溝内俊一・稲村 肇..... 211
(A Study on the Cargo Flows in Port (1st Report)
.....Toshikazu MIZOUCHI and Hajime INAMURA)
7. 土砂輸送用パイプの摩耗に関する研究 —ライニング材としてのポリウレタン
エラストマの耐摩耗性—岡山義邦・村上幸敏・浜田賢二..... 271
(Studies on the Wear of Slurry Pipelines —Evaluation of the Wear Resistance of Polyurethane Elastomers—
.....Yoshikuni OKAYAMA, Yukitoshi MURAKAMI and Kenji HAMADA)

2. 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

谷本勝利*・原中祐人**・富田英治***
村永努***・鈴木諭司***

要 旨

近年、大水深・大波浪条件下での防波堤建設の要請が高まりつつあるが、このような条件下で従来のケーソン式混成堤もしくは消波ブロック被覆堤をそのまま適用すると、防波堤は非常に大断面のものとなり、工費が著しく増大する。そのため、比較的小さな断面で高い耐波性を保ちうる構造の開発が期待されている。

本報告は、こうした要請に対応するものとして提案されたマルチセルラーケーソンをとりあげ、その水理特性を実験的に明らかにし、安定性の検討および部材計算における設計波力の算定法を検討したものである。このケーソンは前面に上・中・下段の曲り斜面壁を有し、これらの曲り斜面壁の間の中空部がケーソンの前面と天端後半部に開口しているところに構造的特徴をもっている。主要な結果を列挙すると以下の通りである。

1) マルチセルラーケーソン基本型の伝達率は通常ケーソンよりやや高い。しかし、前面開口部にスリット壁を設けて消波型とすることにより、通常のケーソン堤と同程度の伝達率とすることができる。また、この消波型の反射率は消波ブロック被覆堤と同程度である。

2) マルチセルラーケーソンの安定性の検討に用いる設計波力は、上段曲り斜面壁上端からケーソン下端までの不透過な直立壁を仮想して、それに合田式において波圧係数 α_2 を 0 とおき、かつ波圧の作用高さ、強度ともにてい減係数 λ を乗じた波圧が働くものとして算定できる。てい減係数 λ の値は基本型の場合 0.6、消波型の場合 0.8 が適当である。

3) 曲り斜面壁の部材計算に用いる設計波力は、上・下段曲り斜面壁に $0.75 w_0 H_{max}$ 、中段曲り斜面壁に $0.5 w_0 H_{max}$ の強度の等分布波力が作用すると考えて算定してよい。また、消波型の前面スリット壁支柱材に働く波力は上・下段とも $0.75 w_0 H_{max}$ 程度と考えれば十分である。ここに、 w_0 は海水の単位体積重量、 H_{max} は設計計算に用いる最高波高である。

* 水工部 防波堤研究室長
** 水工部 主任研究官(水理計測担当)
*** 水工部 防波堤研究室

A Hydraulic Experimental Study on Multi-celler Caisson Breakwaters

Katsutoshi TANIMOTO*

Suketo HARANAKA**

Eiji TOMIDA***

Tsutomu MURANAGA***

Satoshi SUZUMURA***

Synopsis

A new type of caisson with a high stability against violent wave attacks has been developed and is called as a multi-celler caisson in the present paper. This caisson consists of triple-layered slopes with the rear end bended upwardly. The spaces formed between each slopes are opened at the both ends of the vertical front and the horizontal top of caisson.

A series of model experiments has been conducted to investigate the following hydraulic aspects of the multi-celler caisson:

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

The transmitted waves over the multi-celler caisson are rather high comparing with the conventional ordinary caisson, but those can be reduced by introducing a slit wall with an appropriate opening ratio at the vertical front. This type of multi-celler caisson with a slit front wall can alleviate wave reflection as well as the caisson breakwaters covered with wave dissipating concrete blocks.

As to wave forces on the multi-celler caisson, it is confirmed that the resultant wave forces effective against sliding and overturning of the caisson are considerably small comparing with those on the ordinary caisson, since the wave force acting on the slopes has the downward component which works for the increase of resisting force. In this paper, the design wave force formulae are proposed for the stability examination of the multi-celler caisson and the strength calculation of the structural members. According to these formulae, an example of trial design for the stability of the multi-celler caisson is presented and compared with the ordinary caisson.

The example demonstrates that the multi-celler caisson requires less volume of concrete caisson as well as rubble mound, suggesting the possibility of cost reduction for outer-sea breakwaters.

* Chief of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division

** Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division

*** Members of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division

目 次

要 旨	41
1. ま え が き	45
2. 実験の種類及び実験水路	45
2.1 実験の種類	45
2.2 実験水路	45
2.3 マルチセルラーケーソン構造諸元の記号	46
3. 反射及び伝達率	48
3.1 模型及び実験の方法	48
3.2 反射及び伝達率の測定結果	49
4. 全波力及び滑動安定性	51
4.1 実験の方法	51
4.2 全波力測定結果	54
4.3 安定性の検討に用いる設計波力	56
4.4 滑動安定性	57
5. 部 材 波 力	59
5.1 模型及び実験の方法	59
5.2 各部材に働く波力	62
5.3 部材の設計に用いる波力	68
6. 比較設計例	69
7. ま と め	72
8. あとがき	73
参 考 文 献	73
主要記号表	74

1. まえがき

わが国における防波堤の代表的構造様式はケーソン式混成堤であるが、この構造には反射率が大きであるとか、条件によっては強大な波力が作用するといった短所があり、比較的水深の浅い所ではこれに代ってしばしば消波ブロック被覆堤が採用されている。

一方、近年においては外海の大水深域での防波堤建設の要請が高まりつつあるが、このような大水深域では碎波による波高の減衰がないため設計波高が一段と大きくなり、従来の構造をそのまま適用すると非常に大断面のものとなって、建設には膨大な工費を要する。そのため、比較的小断面であって厳しい波浪条件に耐えうる新しい防波堤構造の開発が期待されるようになった。このような要請に呼応して提案されたのが、マルチセルラーケーソンである。

このマルチセルラーケーソンは 図-1 にそのスケッチを示しているように、ケーソン上部に上・中・下段の曲り斜面壁を設け、これらの曲り斜面壁の間の中空部がケーソンの前面および後半部の天端面に開口しているとこ

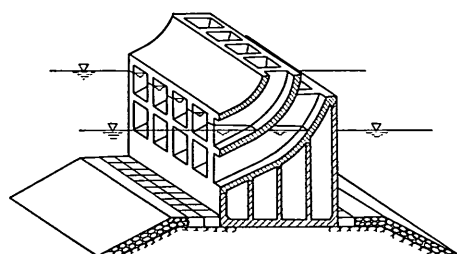


図-1 マルチセルラーケーソン堤（基本型）のスケッチ

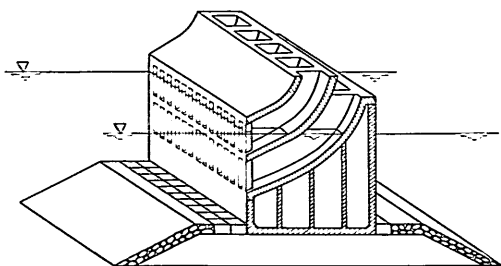


図-2 マルチセルラーケーソン堤（消波型）のスケッチ

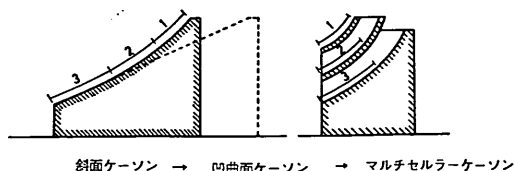


図-3 マルチセルラーケーソンのアイデアへの経緯

ろに特徴を有するもので、これを基本型と称し、図-2 に示しているように前面開口部にスリット壁等の透過壁を設けたものを消波型と称する。

本構造へのアイデアの経緯が 図-3 に説明してあるが、その発端は斜面ケーソンにある。すなわち、斜面ケーソンは、斜面壁に働く波力の鉛直成分がケーソンを下方に押しつける役割を果すため、滑動等に対する安定性が極めて高い構造として知られていた¹⁾。しかし、単純な斜面ケーソンでは相当に天端高を高くしないと、越波が多くて港内の静穏度を確保できず、緩傾斜のままでは十分な天端を確保するためには結局ケーソン幅が広がってしまう。そこで斜面壁の後部を上方に曲げ上げ、のちにそれを数個に分割し鉛直に積み重ねたものである。

本報告は、このような経緯で提案されたマルチセルラーケーソンについて、これまで実施してきた水理模型実験の結果をとりまとめその水理特性を明らかにするとともに、安定性の検討および部材計算に用いる設計波力の算定法を提案するものである。

2. 実験の種類及び実験水路

2.1 実験の種類

本研究において実施した実験は以下のとおりである。

- 1) 反射率及び伝達率に関する実験
- 2) ケーソン全体に働く波力に関する実験
- 3) 滑動安定性に関する実験
- 4) 部材に働く波力に関する実験

このうち 1)~3) は不規則波仮設水路にて、4) は不規則波仮設水路と 105m 大型造波水路の双方にて実施した。ただし、1), 3) は不規則波を用いて、2), 4) は規則波により実験を行った。

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 (30m×20m×1m) の一部を幅 5m に仕切った仮設水路であり、図-4 に示してある

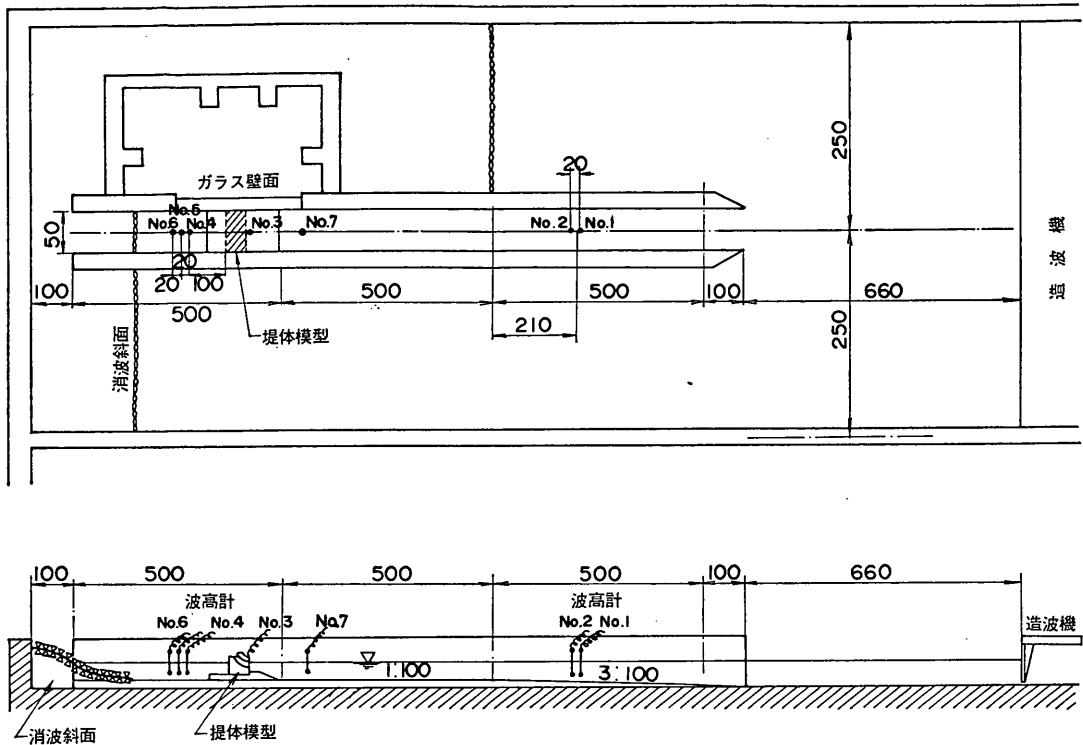


図-4 不規則波仮設水路 (単位: cm)

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、入力信号に追従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、外水路幅ほぼ一杯の 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の影響を軽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 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り、斜面勾配は 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 に示すように水路床は造波

板中立位置から 25 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 0.8 m と 2.05 m の水路に 2 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、最高波高 80 cm 程度までの規則波を造波することができる。

2.3 マルチセルラーケーソン構造諸元の記号

個々の実験について述べる前に、本実験で対象としたマルチセルラーケーソン堤の形状と本報告で共通して用いる諸元の記号を説明しておく。

図-6 に本実験で対象としたマルチセルラーケーソン堤の一般的形状と諸元の記号を示す。ここに、曲り斜面壁は海側前半部を直線、後半部を曲線とし、曲線部は曲率中心を O とする円弧である。ただし、曲率中心 O はケーソン海側面の延長上にとっており、各段に対して共通である。また、鉛直下方から θ の角度をなす中心 O

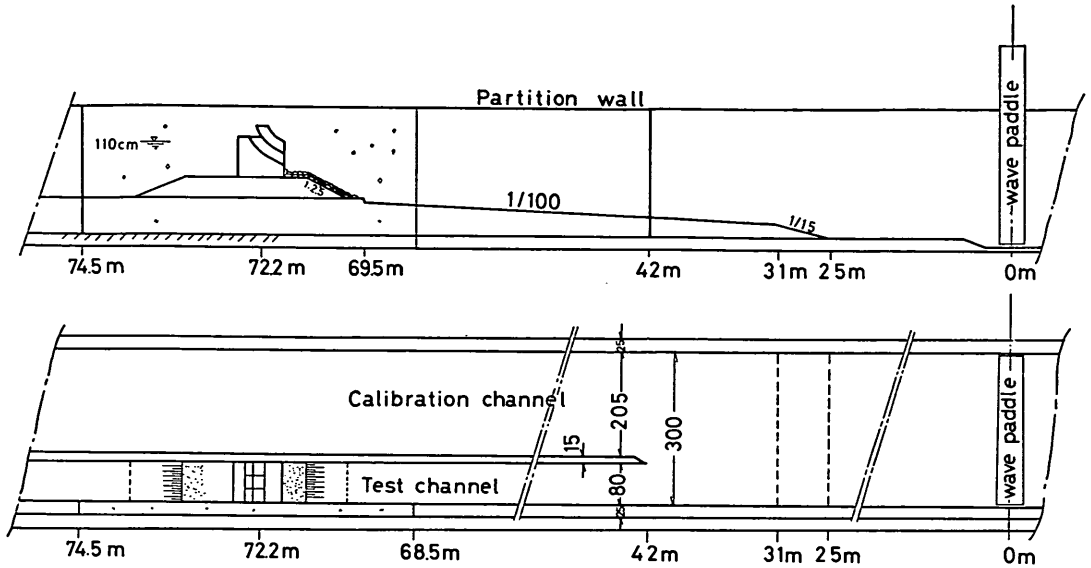


図-5 105 m 大型造波水路

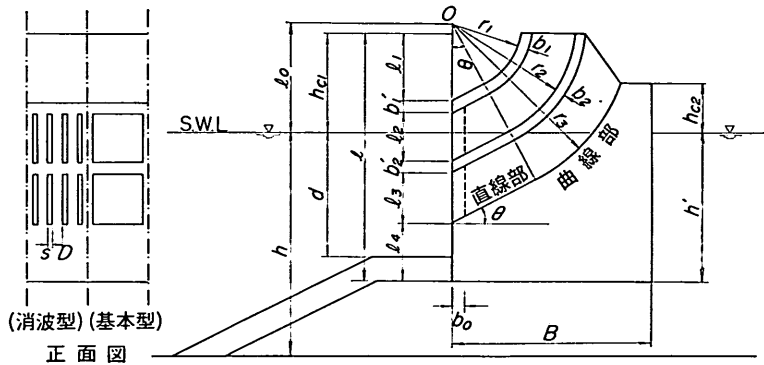


図-6 マルチセルラーケーソンの構造諸元

を通る直線と、円弧の交点で接するように直線部を設けている。したがって直線部と水平面のなす角度も θ となる。曲率の中心は上段曲り斜面壁天端よりやや上方にとり、上段および中段曲り斜面壁の天端は同じ高さである。ただし、下段曲り斜面壁の天端はそれよりやや低いのを原則としている。図中に示した記号のうち主要なものについて以下に説明しておく。

