

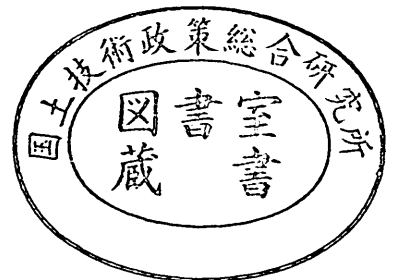
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 28 NO. 3 SEPT. 1989

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第28巻 第3号 (Vol. 28, No. 3), 1989年9月 (Sept. 1989)

目 次 (CONTENTS)

1. 共振集波効果を応用した直立消波ケーソンの原理と水理特性
..... 高橋重雄・木村克俊・田中 智..... 3
(Wave Concentration Principle and Its Application for a New
Wave Absorbing Caisson
..... Shigeo TAKAHASHI, Katsutoshi KIMURA and Satoru TANAKA)
2. 海底地盤の波浪による液状化—現地観測および解析—
..... 善 功企・山崎浩之・佐藤 泰.....29
(Wave-induced Liquefaction in Seabed—Field Observation and Analysis—
..... Kouki ZEN, Hiroyuki YAMAZAKI and Yasushi SATO)
3. 遠心模型実験の計画と結果の信頼性—支持力に関する国際比較実験例—
..... 寺師昌明・遠藤敏雄・北誥昌樹.....59
(Planning of Model Tests and Reliability of Test Results
—Bearing Capacity of a Circular Foundation on Sand—
..... Masaaki TERASHI, Toshio ENDOH and Masaki KITAZUME)
4. 一軸圧縮試験と三軸試験を併用した新しい粘性土地盤の強度決定法
..... 土田 孝・水上純一・及川 研・森 好生.....81
(New Method for Determining Undrained Strength of Clayey Ground
by Means of Unconfined Compression Test and Triaxial Test
..... Takashi TSUCHIDA, Jun-ichi MIZUKAMI, Ken OIKAWA and Yoshio MORI)
5. 腐食鋼矢板の補修工の耐力特性..... 清宮 理・野口孝俊・横田 弘... 147
(Mechanical Properties of Repaired Steel Sheet Piles
..... Osamu KIYOMIYA, Takatoshi NOGUCHI and Hiroshi YOKOTA)

1. 共振集波効果を応用した直立消波ケーソンの 原理と水理特性

高橋 重雄*・木村 克俊**・田中 智***

要 旨

防波堤の平面形状に着目して、部分消波ケーソンという直立消波ケーソンの新しい構造を考案した。これは透過壁と遊水室から成る消波部を、防波堤の法線方向に部分的に、しかも前面から後退させて配置するものである。この方式は、平面的な凹部での波浪の共振現象によって波のエネルギーを平面的に集め消波するものであり、消波性能が向上する。ここでは、これを共振集波効果と呼ぶ。

本報告では、まず数値波動解析法による計算を行って、ケーソン各部の諸元が共振集波効果に及ぼす影響を検討した。その結果、①法線方向の消波部の長さを波長の10~40%、②凹部の奥行きを波長の20%、③法線方向のケーソンの長さに対する消波部の長さを50%程度にした場合に、この効果が顕著となることが明らかとなった。さらに、不規則波による反射実験によってその効果を確認し、部分消波ケーソンが従来型の直立消波ケーソンを上回る消波特性を有することを示した。また、伝達波実験を行って、部分消波ケーソンの波高伝達率が通常の直立消波ケーソンの場合と同程度であることを確認した。

一方、ケーソンに働く波力に関しては、規則波による波力実験と、不規則波による滑動実験を実施した。その結果、部分消波ケーソンは従来型の直立消波ケーソンに比べて滑動が生じにくく、波力の低減効果があることを示した。また、部分消波ケーソンに働く波力算定法についての基本的な考え方を明らかにした。

キーワード：混成防波堤、消波ケーソン、反射、滑動安定性、共振集波

* 水工部 耐波研究室長

** 水工部 耐波研究室

*** 水工部 海洋エネルギー利用研究室

1. Wave Concentration Principle and Its Application for a New Wave Absorbing Caisson

Shigeo TAKAHASHI*

Katsutoshi KIMURA**

Satoru TANAKA***

Synopsis

Perforated wall caissons are increasingly adopted as the structures of sea walls and breakwaters. This is because the perforated wall caissons have low wave reflection and overtopping characteristics, and is relatively stable against wave actions because of their wave absorbing capability. A new perforated wall caisson is conceived and its characteristics are investigated theoretically and experimentally.