- h : 水深
- h' : ケーソン基面水深
- d : マウンド被覆工天端高

- l : ケーソン底面から、上段曲り斜面壁天端までのケーソン全高
- h_{c1} : 上・中段曲り斜面壁の静水面上の天端高
- h_{c2} : 下段曲り斜面壁の静水面上の天端高
- r_1, r_2, r_3 : 上, 中, 下段曲り斜面壁曲線部上面の曲率半径
- b_0, b_1, b_2 : 縦スリット支柱材及び上, 中段曲り斜面壁の厚み
- D : 消波型の場合のスリット支柱材の幅
- s : 消波型の場合のスリット間げきの幅

また、消波型の前面スリット壁の開口比 ϵ は次式のように定義する。

$$\epsilon = \frac{s}{D+s} \quad (1)$$

3. 反射及び伝達率

3.1 模型および実験の方法

(1) 模型

反射および伝達波に関する実験に用いた模型を図-7に示す。このマルチセルラー模型の曲り斜面壁部および側面はアクリル合成樹脂板で製作しており、それをコンクリートで製作した L 形状の底版と背面でボルト結合し、一体化してある。消波型の縦スリット支柱材の幅 D は、2 cm、開口幅 s は 1 cm とし、開口比 ϵ は 1/3 である。図中記号で示してある値のうち、 $h=45$ cm、 $d=25$ cm、 $h'=30$ cm、 $l_0=22$ cm、 $h_{o1}=20$ cm は一定である。 h_{o2} は 10 cm を標準とし、そのほか伝達波実験では 15、20 cm と変化させた。

マウンドは碎石を詰めた適当な厚さのかごを製作し、それを積み重ねて所定の形状とした。これはマウンドに透水性をもたせるとともに、波の作用による散乱を防ぎ、かつマウンドの高さを変える必要のあるときには容易に対応できるようにしたものである。

(2) 反射率および伝達率の測定法

本実験での不規則波の反射率の算定は合田ほか²⁾の方法による入・反射波の分離推定法による。これは近接

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て、各成分波に対して入・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。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 とし式 (2) により定義する。

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

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 (2) のエネルギーの計算は有効周波数域についてのみ行う。

本実験においては、分離計算のための波形の測定は前出の図-4 中に示した測点 No. 1、No. 2 での 2 台の容量式波高計によった。この地点は 3/100 勾配水路床のほぼ中央にあたり、その平均水深は 54.5 cm である。

不規則造波機を駆動する入力信号は同一の目標スペクトルに対し 4 種類作成し、増幅度を変化させることにより波高を変化させている。したがって増幅度が同一であっても、造波された波の有義波高は各波種に対して若干のばらつきを見せる。

なお伝達波測定の際には、水路壁と堤体模型との間の透き間から波が透過するのを防ぐため、ベニヤ板をはさんで間詰めを行った。

(3) 実験条件

反射・伝達波実験では、入射波として Bretshneider・光易型のスペクトルを目標スペクトルとする不規則波群を用いた。解析においては非正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。

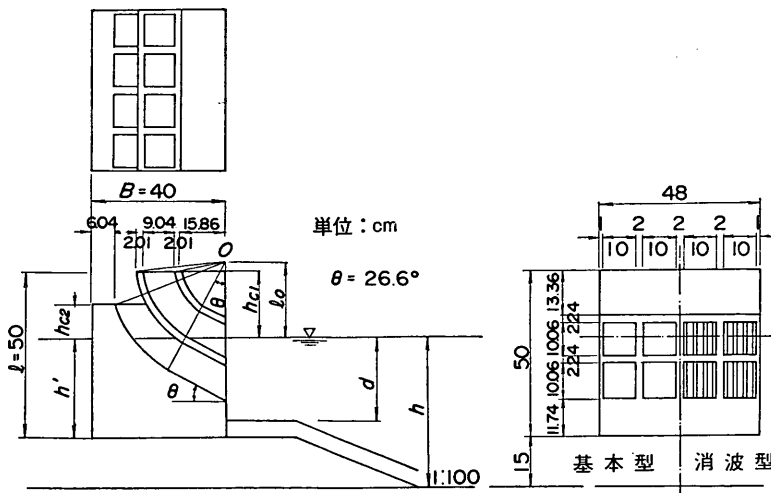


図-7 マルチセルラーケーソン堤の小型模型

実験に先立って堤体模型を設置する以前の波を2回測定し、堤体前面位置での波高計（前出 図-4 の No. 3）による有義波高の平均を、伝達波実験における入射波高として結果を整理した。また周期は実験時の測点 No. 1, No. 2 における合成波の周期を平均してそのまま用いた。

ここでの実験は次の二つに大別される。

- 1) 入射波の周期による反射率の変化を調べる実験
- 2) 入射波高及びケーソンの構造（スリットの有無及び下段曲り斜面壁の天端高）の違いによる反射率および伝達率の変化を調べる実験

このうち 1) は消波型 ($h_{cs}=10\text{cm}$) のみについて実施したもので、周期は 0.72 秒から 2.45 秒まで変化させている。また、実験波の波形勾配 H/L は 0.030~0.048 の範囲にある。開口比 ϵ は、前述したように 1/3 で一定としている。通常スリット式の消波ケーソンでは反射率を最小にする開口比は 1/5~1/4 とかなり小さいことが知られている⁴⁾。これはスリット壁でのエネルギー消費を高めるためにはスリットを通過する流速が大きくなるよう、透過壁の前後である程度大きな水位差をつける必要がある、そのためスリット部の開口比を相当小さくしなければならないことによる。これに対し、マルチセルラーケーソンの場合には、斜面上をそ上した水塊が流れ

落ちる流速はもともと相当大きいいため、スリット部の開口比を通常のスリットケーソンよりやや大きくしたわけである。

一方 2) は実験波の周期を一定とし、波高のみを変化させた実験を各構造形式に対して行ったものであり、伝達率の測定に重点を置いたものである。実験の有義波周期は 2.5s の 1 種で、有義波高を 15cm から 28cm まで種々に変化させた。入射波の波形勾配 H/L は 0.030~0.056 の範囲である。

3.2 反射及び伝達率の測定結果

図-8 に消波型の反射率の周期による変化を示す。図中 B_0 はケーソン前面壁と下段曲り斜面壁天端との間の水平距離を表わしており、 L は入射波の有義波波長である。本実験における開口率 ϵ は 1/3 の一種類のみでありこれが最適な条件であるかどうかは不明であるが、結果的には十分な消波効果があることが認められる。ここで、図中 $B_0/L=0.10$ 付近の点は伝達波と同時に測定した反射率の結果の一部をプロットしたものである。

反射率は明らかに特定の周期で極小値を持つことが見てとれるが、これは直立消波ケーソン一般について言える。たとえば、これまでに実施してきた他の直立消波ケーソン（直立多孔ケーソン、曲面スリットケーソン、直立縦スリットケーソン）の反射実験の結果では、反射率

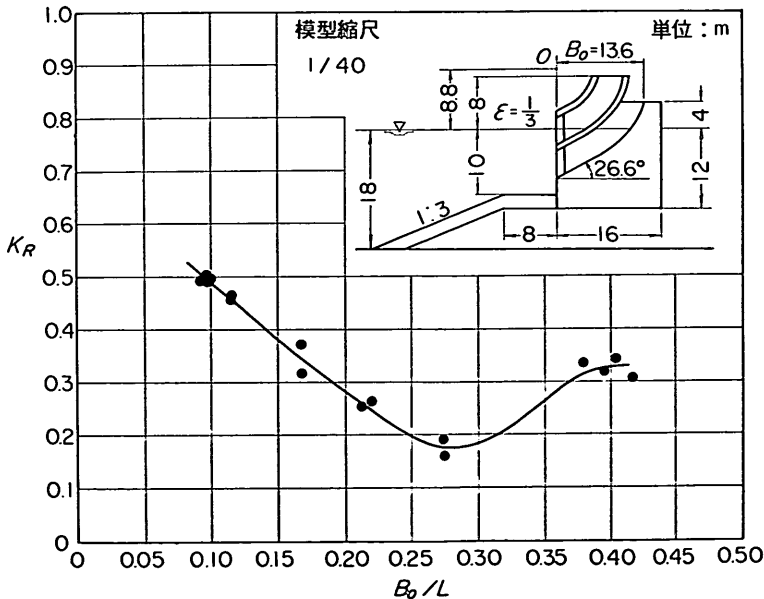


図-8 入射波周期による反射率の変化

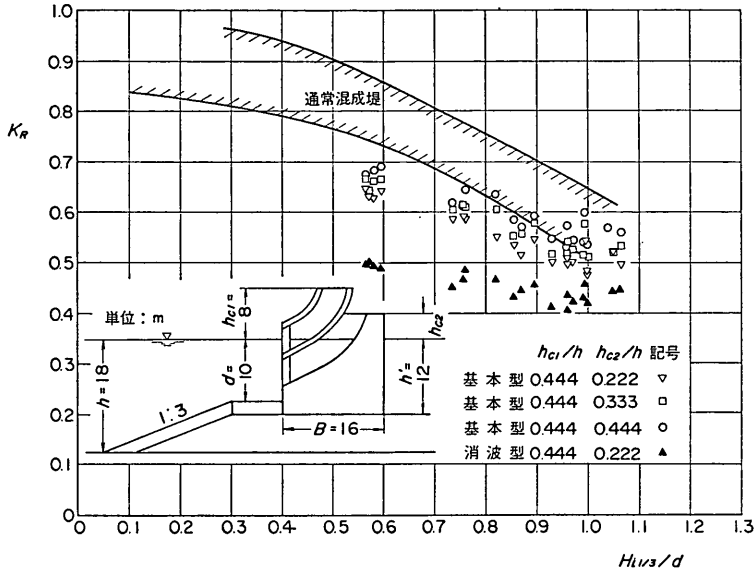


図-9 入射波高による反射率の変化 ($B_0/L=0.1$)

は $B_0/L \approx 0.15$ 程度で極小となっている³⁾。ただし、この場合の B_0 は透過壁厚を含めた遊水幅である。マルチセルケーソンの場合には、反射率が極小となる B_0/L は約 0.28 であるが、この値の違いは B_0 の定義の違いによるものであり、本質的な意味はない。消波型マルチセルケーソンの反射率の極小値は約 0.2 であり、消波ブロック被覆堤や曲面スリットケーソンの場合とほぼ等しく、通常の多孔ケーソンや縦スリットケーソンの場合より若干小さい。消波型がこのように良好な消波性能を有する理由は、先にも述べたようにスリット壁を通過する水粒子速度が通常の縦スリットケーソンなどと比べて相当大きな値となるためと推測される。

図-9 は、伝達波と同時に測定した $B_0/L \approx 0.1$ の波に対する反射率の波高に対する変化を示したものである。図中、斜線で示した領域は種々の条件で実施した通常の混成堤の反射率の範囲を表わしている。この周期の条件では基本型の反射率は通常混成堤と大差ないが、消波型の場合には反射が相当軽減され、波高の変化に対する反射率の変化も小さいことが認められる。

次に、伝達率の測定結果を図-10 に示す。縦軸の K_T は有義波高の伝達率であり、横軸には入射波の有義波高に対する相対天端高 $h_{c1}/H_{i1/8}$ をとって示してある。ここに、 h_{c1} は上段曲り斜面壁の静水面上の天端高である。基本型の場合、 $h_{c2} = 0.5h_{c1}$ の条件では伝達率は図中

破線で示してある通常ケーソンの伝達率の (1.5~2.0) 倍となる。 $h_{c2} = h_{c1}$ とすることにより伝達率はやや低下するが、それでも通常ケーソンよりやや高い。しかし、消波型の場合には $h_{c2} = 0.5h_{c1}$ であっても通常ケーソンの伝達率と同程度になる。ただし、 $h_{c1}/H_{i1/8}$ が 0.75 以上の範囲での結果である。基本型の場合に伝達波が大きいのは当初から予想されていたことであるが、消波型とすることにより、その短所を十分補うことができる。

基本型と消波型の伝達率がこのように異なるのは両者で越波の状況が異なることによるが、比較的越波の大きい場合についてこれを比較してみると、次のように言える。すなわち、基本型の場合には、水塊は各段の曲り斜面壁上をほぼ同位相で駆け上がり、上段および中段上の水塊の先端が天端に達する時点では、下段上の水塊はすでにその天端より斜め後方へ飛び出している。それよりやや遅れて、中段の水塊がほぼ真上に吹き上がり、上段を越波してきた水塊に衝突する。それらの水塊は上方へ舞い上がった後、激しいしぶきとともに下段曲り斜面壁背後の天端や港内側水域に落下する。引き波時にはそれと逆に上段ほど早く水塊が流れ戻される。どの部分からの越波量が最も大きいかは入射波の波高及び周期により異なり、定量的に測定をしているわけではないが、 $h_{c2} = 10.0 \text{ cm}$ の場合には下段からの越波量と上、中段からの越波量は大差ないように思われる。いずれにせよ越波

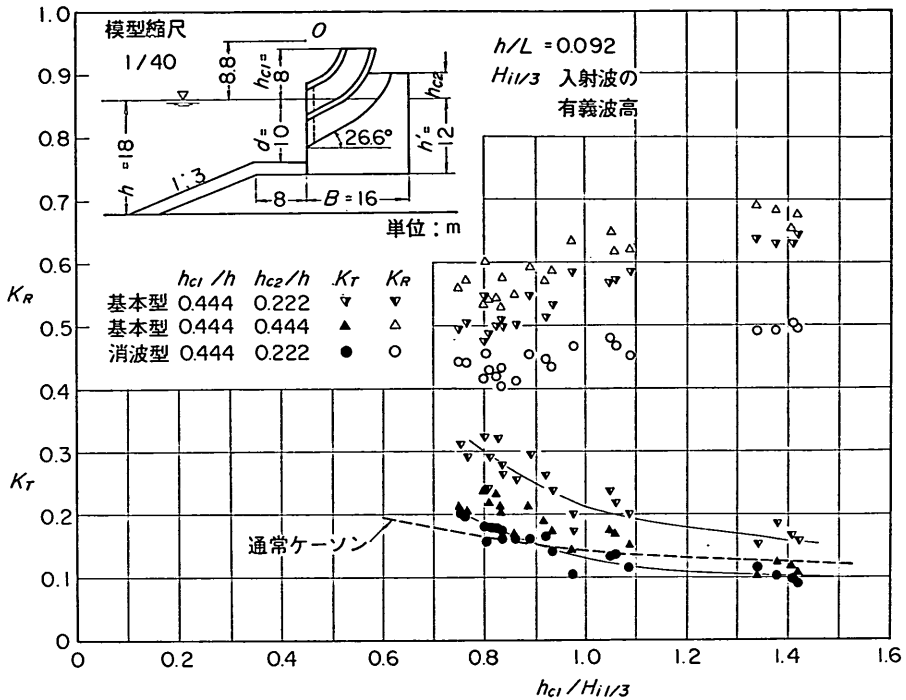


図-10 相対天端高による伝達率の変化

した水塊は斜面壁天端からあふれ出るというよりは、上方に吹き上げられた水塊が堤体を跳び越えてゆくわけであるから、下段斜面の天端を高くしても伝達率をさほど下げることができない。