The wave absorbing part (perforated wall and wave chamber) is distributed in the middle of the new caisson in the plane view. The wave absorbing part of the new caisson recedes from the front line of the caisson forming a dent in the plane view. This dent contributes to gather wave in itself and the wave energy is dissipated in the wave absorbing part. Therefore the wave energy dissipation of the new caisson is expected high even though the area of the wave absorbing part is smaller than that of conventional ones.

In the present study, numerical calculations using a kind of mild slope equations are conducted to confirm the wave concentration effect by the dent portion of the caisson. A series of model experiments are conducted in a wave flume with a model of the new caisson to investigate the hydrodynamic characteristics.

The major conclusions are as follows:

- 1) It is found by the numerical calculations that the wave concentration appears significantly when the dent depth is near 20% the wavelength and that the wave concentration appears when the length of the wave absorbing part in the direction of the breakwater alignment is from 10 to 40% wavelength. The ratio of the length of the wave absorbing part to the caisson length in the breakwater alignment is recommended to be about 50%.
- 2) The wave reflection coefficient of the partial wave absorbing caisson can be smaller than that of ordinary ones. The wave chamber length of the new caisson in the wave direction is smaller than that of ordinary ones to minimize the wave reflection. The experimental results agree well with the numerical results.
- 3) The phase difference of the peaks of wave forces becomes significant if the wavelength is small. The wave force on the front impermeable wall is much smaller than that on solid vertical walls and this tendency increases as the wavelength increases.
- 4) The total wave force on the partial wave absorbing caisson is smaller than that on ordinary wave absorbing caissons. The wave force to slide the new caisson is maximized at the phase when the wave crest is near the perforated wall. This is different from the ordinary perforated wall caissons.

Key Words: Composite Breakwaters, Wave Absorbing Caisson, Wave Reflection, Wave Force, Wave Energy Concentration

* Chief of Maritime Structures Lab., Hydraulic Engineering Div.

** Member of Maritime Structures Lab., Hydraulic Engineering Div.

*** Member of Ocean Energy Utilization Lab., Hydraulic Engineering Div.

目 次

要 旨	3
1. ま え が き	7
2. 共振集波効果の原理およびその応用	7
2.1 共振集波効果の原理	7
2.2 共振集波効果に関する数値計算	9
2.3 共振集波効果の応用	12
3. 部分消波ケーソンの反射・伝達波特性	13
3.1 実験の方法	13
3.2 反射特性	17
3.3 伝達波特性	20
3.4 その他の構造の反射・伝達波特性	20
4. 部分消波ケーソンの波力および滑動安定性	21
4.1 波圧特性	21
4.2 滑動安定性	24
5. 結 論	26
参 考 文 献	27
主要記号一覧	27

1. まえがき

近年、防波堤の構造が多様化しつつある。これは、防波堤を取り巻く情勢の変化に対応しており、その一つは港湾の大水深化に伴う防波堤設置水深の増大である。このため防波堤の大型化に対応できる経済的な構造が求められている。もう一つは環境の問題である。周辺に対する環境上の影響を考慮して、反射率が低かつ海水交換率の高い防波堤が求められる場合が多い。さらに親水性に関連した種々の要請に対応することも必要となっている。たとえば、防波堤の市民への開放、あるいは防波堤による海洋レクリエーションの場の創出など、これまでと異なる新たな要請に対応することも求められている。

防波堤の新しい構造の主な形式の一つは、直立消波ケーソンを用いた混成堤である。直立消波ケーソンは、大水深化や環境上の要請に対応できる優れた構造である。また、親水性に関連する要請にも応えることができる構造形式と考えられる。直立消波ケーソンには、種々の構造形式がこれまで考案され、実際に現地に施工されたものも多い。

一般に直立消波ケーソンは透過壁とそれに続く遊水室と呼ばれる中空の室、そして不透過な通常のケーソン部から成っている。その透過壁や遊水室の形によって種々の形式があるが、いずれも断面形状のみが注目され平面形状を考えることはこれまであまりなされていない。著者らは、平面形状に工夫をすることによって、反射波および波力の低減という直立消波ケーソン本来の特性をさらに向上させた新しいケーソン構造を考案した。図-1はその概念図で、通常の不透過ケーソンの中央に、消波部を後退させて配置したものである。これは、平面的な凹部での波の共振現象によって波のエネルギーを平面的に集め消波するものであり、消波性能の向上が期待でき