一方、消波型の場合には、スリット壁の影響で上段に比べて中・下段の波面上昇が遅れ、著しい気泡の混入と共に水粒子速度も担当減勢されていると考えられる。そのため、この場合には上段からの越波が相対的に多い。また、越波時の水塊の挙動も全く異なり、基本型の場合と異なり、水塊が上方に吹き上げられることなく波面が堤体を乗り越えてゆく様相を呈する。この際、上段から越波した水塊が中・下段の天端開口部におおいかぶさり、中・下段の水塊を上から押さえつけるような挙動も見受けられる。水塊の吹き上げ高やしぶきの散乱も、基本型に比してかなり小さい。このように、基本型と消波型で越波の状況は異なるけれど、上段を越波する水の量は両者で大差ないと考えられることから、消波型の場合には基本型に比して中・下段からの分だけ越波が軽減されると考えて良いであろう。

いずれにせよ、基本型の越波を軽減するためには、

h_{c2} を h_{c1} より低い範囲で高くしても効果に限度があり、消波型にする方がより有効な手段であると言える。

図-10 の実験結果から、伝達率を 20% 程度とするのに必要な天端高さは、混成堤が約 $0.6H_{1/3}$ であるのに対して、マルチセルラーケーソンでは、基本型の場合には約 $1.0H_{1/3}$ 、消波型では約 $0.75H_{1/3}$ である。しかしながらマルチセルラーケーソンの天端高は、伝達率のみならず形状のバランスからの制約も受けることになる。それらの点も考慮して、マルチセルラーケーソンの天端高は、基本型・消波型ともに標準的には $h_{c1}=1.0H_{1/3}$ とするのがよいであろう。

4. 全波力及び滑動安定性

4.1 実験の方法

(1) 全波力実験の方法

ケーソン全体の安定性の検討に用いる波力は、各部位に働く波力がわかっていれば、それらの同時性を考慮した合波力を考えればよい。しかし、ケーソン構造が複雑で、これらを精密に評価することは困難なため、部材波力とは別に全波力測定実験を行って検討した。

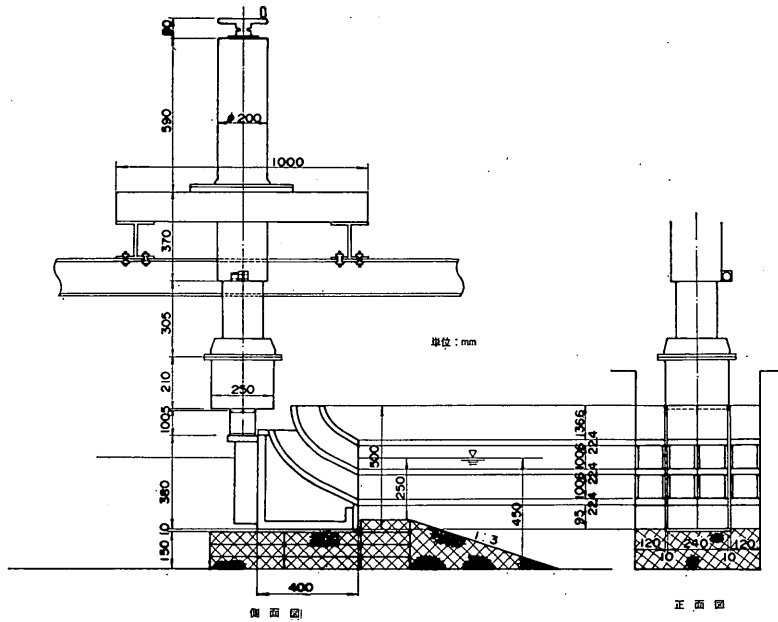


図-11 全波力測定実験 (基本型 $h=45$ cm の例)

全波力実験は、不規則波仮設水路において規則波により行い、その測定には六分力検出器を用いた。この検出器は、その内部に複雑に組み合わされたストレインゲージ群を有するもので、この検出器に模型を剛結することにより、模型に作用する力の6成分を同時にしかも独立に検出することができる。ただし、ここで行うのは断面実験であるから、断面内の水平力、鉛直力、回転モーメントの3成分についてのみ記録した。

この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ため、図-11のように堤体模型の背後に取り付け部材を介して上方から固定する。六分力検出器は架台に固定した専用の昇降装置に剛結し、ケーソン模型を付けたまま上下に移動できる。本実験では、金網枠に詰めた捨石マウンド底面との間に1cm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。マウンドは、反射・伝達波実験に用いたものと同一で、碎石を詰めたかごを積み重ねることにより、水深の変化に応じてマウンド高を容易に変化させることができる。

本実験で用いたケーソンの模型は、すべてアクリル合成樹脂板で製作したもので、形状は反射・伝達波実験に用いたものと同じであるが、センサーの許容定格の関係で水路幅方向に3つに分けてあり、中央24cmの部分のみ検出器を取り付け、その両側にダミーとして幅12

cmの模型を配した。

六分力検出器の定格は、水平力 $F_H=50$ kgf、鉛直力 $F_V=75$ kgf、回転モーメント $M_0=20$ kgf-mである。ただし、 M_0 は検出器のモーメント中心Oのまわりのモーメントとして出力されるため、ケーソン後趾端まわりの転倒モーメント M を求めるためには、次式により補正する必要がある。

$$M = M_0 + F_H z_0 - F_V x_0 \quad (3)$$

ここに、 x_0 および z_0 はモーメント中心Oと底面後趾との間の水平および鉛直距離であり、六分力検出器のモーメント中心はセンサー下面中央から40cm下方にあたるため、本条件では $x_0=6$ cm、 $z_0=8$ cmである。ただし、水平波力 F_H はケーソンを背後に押す方向、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 は後趾のまわりに後方に倒す方向をそれぞれ正とする。

全波力実験の水深 h は、35、45、55cmの3種であり、周期 T は1.54、2.00、2.50、3.00sの4種とした。また、それぞれに対して波高は、非碎波から碎波後の波までの範囲で5~8種類に変化させた。波高の測定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へ半波長の間の6点で同時に測定を行い、水路端からの反射波の影響を補正して入射波高とした。さらに、ケ

ーソン設置予定位置より沖側で碎波する波に対しては、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、上述の測点内での最高波高を入射波高とした。ただし、この場合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して補正した値を用いている。

本実験では、水深 h の変化に対応してマウンドの高さを調整し、マウンド被覆工天端上の水深 d が 25 cm と一定であって、静水面は常に前面開口部上段の中心付近となるようにした。つまり水深の変化は波力に及ぼすマウンド高さの影響を表わすものであり、潮位変化に対する全波力実験は行っていない。

(2) 滑動実験の方法

滑動実験は不規則波仮設水路にて行った。実験は不規則により、消波型に対してのみ実施して、基本型については行っていない。ケーソン模型は、反射・伝達波実験に用いたものと同じ小型模型で、下段曲り斜面壁の下側に鉛塊を詰めることにより堤体重を変化させる。本実験では、水路幅方向単位長さあたりのケーソン模型水中重量 W を、735 gf/cm から 2944 gf/cm まで 8 種類に変化させた。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 であり、マウンド前肩幅は 20 cm、法勾配は 1:3 である。ケーソンとの滑面となるマウンド上面は碎石をセメントで固めた剛マウンドとした。実験の前後に行った摩擦係数 μ の検定試験結果では $\mu=0.55\sim 0.65$ である。

実験波は Bretshneider・光易型を目標スペクトルとした不規則波群であり、伝達波実験に用いたものと同じである。波高は入力に際して基準電圧を変えることにより変化させた。前出の 図-4 に示した測点 No. 1, No. 2 (平均水深 56.5 cm) および堤体設置予定位置より 135 cm 沖側の測点 No. 7 (水深 45.9 cm) での通過波測定

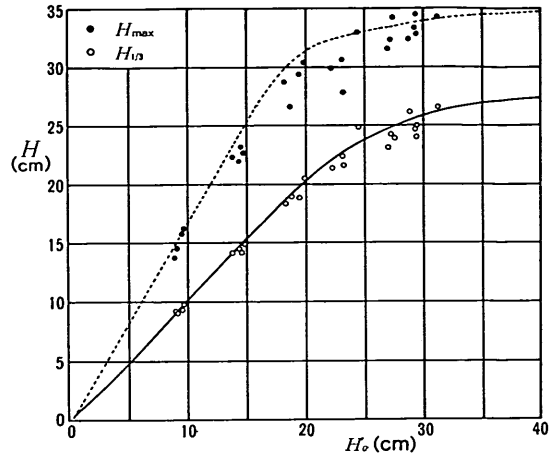


図-12 測定 No. 7 における有義波高と最高波高

から求めた有義波周期 (平均値±標準偏差) は $T_{1/3}=2.45\pm 0.09$ (s) であった。

波高は 5 種類に変化させており、図-12 に約 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 H_0' に対して示している。ここに、 H_{max} 、 $H_{1/3}$ は No. 7 の測点における値であり、 H_0' は No. 1 と No. 2 の有義波高の平均値から合田³⁾の碎波変形理論より沖波の値を推定したものである。これは一様勾配の場合には実用上十分な精度で波高変化が推定できる手法であることが知られており、計算に用いた海底勾配は 3/100 である。一方、この H_0' から海底勾配を 1/100 として逆に測点 No. 7 での有義波高および最高波高を推定したのがそれぞれ図中の実線および破線である。ここでの最高波高は 120 波の波群中の最高波の期待値であり、1/80 最大波高に相当する。現実の水路は 3/100 から 1/100 への変勾配水路であるが、推定値は単一勾配として求めて

表-1 不規則実験波の諸元

$T_{1/3}$ (s)	測定値				推定値	
	H_0' (cm)	$H_{1/3}$ (cm)	H_{max} (cm)	$H_{max}/H_{1/3}$	$H_{1/3}$ (cm)	H_{max} (cm)
2.45	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
	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

いる。これは上記の碎波変形理論が、推定地点での水深と底面勾配のみを用いた過去の履歴を考慮しないため、変勾配としても無意味だからである。このように、本来は変勾配には適用できないモデルであるにもかかわらず測定値とかなりよく一致しているのは、勾配の変化がそれほど大きくないこと、および、測点 No. 7 が勾配変化点から十分離れた点であることによると考えられる。実験波の波高を測定値と推定値と比較したのが表-1である。測定値は各々の波高に対して4種類の波列の平均を取っている。それによれば、測定値と実験値の違いはせいぜい8%程度であるため、後述の実験結果における H_{max} にはこの推定値を用いた。ケーソンの滑動量の測定は、背面水中に取り付けられ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。

4.2 全波力測定結果

(1) 測定記録の例

図-13 に六分力検出器による測定記録の例を示す。水深 h が 45 cm、周期 T が 2.5 s の場合の出力波形を基本型と消波型を対照して示したものである。図中の実線は波高 H が 34.8 cm の場合、破線は $H=14.7$ cm の場合である。ただし、モーメント M_0 は検出器のモーメント中心 O のまわりの値であり、後趾端まわりのモーメントとするには、前述したように補正が必要となる。図中縦の線は水平力及び鉛直力がピークを示した瞬間を表わしている。マルチセルラーケーソン堤の場合、

通常の混成堤のように水平力と鉛直力が同時に正のピークを示すことはなく、水平力が最大となる時鉛直力は多くの場合負の極小値を示す。これは曲り斜面壁に働く波力の下向き成分が、ケーソン底面に上向きに働く揚圧力より卓越することを表わしており、この傾向は特に基本型の場合に著しい。一般に、各分力の正の最大値は、鉛直力が水平力に先行して現われる。本来、水位の上昇と呼応して増大するはずの揚圧力が、その最大値に達する以前に、波力の下向き成分によって相殺され減少をはじめると解される。したがって滑動安定性を論ずるには、鉛直力が上向き最大となる瞬間と、水平力が最大となる瞬間の双方を考慮すれば十分であると言えよう。

$H=34.8$ cm の例にみられるように、波力のピークに引き続いて高周波の振動が現われることがある。これは比較的波高が高く波力波形が急峻な場合に顕著に認められることから、堤体模型に衝撃的な波力が作用した結果、測定系の固有振動が生じているものとみなされる。換言すれば、衝撃波力が作用する時の波形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があるわけであるが、衝撃応答に関しては不明な点も多いため、本実験結果の整理では特に補正は行っていない。

同一条件で基本型と複合型の波力波形を比較すると、波高が小さい場合には、各分力について最大値、波形ともに有意な差異は認められない。一方、波高が大きく衝撃的な波力が作用する場合には、基本型の方が水平、鉛

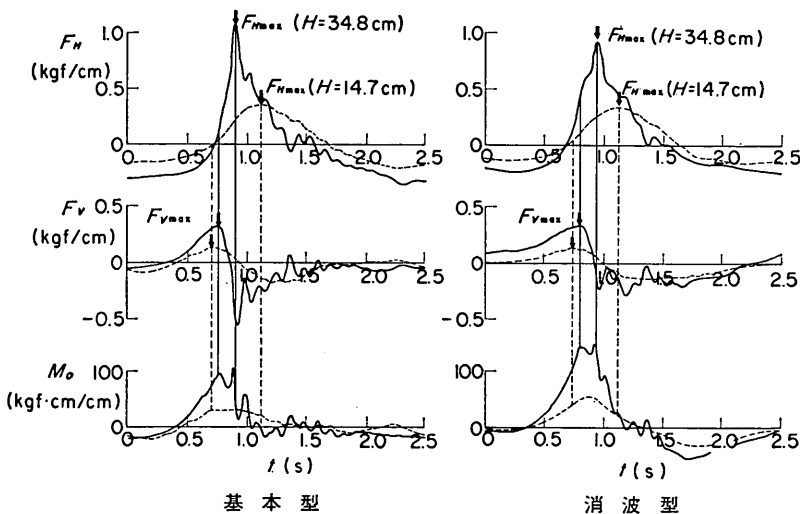


図-13 六分力検出器による記録の例 ($h=45.0$ cm, $T=2.0$ s)

直波力波形ともに、より鋭い立ち上がりを見せている。これは、消波型の場合にはスリット壁の消波効果により作用波が減勢されるためであり、目視観察によってもそれがはっきり認められる。