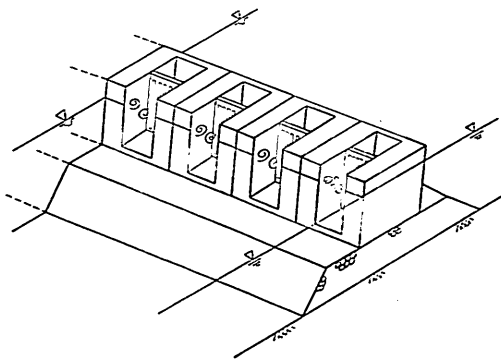


図-1 部分消波ケーソンの概念図

る。また、この平面形状によって、ケーソンの重量は断面的にバランスのとれたものになり、端趾圧の軽減や浮遊曳航時の安定性が向上する。さらに、各面における波力のピーク値に位相差があることやケーソン内に働く鉛直下向きの波力などによって、耐波安定性も向上すると考えられる。このケーソンは防波堤の法線方向の一部を消波構造とすることから、著者らはこれを部分消波ケーソン、あるいは平面的な形状から平面凹型ケーソンと呼ぶ。

本研究では、まず部分消波によって得られる平面的な反射波の低減効果を、数値波動解析法を用いた計算によって確認するとともに、部分消波の各部の諸元が反射特性に及ぼす影響を把握した。次に、消波部が縦スリットと遊水部から成る部分消波ケーソンモデルを製作し、その反射・伝達波特性、波力特性そして滑動特性を実験的に検討した。なお部分消波は、通常のケーソンと従来型の直立消波ケーソンを平面的に交互に並べることによっても得ることができる。この場合についても実験を実施している。さらに、凹部奥の後壁を有孔壁とした透過型や凹部の形状が異なる構造についても若干の検討を行っている。

ただし、以下に述べる検討結果は、すべて防波堤に対して波が直角に入射する場合を対象としたものである。

2. 共振集波効果の原理およびその応用

2.1 共振集波効果の原理

(1) 長周期波の平面的な共振

外海に対して入口を開いた水域では、侵入波の周期がその水域の水面振動の固有周期に近づくと共振が生じ、水面振動の振幅が大きくなる。たとえば、港内副振動や湾水の振動といった長周期波の共振現象は良く知られている。前者の場合は港湾の利用の面で、後者の場合は防災の面で重要な問題であり、共振を発生させないように対策が講じられなければならない。

こうした現象について、図-2に示す単純なモデルを用いて以下に説明する。水深が一定の長方形の水域（凹部）があり、ここに長周期波が直角に入射している。いま、凹部水域の幅は波長に比して非常に狭く、入口付近での振動がその近傍に及ぼす影響を無視できると仮定する。

ここで、外海での重複波の波形 η_0 を、

$$\eta_0 = H_0 \cos kx \cos \sigma t \quad \dots\dots(1)$$

凹部水域内の重複波の波形 η_1 を、

$$\eta_1 = H_1 \cos k(x - D^*) \cos \sigma t \quad \dots\dots(2)$$

とおく。ここに、 H_0 は外海の波高、 H_1 は凹部水域内の

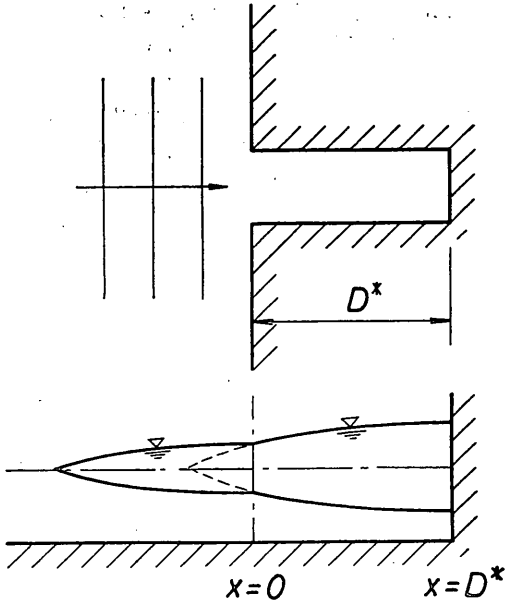


図-2 細長い水路での共振の例

波高である。座標は凹部水域の入口を $x=0$ 、奥の壁面の位置を $x=D^*$ とした。また、 $k=2\pi/L$ 、 $\sigma=2\pi/T$ で、 L は波長、 T は波の周期、 t は任意の時刻を表す。水域の入口 $x=0$ における水面の連続条件から、波高の増幅率は、