(2) 水平波力の最大値

図-14 に六分力計の測定記録から読み取っ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示した。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 $\bar{p}_H (=F_H/l)$ で、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 $p'_v (=2F_v/B)$ で表わしてある。水平波力 F_H は $(0.25 \sim 0.75)w_0H$ の範囲に分布し、ほぼ波高に比例する傾向があること、周期が長くなると波力が若干増大することなどが容易に見てとれるが、波力の値は基本型と消波型で大差なく、また相対的なマウンド高さの変化 (d/h の変化) に関しても系統的な差異は認められない。

一方、鉛直波力強度 p'_v に関しては、基本型と消波型

ではその分布領域がはっきりと2分されており、基本型では $(-0.75 \sim -3.0)w_0H$ の範囲に、消波型では $(-0.40 \sim 0.35)w_0H$ の範囲に分布している。また、基本型ではほぼ波高に比例した分布を示すのに対して、消波型では波高が小さいときには負の値をとるが、波高が25 cm 以上になると p'_v は急速に増大し、値はそれほどでもないが上向きの波力が働くようになる。これは波高が増大するにつれてスリット部材の影響が卓越し、斜面壁に作用する波圧が相対的に小さくなり、その鉛直分力が揚圧力を打ち消すことができなくなるためと考えられる。

(3) 鉛直波力の最大値

図-15 は、鉛直上向き波力強度 p'_v の最大値と、そのときの水平波力の値を波高に対して示したものである。 p'_v の最大値は基本型で $(0.25 \sim 0.75)w_0H$ 、消波型で $(0.50 \sim 0.85)w_0H$ であり、基本型に比べて消波型の鉛直波力の方が大きい。これは、消波型の場合にはスリッ

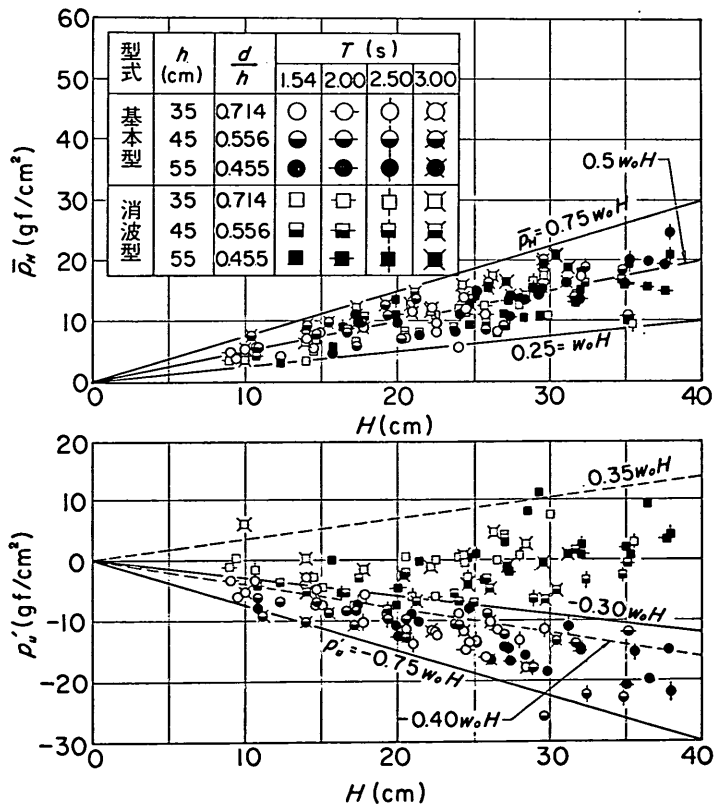


図-14 最大水平波力とそのときの鉛直波力 (六分力検出器による実験結果)

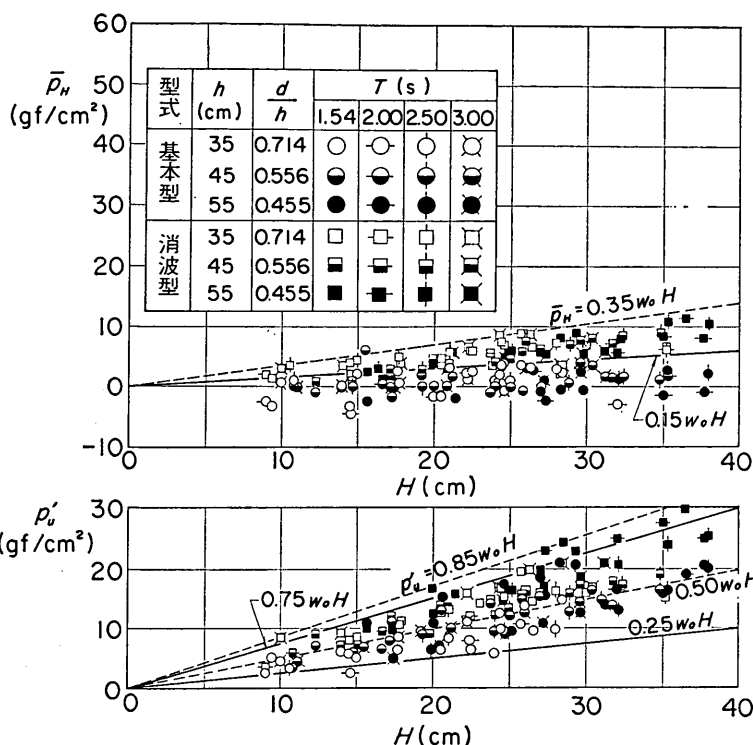


図-15 最大鉛直波力とそのときの水平波力 (六分力検出器による実験結果)

ト壁によって中空部への水塊の流入が減ぜられ、曲り斜面壁に作用する波力が小さいためであると推測される。このときの p_H は基本型で $0.5w_0H$ 以下、消波型で $0.35w_0H$ 以下と最大水平波力に比べてかなり小さい。したがって、この場合の滑动波力はさほど大きくなく、滑动に対する安定性の検討は、水平波力が最大となるときの波力に対して考えれば十分であろう。

4.3 安定性の検討に用いる設計波力

前節の実験結果をふまえて、マルチセルラーケーソン堤の安定性の検討に用いる設計波力を次のように定める。すなわち、設計波力としては図-16に示すように、ケーソン前壁面が下端から上段曲り斜面壁の天端の高さまで不透過な直立壁であるとし、これに合田式において $\alpha_2=0$ とし、かつ静水面上波圧の作用高さ、波圧強度ともに λ を乗じた波圧が働くものとする。またケーソン底面に働く揚圧力については、曲り斜面壁に働く波力の下向き成分と相殺するものとし、考慮しないものとする。すなわち、前面波圧は次のように与えればよ

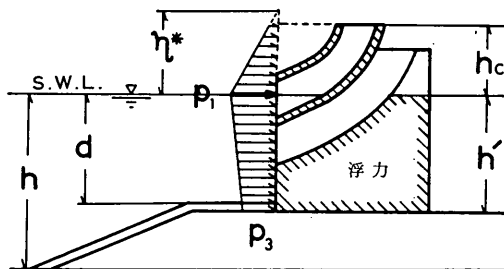


図-16 安定性の検討に用いる仮想波力分布

い。

$$\eta^* = 1.5\lambda H_{max} \quad (4)$$

$$p_1 = \alpha_1 \lambda w_0 H_{max} \quad (5)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (6)$$

ここに、

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2 \quad (7)$$

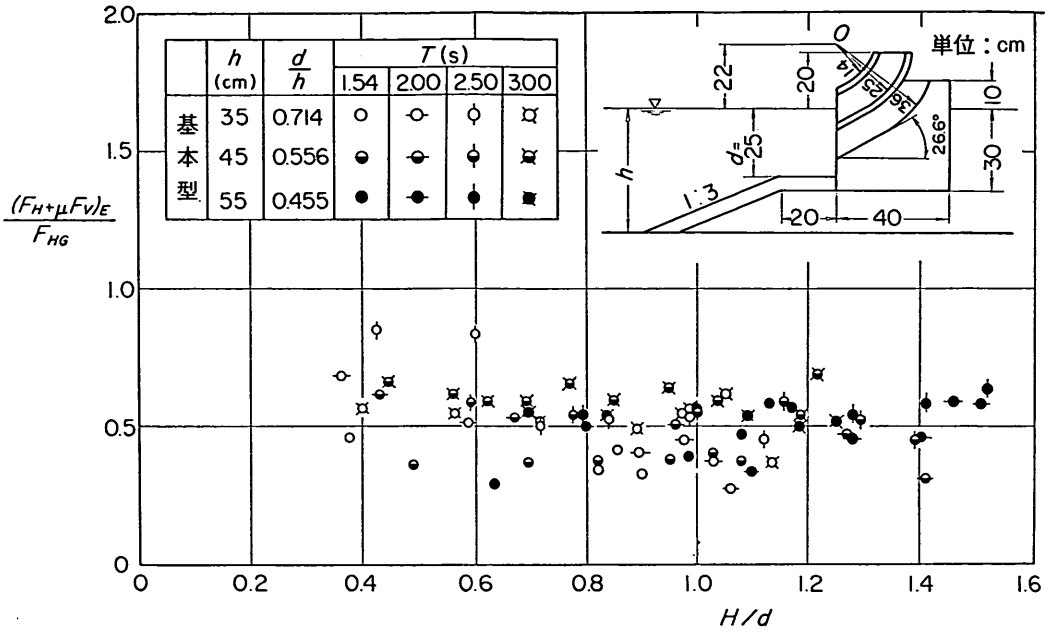


図-17 滑動合成波力の実験値と $\lambda=1.0$ としたときの計算値との比 (基本型)

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

- η^* : 静水面上波圧強度が 0 となる高さ (m)
- p_1 : 静水面での波圧強度 (tf/m²)
- p_3 : ケーソン基面での波圧強度 (tf/m²)
- ω_0 : 海水の単位体積重量 (1.03 tf/m³)
- H_{max} : 設計計算に用いる最高波高 (m)
- L : 設計計算に用いる波長 (m)
- h : ケーソン設置位置での原地盤水深 (m)
- h' : ケーソン基面水深 (m)
- λ : 波圧のてい減係数

マウンド高さの影響を表わす波圧係数 α_2 を 0 とするのは、前述した実験結果においてマウンドが高くなってもそれによる波力の増大が認められないからである。本算定式において問題となるのは波圧で減係数の値をいかに与えるかということであるが、この点については滑動に対してより厳しい条件である水平波力が最大となる時の測定値より検討する。一般に限界状態においては、次の関係が成り立つ。

$$F_H = \mu(W - F_V) \quad (9)$$

ここに μ は摩擦係数、 W はケーソンの静水中重量であり、 W が $(F_H + \mu F_V)$ より大きいときには滑動しな

い。つまり $F_H + \mu F_V$ は波力の滑動に対する寄与を表わすものであり、ここでは合成滑動波力と称することにする。実験値から求めたこの合成滑動波力と、前出の波力算定式において $\lambda=1.0$ としたときの波力から算定される合成滑動波力との比を H/d に対してプロットしたものを図-17、図-18に示す。結果は、基本型で 0.27~0.85、消波型で 0.34~0.94 と広くばらついている。後趾端まわりの転倒モーメントに対しても同様に示したのが図-19および図-20である。こちらもほぼ同様のばらつきを見せ、基本型で 0.21~0.87、消波型で 0.37~0.92 の範囲に分布している。これらの比の値はそれぞれ滑動および転倒に対する波圧のてい減係数 λ の値と近似的に考えてよい。したがってこれらの上限に近い値として、基本型および消波型の場合の波圧てい減係数 λ の値を次のように与えればよいものと考えられる。

$$\text{基本型} \quad \lambda=0.6 \quad (10)$$

$$\text{消波型} \quad \lambda=0.8 \quad (11)$$

4.4 滑動安定性

前節での波圧算定式の妥当性を滑動量の面から確認するため消波型について不規則波による滑動実験を実施した。

図-21 はケーソン重量と入射波の波高を変化させたと

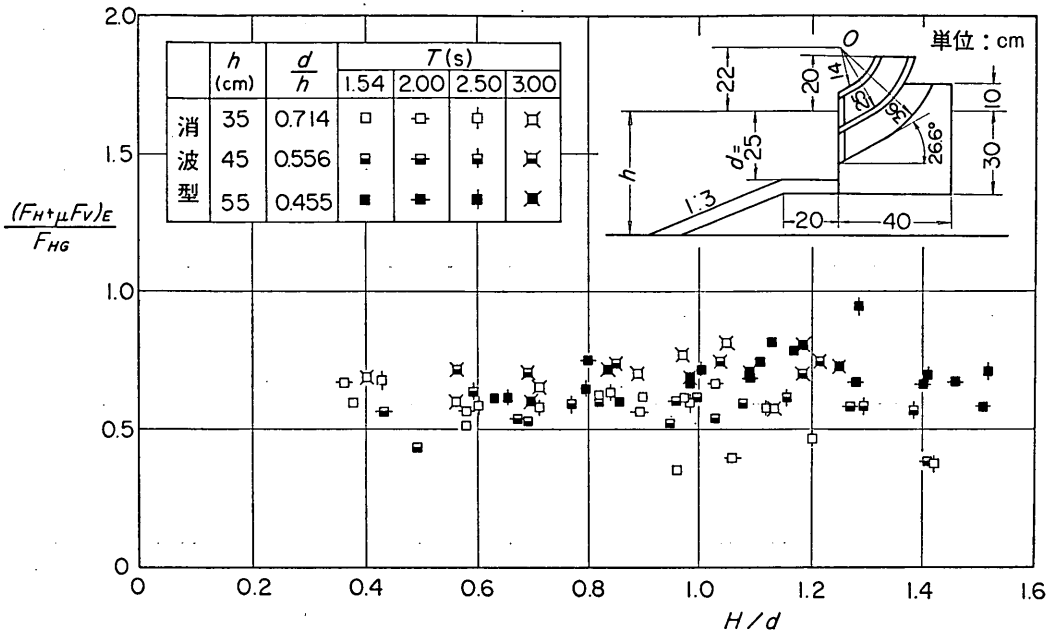


図-18 滑動合成波力の実験値と $\lambda=1.0$ としたときの計算値との比 (消波型)

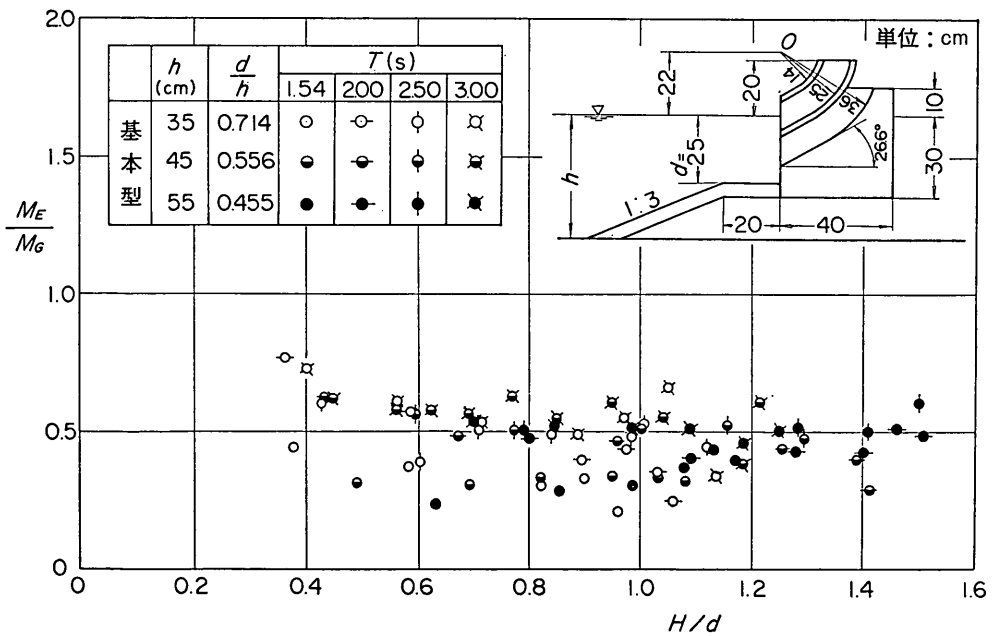


図-19 転倒に対する波力モーメントの実験値と $\lambda=1.0$ としたときの計算値との比 (基本型)

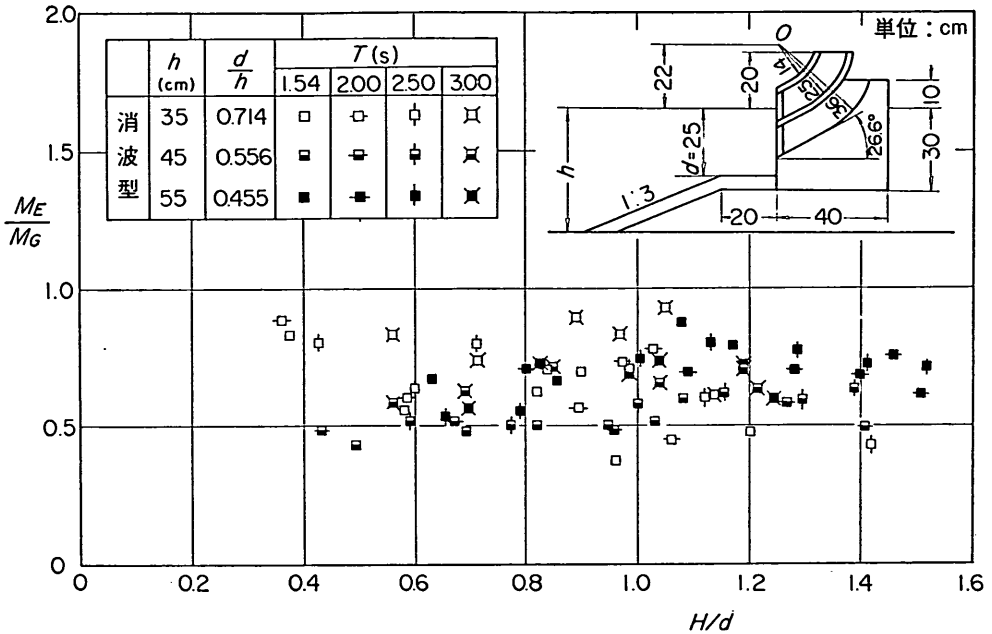


図-20 転倒に対する波力モーメントの実験値と $\lambda=1.0$ としたときの計算値との比 (消波型)

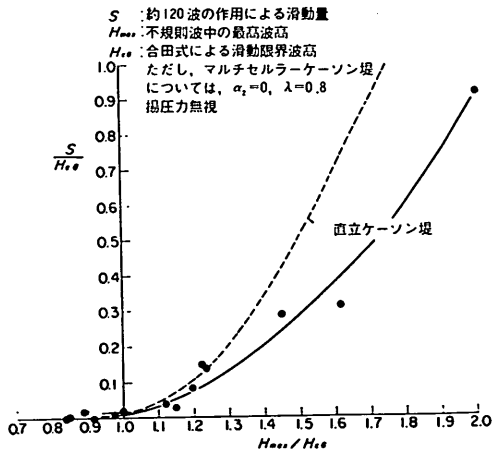


図-21 不規則波による滑動実験結果の例 (マウンド)

きの滑動量を示したものである。ここに、 S は約120波の作用による滑動量で、周期、波高のほぼ等しい4種の波列による実験値の平均値である。 H_{max} は実験波120波中の最高波高の期待値、 H_{cg} はケーソン重量に対し、前節の波力算定式により求めた滑動限界波高である。図

中の実線はこの H_{max}/H_{cg} と S/H_{cg} の平均的関係を表わしたものである。また、同図には通常ケーソンの場合の平均的な関係をあわせて破線で示してある。この場合の H_{cg} は α_2 を考慮した通常の合田式によるものである。 H_{max}/H_{cg} は計算による滑動限界波高を上回る波の作用を意味しているが、マルチセルラーケーソンの滑動量は作用波力を小さくしているにもかかわらず、通常ケーソンの滑動量と同程度かやや小さくなっている。ただし、 $H_{max}/H_{cg} \leq 1.0$ であっても若干滑動している例が認められるが、その値は $0.01H_{cg}$ 以下で通常ケーソンよりは小さい。

以上は消波型についてのみの実験であり、条件も限られた範囲のものであるが、これらの結果からも4.2で述べた設計波力の算定法を用いてマルチセルラーケーソンの安定性の検討を行えば、滑動に関する限り通常のケーソンと同程度かそれ以上の安定性が確保できると言える。

5. 部材波力

5.1 模型及び実験の方法

(1) 模型

マルチセルラーケーソンの各部材に作用する波力を評

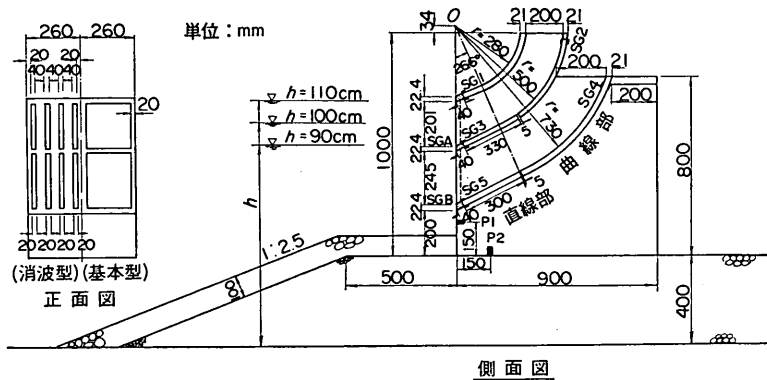


図-22 部材波力測定用大型模型

価するため、105m 大型水路を用いて規則波による実験を行った。図-22 に部材波力測定に用いた大型模型を示す。この大型模型は厚さ 12mm のステンレス鋼製の基部にアクリル合成樹脂板で製作した曲り斜面壁部を固定したものであり、消波型の場合の前面開口比 ϵ は $1/3$ である。大型模型の諸元は 3. の反射・伝達波実験に用いた模型諸元をほぼ 2 倍にしたものであるが、アクリル部材の厚さは約 20mm である。

ただし、上段曲り斜面壁の部材波力測定は、大型模型の $1/2$ の大きさをもつ小型模型により行った。これは大型模型で測定中、上段曲り斜面壁が損壊し、この部分が測定不能となったためである。小型模型の壁厚はやはり 20mm である。

(2) 部材波力の測定法

大型模型では、曲り斜面壁及びスリット部材に働く波力をストレインゲージを用いて測定した。使用したゲージは箔フェステルゲージで、ゲージ長 5mm、ゲージ抵抗 120Ω、ゲージファクター 2.10、ベース長 10mm、幅 3.7mm のものである。図-22 中の $SG_1, SG_2 \dots$ 等がストレインゲージの貼付位置を示している。これらのセンサーを動ひずみ測定器に接続し、データレコーダに記録した。波力測定用の部材は隔壁との間に 1mm 程度の透き間を設けてすべて一端固定の片持ちばりとし、固定端付近の両縁にストレインゲージを貼り付けた。ただし、中段及び下段曲り斜面壁は途中で切り離して向い合った 2 本の片持ちばりとしているのに対して、上段曲り斜面壁の場合には一体のままとしている。この各測定部材について、2ゲージ法でひずみを測定し、固定端での曲げモーメントを求め、部材波力の波圧強度を算出するわけであるが、その際、各部材に働く波圧は等分布であ

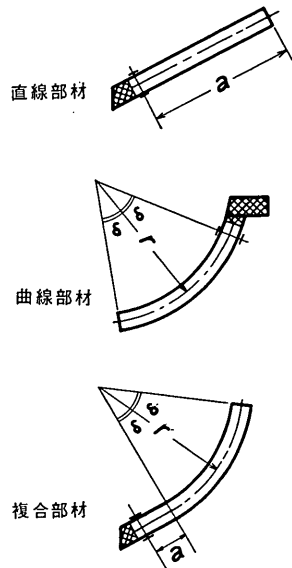


図-23 波力測定用曲り斜面壁部材

ると仮定する。曲り斜面壁部材は 図-23 に示すように、直線部材、円弧部材、およびそれらを複合したものの 3 種類であり、それぞれについて測定されたひずみ ϵ と求めるべき等分布波力強度 p の関係は以下のようになる。

$$\text{直線部材: } p = \frac{b^2 E}{3a^2} \epsilon \quad (12)$$

$$\text{曲線部材: } p = \frac{Eb^2}{12r^2 \sin^2 \delta} \epsilon \quad (13)$$

$$\text{複合部材: } p = \frac{Eb^2 \epsilon}{6 \{ a^2/2 + 2r \sin \delta (r \sin \delta + a \cos \delta) \}} \quad (14)$$

表-2 ひずみ測定用部材の諸元

測定部材	受圧面長 l (cm)	曲線部の 曲率半径 r (cm)	作用合力の うでの長さ l_a (cm)	幅 D (cm)	厚さ b (cm)	断面二次 モーメント I (cm ⁴)	ヤング率 E (kgf/cm ²)	空中固有振動		水中固有振動		
								T_n (s)	β	T_n (s)	β	
大型 模型	上段曲り斜 面壁	36.0	29	20.0	21.8	2	14.5	5.77×10^4	0.029			
	中段曲り斜 面壁前半	32.0	51.0	14.25	21.8	2	14.5	5.85×10^4	0.021	0.318	0.062	0.418
	中段曲り斜 面壁後半	35.0	51.0	17.5	21.8	2	14.5	6.24×10^4	0.025	0.222	0.068	0.402
	下段曲り斜 面壁前半	32.0	∞	16	21.8	2	14.5	4.824×10^4	0.017	0.475	0.072	
	下段曲り斜 面壁後半	51.4	73	25.7	21.8	2	14.5	4.545×10^4	0.048	0.214	0.060	
	上段スリ ット部材	16.0	∞	8.0	4	2	2.667	2.85×10^4			0.012	0.253
	下段スリ ット部材	19.8	∞	9.9	4	2	2.667	2.52×10^4			0.012	0.244
小模 型型	上段曲り斜 面壁	18.5	15	6.62	9.8	2	6.53	4.061×10^4	0.008	0.189		

ここに、

E : ヤング率

a : ゲージ貼付位置から測った直線部の長さ

b : 部材厚

r : 曲線部の中立軸の曲率半径

δ : 曲線部の中心角の半分 (曲線部材の場合には、ゲージ貼付位置から先端までの中心角の半分となる。)

当然のことながら複合部材の式で $a=0$ とすれば曲線部材の式に、また $\delta=0^\circ$ とすれば直線部材の式に帰着する。

弾性係数 E は検定試験により求める。これは自由端および中央付近に荷重を載荷したときの、曲げひずみ ϵ と応力 σ との関係から求めるもので、 ϵ と σ の直線性は良好であったが、部材単独で行った検定と組立て後の検定では算出された弾性係数が若干異なるため、組立て後の検定試験による弾性係数を採用した。表-2 に各ひずみ測定部材の諸元と試験結果を示す。ここに l はゲージ貼付位置より先端までの部材の中心軸に沿った長さ、 l_a は部材に等分布荷重が作用した場合の合力に対し、ひずみゲージ貼付位置での曲げモーメントを同じとするうでの長さ、 T_n は部材の固有振動周期、 β は減衰比であ

る。

一方、小型模型での測定法も基本的には大型模型と同じであるが、この場合中段曲り斜面は途中で切り離さず、一体として下端で固定している。また、スリット部材の波力測定は行っていない。

なお、前出の図-22中の P_1 、 P_2 は波圧計センサーの取り付け位置を示しているが、このデータは参考にとつたもので、本報告では解析していない。

(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ておいて、水深や波の条件を変化させた。表-3 はその水理条件をまとめて示したものである。実験水深は大型模型の場合 90、100、110 cm の3種、小型模型に対しては 40、45、50 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ある。これにより d/h は 0.444~0.600 となり、通常ケーソン堤においては、衝撃砕波力の可能性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あり、周期 T は大型模型で 2.0~4.0s の範囲で5種類、小型模型では 1.54~3.00s の間で4種類選定している。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

表-3 部材波力の実験条件

模型	h	h_{01}	h_{02}	d/h	H/h	B_0/L					
						$T=1.54$	$T=2.0$	$T=2.5$	$T=3.0$	$T=3.5$	$T=4.0$
大型	90	50	30	0.444	0.222~0.756		0.139	0.104	0.084	0.071	0.061
	100	40	20	0.500	0.255~0.770		0.134	0.100	0.081	0.068	0.058
	110	30	10	0.545	0.264~0.795		0.131	0.092	0.077	0.065	0.056
小型	40	25	15	0.500	0.260~0.875	0.126	0.092	0.072	0.059		
	45	20	10	0.555	0.240~0.809	0.121	0.088	0.068	0.056		
	50	15	5	0.600	0.216~0.728	0.116	0.084	0.065	0.053		

B_0 : ケーソン前壁面と下段曲り斜面壁天端との間の水平距離

以上を選定した。なお、データ解析に用いた波数は約10波である。

5.2 各部材に働く波力

(1) 測定記録の例

マルチセルラーケーソンは形状が複雑であり、波力の

作用状況は各部材によって異なる。図-24 は消波型の場合の測定記録の例を示したものである。上から ϵ_A は上段スリット壁支柱材の曲げひずみ, ϵ_3, ϵ_4 は下段曲り斜面壁の前半および後半の曲げひずみである。ここに、曲り斜面壁のひずみは上から下へ力が働くとき正、前面スリット壁支柱材のひずみは外から内へ力が働くとき正と定義している。 p_1 は前面下部の不透過壁における波圧強度, p_2 はケーソン底面での揚圧力強度である。

以下、各部材についての波力の測定結果を示す。

(2) 上段曲り斜面壁に働く波力

前述のように上段曲り斜面壁に働く波力は大型模型では測定されてないので、ここでは小型模型による結果を示す。ここに、波力は曲り斜面壁上面に働く波圧と下面に働く波圧との差である。