$$\frac{H_I}{H_0} = \frac{1}{\cos kD^*} \quad \dots\dots(3)$$

で表される。式(3)では D^* が $L/4$ に近づくほど増幅率が大きくなる。これが波の共振である¹⁾。

ここで、凹部水域の奥の $x=D^*$ の位置に、反射率 C_R の消波工がある場合を考えよう。以下、計算条件として反射率を与える場合には C_R を使い、計算結果あるいは後で述べる実験結果による反射率を示す場合には K_R を用いて両者を区別することにする。この場合、凹部水域内の水面波形の振幅 η_I は、式(2)の代わりに次式で表される。

$$\begin{aligned} \eta_I &= \frac{1}{2} (H_{Ii} - H_{Ir}) \cos(kx - \sigma t) + H_{Ir} \cos kx \cos \sigma t \\ &= \frac{1}{2} H_{Ii} \{ (1 + C_R)^2 \cos^2 kD^* + (1 - C_R)^2 \sin^2 kD^* \}^{1/2} \\ &\quad \times \sin(\sigma t - \varepsilon) \quad \dots\dots(4) \end{aligned}$$

ここで、 H_{Ii} 、 H_{Ir} は、それぞれ凹部水域内の入・反射波高で、 ε は位相差である。凹部水域の入口における水面の連続条件から、波高の増幅率は式(3)の代わりに、

$$\frac{H_{Ii}}{H_0} = \frac{2}{\{ (1 + C_R)^2 \cos^2 kD^* + (1 - C_R)^2 \sin^2 kD^* \}^{1/2}} \quad \dots\dots(5)$$

で与えられる。

(2) 長周期波のエネルギー吸収と共振集波効果

平面的な共振効果による凹部内での波高増幅率は、式(5)のように $kD^*(=2\pi D^*/L)$ と C_R の関数として、比較的簡単に表すことができる。ここでは、波の平面的な共振効果でどの程度の波のエネルギーがここに集められ、消費されているかを考えてみる。

消波工に吸収される単位時間当たりのエネルギーは、単位幅当たり $(1/8)\omega_0(1-C_R^2)H_{Ii}^2 C_g$ である。また、入射するエネルギーは $(1/8)\omega_0 H_0^2 C_g$ であるので、両者の比で定義されるエネルギー吸収率 κ は次式で与えられる。

$$\kappa = \frac{(1-C_R^2)H_{Ii}^2}{H_0^2} \quad \dots\dots(6)$$

ここで式(5)の關係を用いると、 κ は次式で表される。

$$\kappa = \frac{4(1-C_R^2)}{(1+C_R)^2 \cos^2 kD^* + (1-C_R)^2 \sin^2 kD^*} \quad \dots\dots(7)$$

図-3 は、 C_R をパラメーターとして、 kD^* と κ の關係を示したものである。やはり、 kD^* が $\pi/2(=1.57)$ 、すなわち D^* が $L/4$ の付近で、エネルギーの吸収率は極大となる。 κ の値が 1.0 より大きくなることは、凹部水域の幅よりも広い部分の波のエネルギーが平面的に集められたことを意味する。つまり、波の回折効果によって凹部内に波が集められるものであり、凹部内に波を入り易くしているのが、ここでの波の共振である。