図-25, 26 は基本型, 消波型の上段曲り斜面壁に働く波力の等分布強度 p を波高 H に対してプロットしたものである。図中、 $p=0.25w_0H$ 等の実線は波高と波力強度の関係をわかりやすくするために、適当な直線的関係で示したものである。この結果によると、波力強度は基本型の場合 $0.5w_0H$ 以下、消波型の場合 $0.75w_0H$ 以下の範囲で広くばらついている。消波型がやや大きい傾向にあるのは、スリット壁で中空部への流入が若干抑制され、その分だけ強く上段曲り斜面壁に作用するためと推測される。周期については長い方がやや大きい傾向が認められる。潮位(図中水深 h の変化で表わしてある)については高い方が大きいようでもあるが、ばらつきが著しくはっきりしない。

以上は1波1波による波力の平均値を示したものである。上段曲り斜面壁は他の曲り斜面壁と異なり、波が直接作用するため、条件によってはやや衝撃的な波が働くことがあるので、1波1波による波力の変動が大きい。

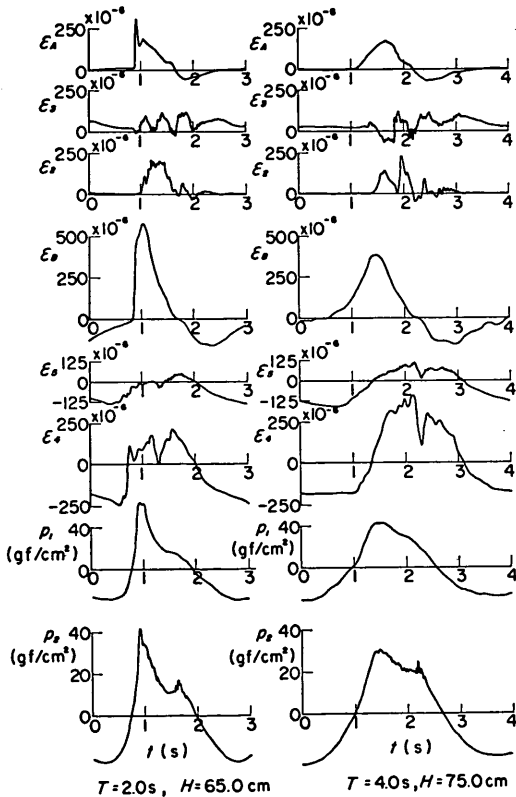


図-24 部材波力の記録の例

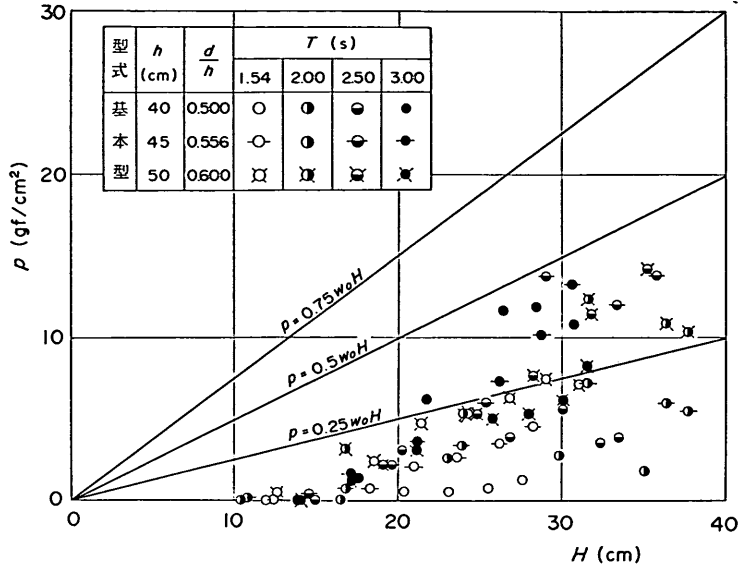


図-25 上段曲り斜面壁に働く等分布波力強度 (基本型平均値)

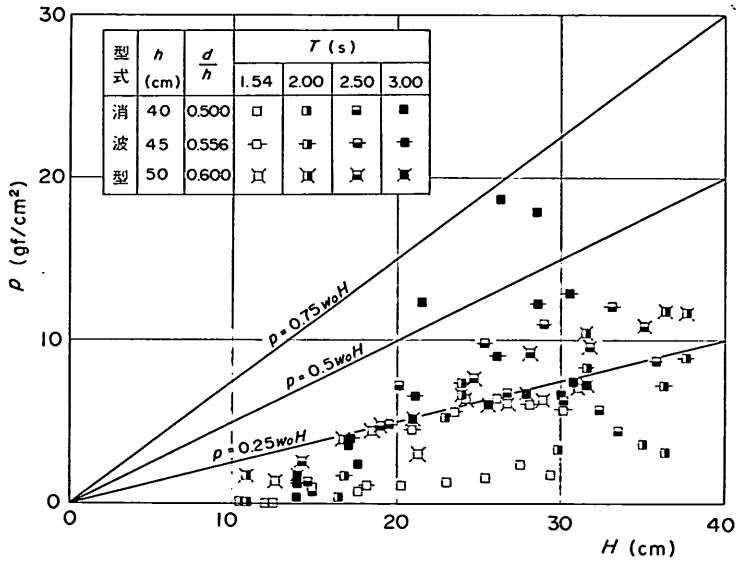


図-26 上段曲り斜面壁に働く等分布波力強度 (消波型平均値)

そのため、図-27, 28 は測定波数内における最大値 p_{max} をとってプロットしてみたものである。この結果では、基本型がほぼ $1.0w_0H$ 以下、消波型が $0.75w_0H$ 以下と、先に示した平均値の場合とは逆に基本型の方がやや大きくなっている。つまり、基本型の方が平均的にはや

や小さいけれども、稀に衝撃的な波力が作用しやすい特性を有しているといえる。

(3) 中段曲り斜面壁に働く波力

中・下段曲り斜面壁に働く波力は上段曲り斜面壁ほどには1波1波の変動はない。また、大型・小型模型によ

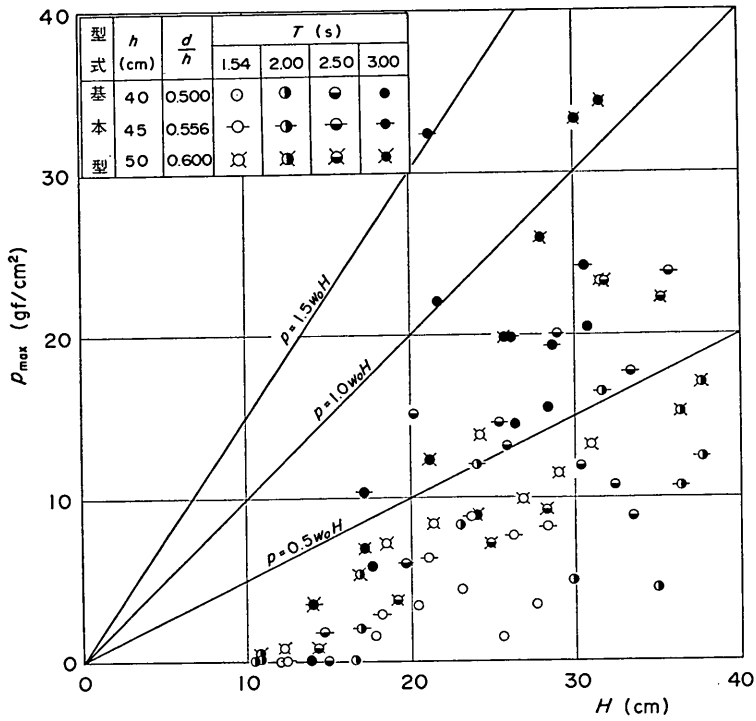


図-27 上段曲り斜面壁に働く等分布波力強度（基本型最大値）

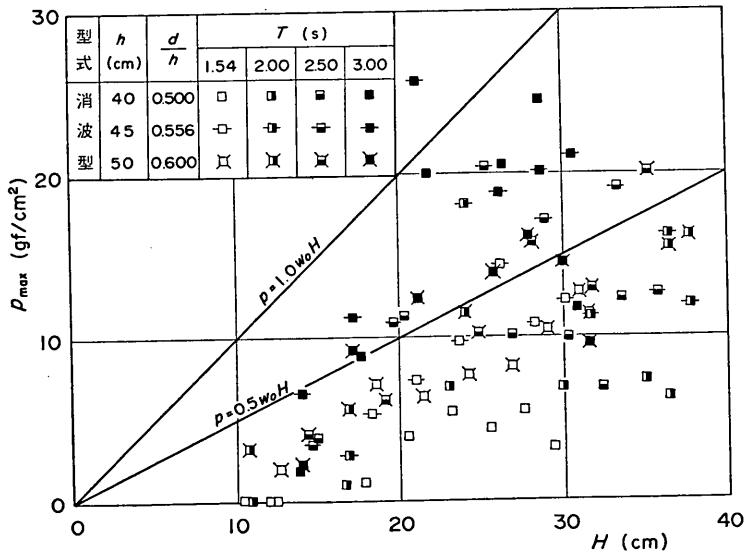


図-28 上段曲り斜面壁に働く等分布波力強度（消波型最大値）

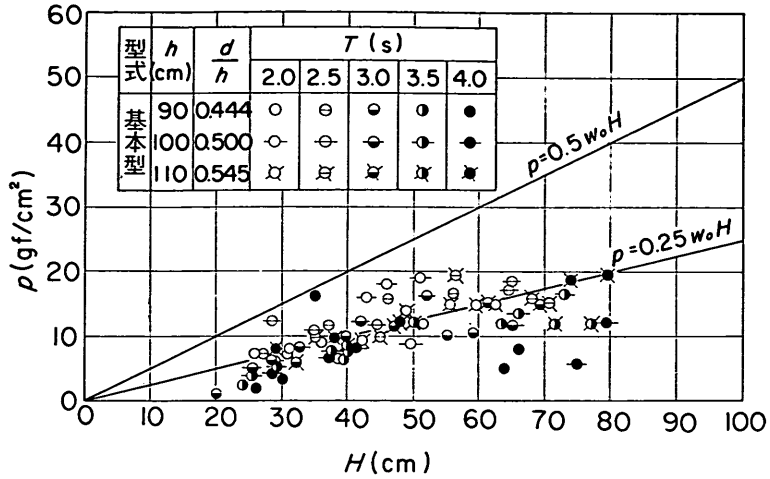


図-29 中段曲り斜面壁前半に働く等分布波力強度 (基本型)

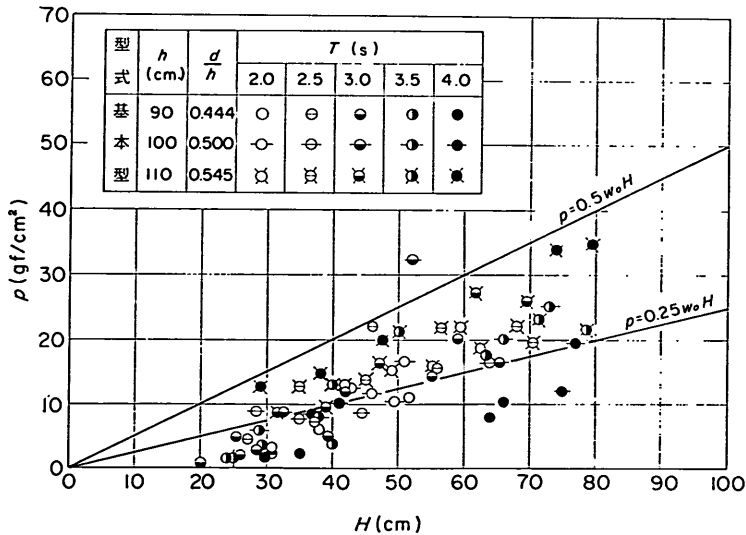


図-30 中段曲り斜面壁後半に働く等分布波力強度 (基本型)

る測定結果にも著しい差はないので、以下大型模型による平均値のみを示すことにする。

図-29, 30 は基本型の、図-31, 32 は消波型のそれぞれ中段曲り斜面壁前半および後半に働く波力強度を示したものである。いずれの結果もほぼ $0.5w_0H$ 以下に分布しているが、基本型に働く波力がやや大きいようである。また、特に消波型の場合波力は波高に比例せず、ある程度以上の波高の条件では一定値以下に押えられる傾

向を示している。これは中段曲り斜面壁には、上面と下面に同時に波圧が働き、波高が大きくなっても相殺し合って波力がそれほど伸びないこと、特に消波型の場合波高が増大してもスリット壁の抵抗によってその割には中空部への流入が大とならず頭打ちの傾向が顕著になることによると推測される。これに対し、先に示した上段曲り斜面壁では中段曲り斜面壁と同様にその上・下面に同時に波圧が働くけれども、上面に働く波圧が波高とともに

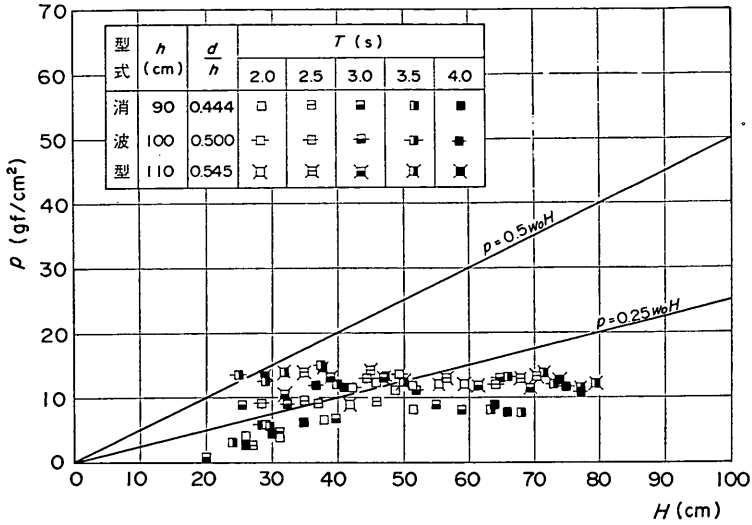


図-31 中段曲り斜面壁前半に働く等分布波力強度（消波型）

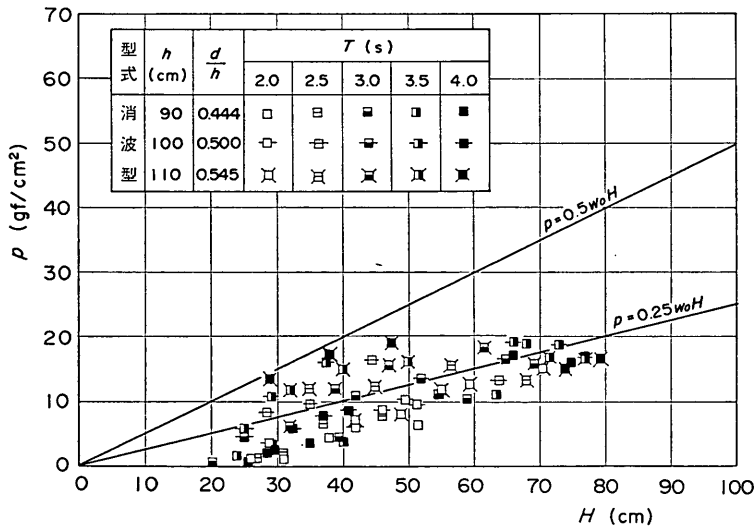


図-32 中段曲り斜面壁後半に働く等分布波力強度（消波型）

に著しく増大してこれが下面に働く波圧に卓越するため、頭打ちの傾向が現われないのであろう。

中段曲り斜面壁の前半と後半に働く波力を比較すると、後半に働く波力がやや大きいようであるが、これは上段曲り斜面壁を越えた波の打ち込みの影響によるものと考えられる。

周期の影響についてははっきりしないが、潮位につい

てはこの場合特に消波型において高い方がやや大きい傾向を示している。

(4) 下段曲り斜面壁に働く波力

下段曲り斜面壁に働く波力を図-33~36に示しているが、この場合波力は上面からだけ受け、下面に働く波圧との相殺効果がないため中段曲り斜面壁に働く波力よりもやや大きい。しかし、消波型に働く波力がやや小さい

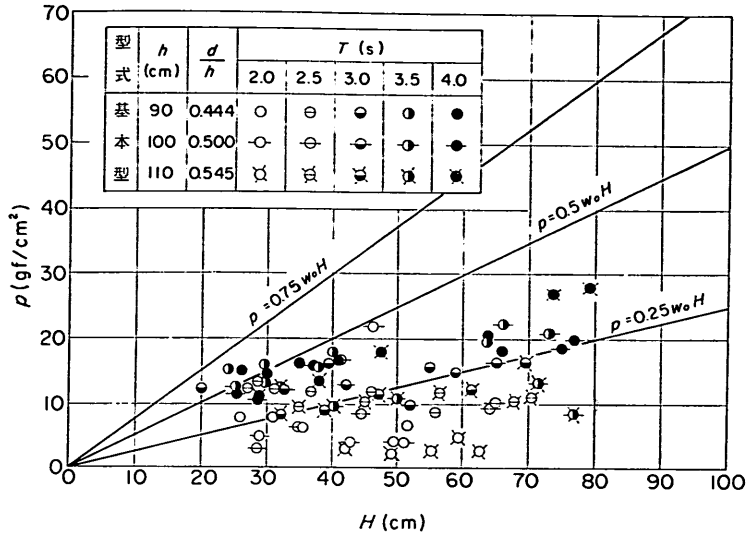


図-33 下段曲り斜面壁前半に働く等分布波力強度 (基本型)

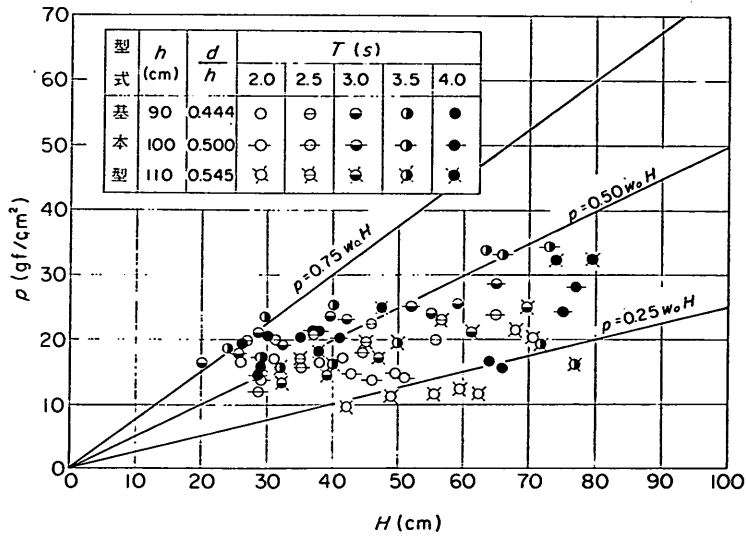


図-34 下段曲り斜面壁後半に働く等分布波力強度 (基本型)

とか、後半部に働く波力がやや大きいといった傾向は同じである。また、この場合にも波力は必ずしも波高に比例して増大せず、中段曲り斜面壁の場合ほどでないにしても、頭打ちの傾向が認められる。これは、下段曲り斜面壁に働く波力が静水圧的なものであり、下段の中空部内の水位に応じた波圧が作用するが、波高がある程度大

きいと波が越波するため、その水圧の増大に限度があることによるものとも考えられる。

潮位については、中段曲り斜面壁の場合とは逆に、低いほど波力が増大する傾向にある。

(5) 前面スリット支柱部材に働く波力

消波型の前面開口部のスリット支柱部材に作用する波

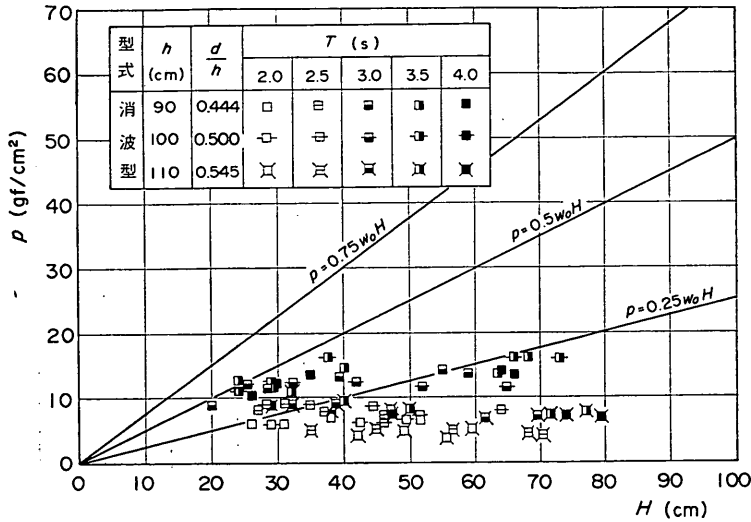


図-35 下段曲り斜面壁前半に働く等分布波力強度 (消波型)

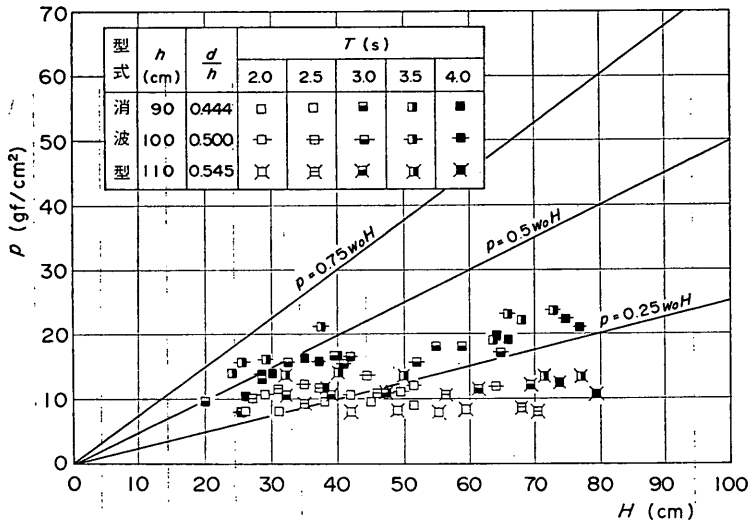


図-36 下段曲り斜面壁後半に働く等分布波力強度 (消波型)

力を図-37及び図-38に示す。これは遊水室内への水の流入時と流出時の波力のピーク値を読み取ったもので、波力が内向きに作用する場合を正、外向きに作用する場合を負で示してある。流入時の波圧は波高に対してほぼ比例的に増大するのに対して、流出時の波圧は波高に無関係にほぼ一定値をとり値も小さい。波力の絶対値は下段スリットの方が、上段に比べて全体的にやや大きな値となる。上段スリットの場合水位が高いほど作用する波

力が大きい傾向があるのに対して、下段スリットの場合には逆に高水位の条件の方が波力が小さくなる傾向が見受けられる。これはスリット壁であっても静水面付近の波圧が大きいことによるものと推測される。

5.3 部材の設計に用いる波力

以上、各部材に働く波力について述べたが、マルチセルケーソンの部材に働く波力は波の条件や潮位によって変化し、現象的には非常に複雑である。しかし、波

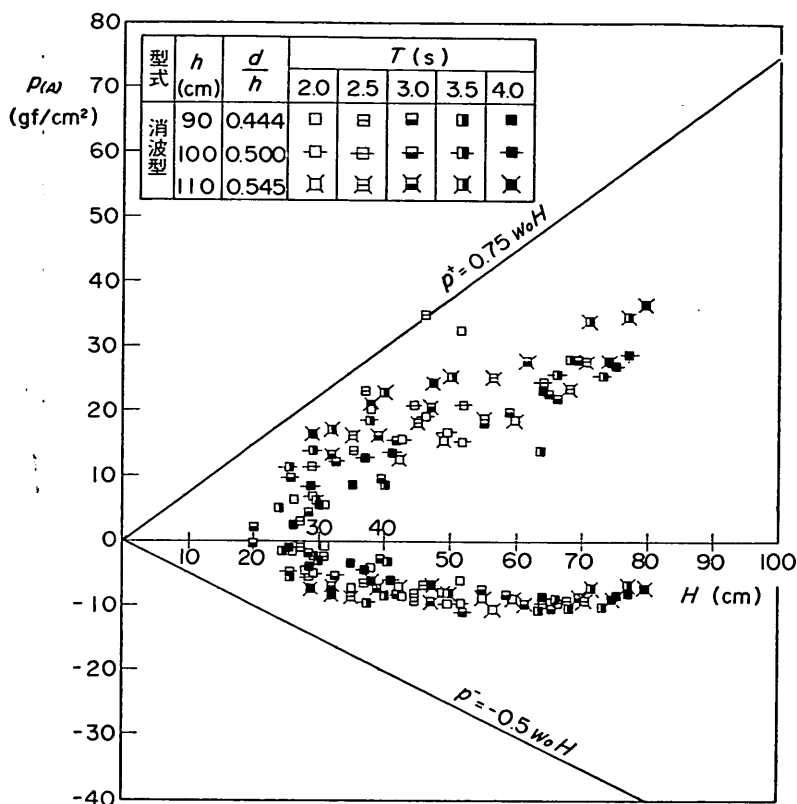


図-37 上段スリット壁支柱材に働く等分布波力強度

力の大きさそのものはそれほどでもなく、設計においてはある程度安全側を考えた簡便なかたちで与えておいてよいと思われる。そのため、潮位や周期、および構造型式による変化を包含してほぼ最大の波力を取り、波高に比例したかたちで次のように与えておく。

上段曲り斜面壁: $p = 0.75w_0H_{max} (-0.5w_0H_{max})$

中段曲り斜面壁: $p = 0.5w_0H_{max} (-0.5w_0H_{max})$

下段曲り斜面壁: $p = 0.75w_0H_{max}$

縦スリット支柱: $p = 0.75w_0H_{max} (-0.5w_0H_{max})$

ここに、() 内に示した負の波力は、上・中段曲り斜面壁については下から上向きに働く波圧が卓越するときの波力、縦スリット支柱材については内から外側へ向かって働くときの波力である。本報告においては、縦スリット支柱材以下の部材については、負の波力の測定値を示していないが、これらは正の波力と比べると明らかに小さく、上記の波力を考えておけば十分である。下段曲り斜面壁に働く波力については前面水位が $0.5H_{max}$ だ

け低下したときの静水圧減を考慮しておけば十分であろう。そのほか、実際設計においては曲り斜面壁を支持する中空部隔壁に働く波力も考慮する必要がある。これは斜め入射波による実験で検討してみなくてはわからないが、当面 $0.5w_0H_{max}$ 程度の等分布波力を考えておけばよいと思われる。

6. 比較設計例

前章までにマルチセルラーケーソンの水理模型実験結果を述べ設計波力の算定法を示したが、最後にこれを用いてマルチセルラーケーソン堤を適用したとき、従来の形式と比べて断面がどのように変わるかについて、概略の計算結果を例示しておく。

この試算で用いた設計条件は以下のとおりである。

水深	-16.5 m
潮位	L.W.L. ±0.0 m
	H.W.L. ±1.5 m

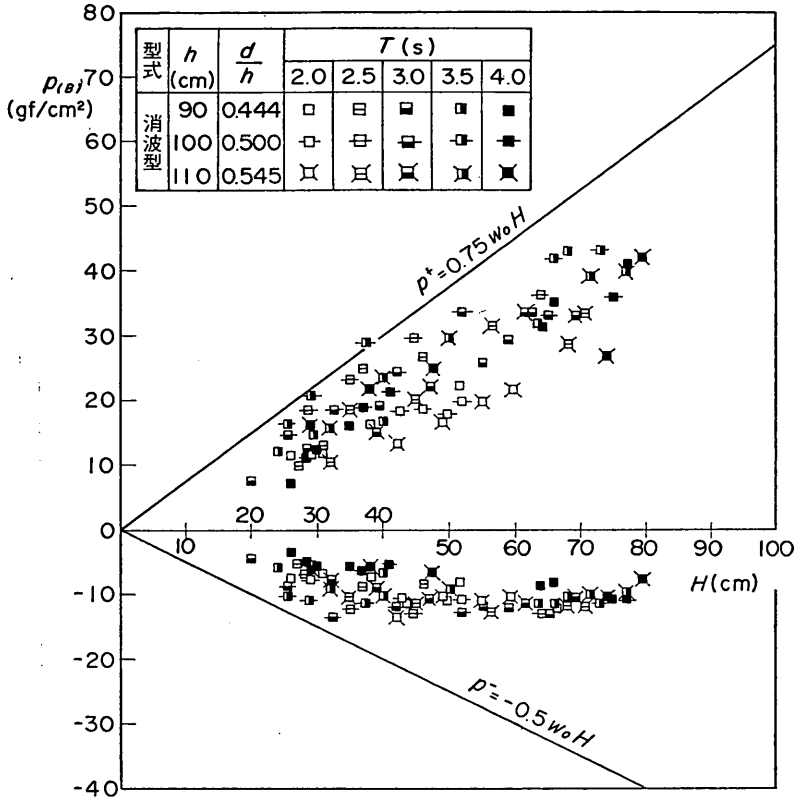


図-38 下段スリット壁支柱材に働く等分布波力強度

海底勾配 1/100

設計波 $T_{1/3} = 13.0s$

$H_0' = 8.0m$ (換算沖波波高)

ただし、安定性は H.W.L. のときが厳しいので、これのみを考える。このとき、堤体設置点での有義波高は 7.8m であり、設計計算に用いる最高波高 H_{max} は 12.6m となる。

以下、この条件に対し次の 4 型式についての基本設計の結果を示す。

- 1) マルチセルラーケーソン堤基本型
- 2) マルチセルラーケーソン堤消波型
- 3) 通常のケーソン堤
- 4) 消波ブロック被覆堤

まず、直立部の天端高 h_0 を決定しなければならないが、これについてはマルチセルラーケーソン堤基本型、消波型は $1.0H_{1/3}$ とし、H.W.L. 上 8.0m (D.L. 上 +9.5m)、通常のケーソン堤および消波ブロック被覆堤

表-4 各種ケーソンの推定伝達率

型 式	H.W.L. 上天端高 h_0 (m)	有義波高の伝達率 K_T
マルチセルラーケーソン堤基本型	7.8	0.22
マルチセルラーケーソン堤消波型	7.8	0.13
通常のケーソン堤	4.7	0.20
消波ブロック被覆堤	4.7	0.17