しかしながら、 κ の値は C_R によって異なることに留意しなければならない。たとえば、 $kD^*=1.0$ の場合の

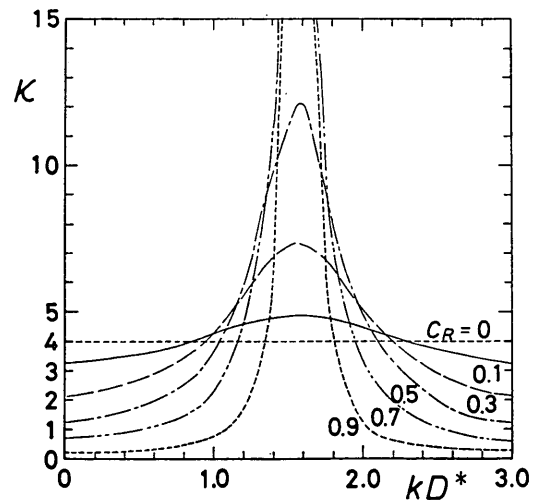


図-3 エネルギー吸収率

κ の値をみると、 $C_R=0.9$ のときが 0.8, C_R が 0.7 のときが 2.3, $C_R=0.3$ のとき 4.3 となり、この条件では C_R が 0.3 のとき κ が最大となっている。また、 $C_R=1$ の場合は凹部内でエネルギーが全く消費されないため $\kappa=0$ となる。すなわち、凹部内での波の共振が波のエネルギーをここに入り易くしているが、ここにエネルギーを適切に吸収する機構がなければ、エネルギーは反射されるだけである。なお、 $C_R=0$ のときは D^* の値にかかわらず一定値となるが、これは凹部奥の壁を波が通り抜けていくためである。この場合、外海の完全重複波の波高と凹部水域内の進行波の振幅が等しいと仮定したため、波高比で 2 倍、エネルギー比で 4 倍の値となる。

(3) 短周期波による共振集波効果

長周期波と同様に通常の波浪に対しても、侵入波の周期が水域(凹部)の固有周期に近づけば共振が生じる。その水域内に波のエネルギーを吸収する装置を設ければ、共振による入射波高の増大によって波エネルギーの吸収量も増えるため、水域の幅より広い部分から波のエネルギーを集めることができる。この効果を本報告では「共振集波効果」と呼ぶことにする。

実際にはどんなに凹部水域の幅が狭くとも、入口では水位分布が平面的に変化するため、(2)で述べた簡単なモデルのように水位の連続条件が完全に満たされることはない。次節では、平面的な影響を考慮した検討を行って、共振集波効果の特性を明らかにする。

2.2 共振集波効果に関する数値計算

(1) 港内副振動に関する検討例

副振動による共振現象については、Ippen・Goda²⁾ および合田³⁾ が解析的に導き、単純形状の港湾における副振動の特性を検討している。一方、高山・平石⁴⁾ は実際の港湾での副振動を解析するため、長波近似と差分法を用いた計算を実施している。その中で、前述した Ippen・Goda の解析解と計算結果との比較を行い、一次モードの共振発生条件については両者が一致することを確認している。ただし、波高増幅率については若干異なる結果が得られることが指摘され、その理由として Ippen・Goda の解析解では港口での平均水位を用いて港内・外を接続していることによる精度低下を指摘している。差分法を用いた数値計算の場合には領域間の接続にこうした問題が生じることはなく、共振に関する検討手法として有効である。

(2) 数値波動解析法

数値波動解析法は、伊藤・谷本⁵⁾、谷本ら⁶⁾ によって開発され、主として防波堤の平面配置による通常の波の遮蔽効果を検討するとき用いられる。これは一種の緩

勾配方程式法^{7),8),9)} であり、波の伝播を屈折、回折そして反射のすべてを含んで計算できる数値計算法である。その基本方程式は以下に示す水平方向の運動方程式と質量保存の式である。

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} = -C^2 \frac{\partial \eta_S}{\partial x} \quad \dots\dots(8)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} = -C^2 \frac{\partial \eta_S}{\partial y} \quad \dots\dots(9)$$

$$\frac{\partial \eta_S}{\partial t} = -\frac{\partial Q_x}{\partial x} - \frac{\partial Q_y}{\partial y} \quad \dots\dots(10)$$

ここに、 Q_x 、 Q_y は x および y 方向の水平流速を水深方向に積分した線流量と呼ばれるものである。また、 η_S は水位であり、 C は波速である。上に示した 3 つの式を差分化し、沖合の境界で Q_x 、 Q_y 、 η_S を与えて、各格子点での Q_x 、 Q_y 、 η_S の値を各時間ステップごとに計算する。これを定常状態に達するまで続けることによって、沖側から波が入射した場合の海域の波高分布が求められる。