は $0.6H_{1/3}$ とし、H.W.L. 上 4.7m (D.L. 上 +5.2m) とする。このとき、設計波に対する有義波高の伝達率 K_T を実験結果から推定すると表-4 のようになる。ただし、マルチセルラーケーソン堤の伝達率は前出の 図-

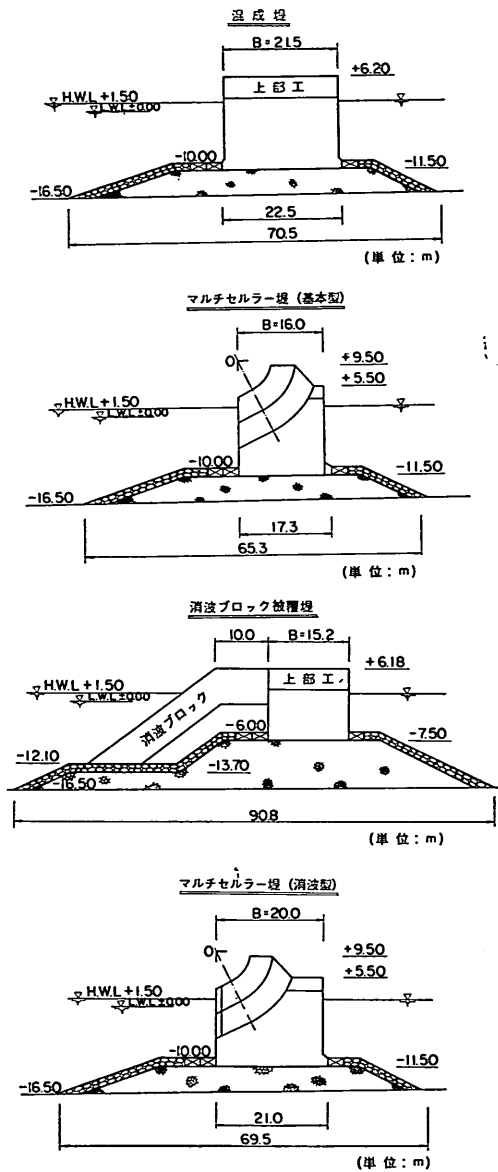


図-39 比較設計堤体断面図

10 の $h_{c2}=0.5h_1$ の実験結果の平均的關係から、通常のケーソン堤についても同図から推定したものであり、消波ブロック被覆堤の伝達率は参考文献 6) から推定したものである。これによると、マルチセルラーケーソン堤消波型が 0.13 と最も小さく、消波ブロック被覆堤が 0.17、通常のケーソン堤が 0.20 であり、マルチセルラ

ーケーソン堤基本型が 0.22 で最も高い。

図-39 に各構造型式の設計断面、図-40 にマルチセルラーケーソン基本型の詳細断面を示す。一方消波型はこの前面開口部に支柱部材厚 1.0m のスリット壁を開口率が 1/3 となるように設けたものである。ケーソン幅は基本型よりやや広く 20m となる。ケーソン基面水深はマルチセルラーケーソン堤および通常ケーソン堤は -11.5m で同一としたが、消波ブロック被覆堤は滑動安全率が 1.2、端趾圧が 50 tf/m^2 にそれぞれ近くなるように選んで -7.5m とした。マルチセルラーケーソンおよび通常ケーソンでは端趾圧を 50 tf/m^2 以下とするためフーチングを設けている。ただし、通常ケーソンでは対称性を保つため前後に設けたのに対して、マルチセルラーケーソンではもともと非対称であるので後面にのみ設けた。これらの断面についての安定計算の結果を一括して表-5 に示している。ここに、消波ブロック被覆堤の直立部に働く設計波の算定において、波力のてい減係数 λ の値は 0.9 を用いた。

これらの結果から、まずマルチセルラーケーソン堤と通常ケーソン堤を比較してみる。このマルチセルラーケーソンの幅 (滑動安全率 1.20) はフーチングを含めないで 16m となり、通常ケーソンの幅 21.5m の約 74%、空中重量で約 50% の値に縮減することができる。また、転倒に対する安全率は通常ケーソン堤の 2.3 に対し、マルチセルラーケーソンでは 1.4 となり、端趾圧 50 tf/m^2 以下を保持しつつ、滑動安全率とバランスのとれた合理的な設計が可能となる。

マルチセルラーケーソン消波型は基本型と比べるとケーソン幅で約 25% 増しになっているが、それでも通常ケーソンの幅より小さく、消波ブロック被覆堤に比べれば、堤体断面ははるかに小さい。マウンドを含めた堤体総断面積は、マルチセルラーケーソン消波型の場合、消波ブロック被覆堤の 65% となっている。

以上、4 形式の安定計算結果を示し断面の比較を行ってみたが、本計算例では d/h が 0.64 と比較的 low マウンドで行ったものであり、通常の混成堤に対して合田式における α_2 の効果は小さい。高マウンドの条件ではこれが大きくなるため通常ケーソンに働く波力は巨大となり、マルチセルラーケーソンの有利性がますます高まってくることは明らかである。

なお、参考のためマルチセルラーケーソンの基本型について中詰め材を用いず、ケーソン内を水張りした場合についても同条件で計算してみた。その結果、ケーソン

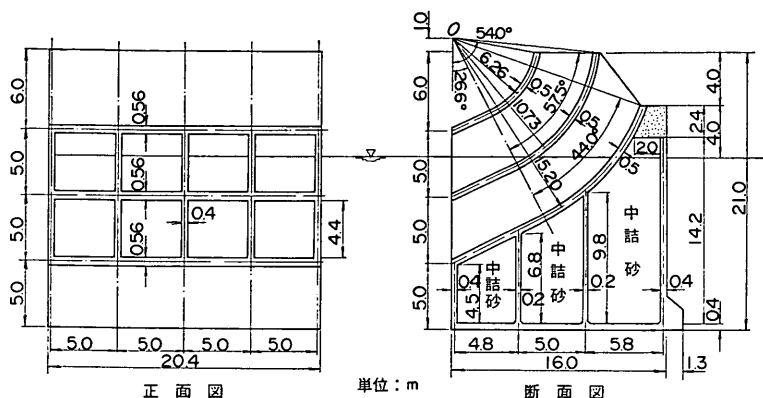


図-40 基本型マルチセルラーケーソン設計断面

表-5 各種ケーソンの比較設計結果

型 式	ケーソン基面水深 h' (m)	ケーソン天端高 h_c (m)	ケーソン幅 B (m)	ケーソン空中重量 (tf/m)	ケーソン水中重量 W (tf/m)	堤体総断面積 (m ²)	滑 動安全率	転 倒安全率	端趾圧 p_e (tf/m ²)
マルチセルラーケーソン堤基本型	13.0	8.0	16.0	412.6	230.9	592.1	1.20	1.37	50.0
マルチセルラーケーソン堤消波型	13.0	8.0	20.0	539.2	327.0	676.8	1.23	1.70	49.1
通常のケーソン堤	13.0	4.7	21.5	817.2	536.6	701.0	1.22	2.28	50.0
消波ブロック被覆堤	9.0	4.7	15.2	482.0	312.2	1045.5	1.20	2.05	46.4

幅は 26m と、通常ケーソンの約 1.2 倍の大きな値となる。しかし、端趾圧は約 37 tf/m² と小さく、軟弱な地盤の条件下では水張りのまま適用することも考えられる。

7. ま と め

本研究で得た主要な結果をまとめると次のとおりである。

- 1) マルチセルラーケーソン基本型の伝達率は、通常ケーソンに比べて明らかに高い。しかし、前面開口部にスリット壁を設けて消波型とすることによって通常ケーソンと同程度の伝達率とすることができ、かつ反射波を消波ブロック被覆堤と同程度に軽減することができる。
- 2) マルチセルラーケーソンの安定性の検討に用いる

波力は、上段曲り斜面壁天端の高さからケーソン下端までの不透過な直立壁を仮想して、それに合田式において波圧係数 α_2 を 0 とおき、かつ波圧の作用高さ、波圧強度ともにてい減係数 λ を乗じた波圧が働くものとして算定してよい。このときケーソン底面に働く揚圧力は、曲り斜面壁に働く波力の鉛直成分と相殺するものとして、考慮しない。ただし、この場合の浮力は下段曲り斜面壁より上の部分については全体に、下の部分については静水時の排除体積に対して考慮するものとする。

波力にてい減係数 λ は基本型の場合 0.6、消波型の場合 0.8 程度が適当である。

- 3) 曲り斜面壁には、前面開口部からの流入、はい上がり、上面開口部からの越波による打込み等による変動の著しい波力が作用するが、大きさはそれほど

でもない。上段曲り斜面壁には $0.75w_0H$ 、中段曲り斜面壁には $0.5w_0H$ 、下段曲り斜面壁には $0.75w_0H$ 程度の大きさの等分布波力が作用すると考えればよい。

消波型の前面スリット壁支柱材に働く波力は、上・下段とも $0.75w_0H$ 程度と考えれば十分である。

- 4) 潮位を含めた水深 18m、周期 13s、設計波高（最高波高）12.6m の条件で、マルチセルラーケーソン基本型と通常のケーソン式混成堤の比較設計を行った。それによると、マルチセルラーケーソンは通常ケーソンに比べてケーソン幅で 74%、直立部の空中重量で 50% の値にまで縮減することができる。また、同じ条件でマルチセルラーケーソン消波型と消波ブロック被覆堤の比較を行うと、マルチセルラーケーソン堤のマウンドを含めた総断面積は消波ブロック被覆堤の場合の 65% の値に減少する。

8. あとがき

以上、大水深・大波浪条件に適した新しい防波堤構造の 1 つとして提案されたマルチセルラーケーソンについて、その水理特性を実験的に検討し、安定計算及び部材計算における設計波の算定法を提案した。しかしながら、ここで取り扱ったマルチセルラーケーソンの形状は一つの例にすぎず、実際の適用にあたっては、施工性をも考慮して対応してゆかねばならない。また、全波力・部材波力等すべて実験値を包含する上限値を用いているので、設計条件によってはこれを下回ることも当然ありうる。従って、本報告で示した方法は、概略設計などにおける一応の指針としてこれを適用し、実施にあたっては個々の条件に適応した適切な模型実験によって検討することがよいであろう。特に消波型の前面スリット部の開口比については、耐波安定性と消波性能とのかねあいで最適な開口比を定める必要がある。

斜め入射波に対する波向き補正については本報告では検討していないが、当面比較設計等においては通常ケーソンの場合と同様に波圧の作用高さ、波圧強度ともに $(1+\cos\beta)/2$ を乗じて補正を行ってよいであろう。ここに、 β は防波堤の法線に対する垂線と、波の主方向から $\pm 15^\circ$ 以内で最も危険な方向とのなす角度である。しかし部材波力については、本構造は部材力に直接頼る構造でもあり、波向き補正は考えない方がよい。

さらに、本報告はマルチセルラーケーソンの水理的側

面のみ検討したが、本構造の実用化にあたってはプレストレストコンクリートの適用が得策と考えられ、波力を受ける PC 部材の設計法など構造的問題の解決を計ってゆかねばならない。これらについては、現在 PC 構造の港湾構造物への導入が当所構造部を中心として検討されつつあり、その成果が期待される。

なお、本マルチセルラーケーソンの原案は昭和 51 年度に発足した新防波堤構造ワーキンググループにおいて、当時港湾技術研究所設計基準部本 浩司自動設計研究室長（現運輸省第三港湾建設局）が提案し、これがとりあげられたのを機会に筆頭著者と協議してさらに洗練した形状へと発展させたものである。筆者らはこの水理模型実験を担当し、今回の報告をとりまとめるに至ったが、その間原提案者のもとより、会議を通じて川上善久コーディネータ（昭和 51 年度～53 年度）、合田良実コーディネータ（昭和 54 年度～55 年度）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の大里睦男技官（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。そのほか昭和 54 年度までの全体を通じ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 年度までの当所研修生福富耕三、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。
(1981 年 3 月 31 日受付)

参 考 文 献

- 1) 伊藤喜行：特殊防波堤論，1968 年度水工学に関する夏期研修会講義集，A. 海岸・港湾コース，68-06，1968.
- 2) 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.
- 3) 谷本勝利・原中祐人・富田英治・和泉田芳和・鈴木諭司：曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第 19 巻第 4 号，1981，pp. 3～53.
- 4) 前出 3) に同じ.
- 5) 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.
- 6) 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.

主要記号表

a	: ひずみ測定部材のゲージ貼付位置から測った直線部の長さ	H_0'	: 換算沖波有義波高
b	: 部材厚	H_{CG}	: 合田式により求めた滑動限界波高
b_1, b_2, b_3	: 縦スリット支柱材の上・中段曲り斜面壁の厚み	K_R	: 反射率
B	: ケーソン幅	K_T	: 伝達率
B_0	: ケーソン前壁面と下段曲り斜面壁天端との間の水平距離	l	: ケーソン全高 ($=h'+h_c$)
d	: マウンド被覆材天端上の水深	L	: 波長 (不規則波の場合には有義波の波長)
D	: スリット部材の法線方向幅	M	: ケーソン後しまわりの波力モーメント
E	: ヤング率	M_G	: 合田式により求めた同上波力モーメント
E_I	: 入射波のエネルギー	p	: 波力強度
E_R	: 反射波のエネルギー	p_1	: 合田式による静水面での波圧強度
F_H	: 水平合波力 (単位長あたり)	p_3	: 合田式によるケーソン下端での波圧強度
F_{HG}	: 合田式から求めた水平合波力 (単位長あたり)	pu'	: 鉛直波力がケーソン幅 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 ($=2F_V/B$)
F_V	: 鉛直合波力 (単位長あたり)	p_H	: 水平波力から求めた平均波力強度 ($=F_H/l$)
F_{VG}	: 合田式から求めた鉛直合波力 (単位長あたり)	r	: 曲り斜面壁曲線部上面の曲率半径
h	: 堤体設置位置での水深	s	: スリット間げきの幅
h'	: ケーソン基面水深	S	: 滑動実験での滑動量
h_c	: ケーソン静水面上の天端高	T	: 波の周期
h_{e1}	: 上・中段曲り斜面壁の静水面上の天端高	$T_{1/3}$: 有義波周期
h_{e2}	: 下段曲り斜面壁の静水面上の天端高	T_n	: ひずみ測定用部材の固有振動周期
h_M	: マウンドの厚さ	w_0	: 水または海水の単位体積重量
H	: 波高	W	: ケーソン水中重量 (単位長あたり)
H_i	: 分離入射波高	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: 合田式における波圧係数
$H_{1/3}$: ゼロアップクロス法で求めた有義波高	β	: ひずみ測定部材の減衰比あるいは防波堤の法線に対する垂線と入射波の主方向とのなす角度
H_{max}	: 最高波高	ϵ	: スリット部材の開口比 ($=s/(D+s)$)
		δ	: 曲り斜面壁の曲線部分の中心角の半分
		θ	: 曲り斜面壁前面部分と水平面のなす角