式(8)、(9)、(10)は、水深が一定の場合には波パワー(波エネルギーの輸送率)の連続条件を満たしている。 x 方向の単位幅当たりの波パワーの 1 周期当たりの平均値 \bar{W}_I は、流線量と水位により、

$$\bar{W}_I = \frac{1}{T} \int_0^T \eta_S Q_x n dt \quad \dots\dots(11)$$

と表される。ここに、 n は波の群速度 C_g と位相速度 C の比である。

(3) 数値波動解析法による共振集波効果の計算例

図-4 に示すような幅 B_0 の水路があり、ここに波高 H_I の規則波が入射する場合を考える。図の上側に示すのは、水路全幅にわたって反射率 C_R の消波装置がある一般的な場合である。これに対し下の図は、両側を完全反射の不透過部とし、これから D^* だけ後退した位置に、長さ B_1 の消波部を設けた場合である。なお、消波部の

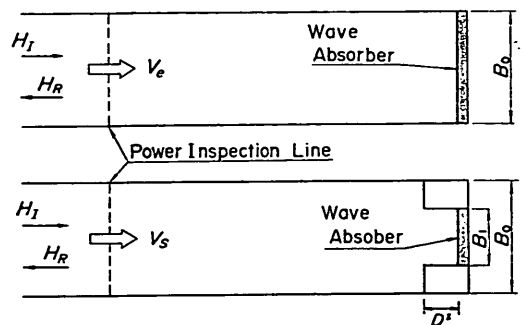


図-4 数値計算で対象とした構造条件

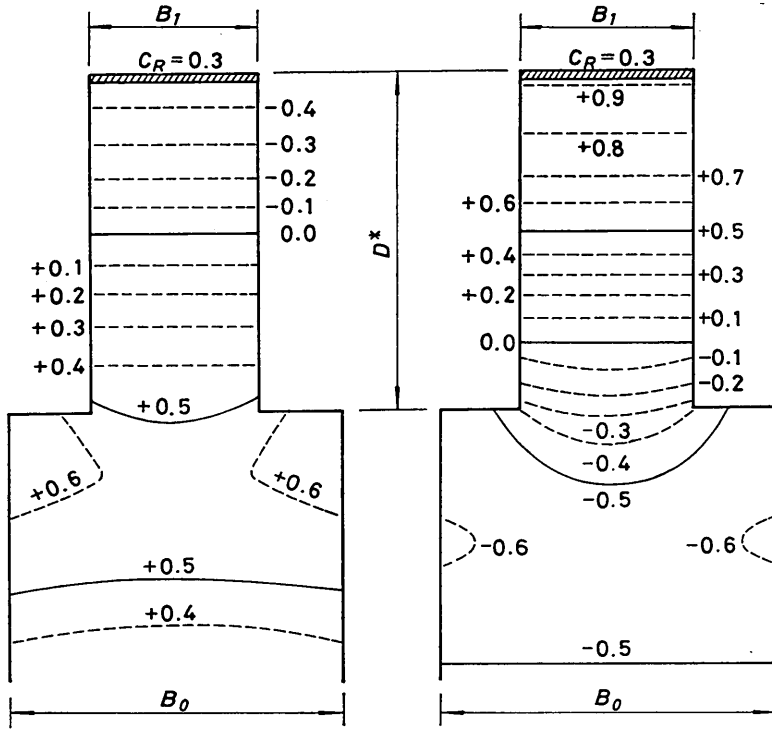


図-5 水位分布

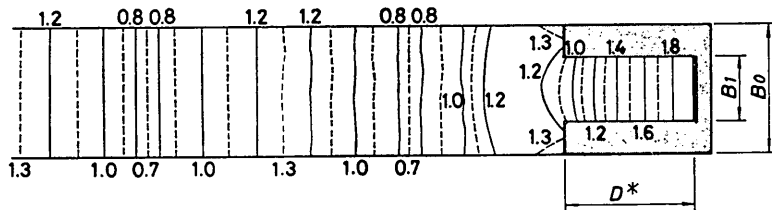


図-6 波高分布

反射率は C_R とする。以下、このように波の入射方向に入口を開いた凹型の構造について、数値波動解析法による計算例を示し、共振集波効果を説明する。

図-5 は凹部内およびその近傍の水位分布である。計算条件は $B_1/B_0=1/2$, $B_1/L=0.145$, $D^*/L=0.290$ で、消波部の反射率 C_R は 0.3 とした。図の左側は凹部の入口の不透過部に波の峰がある時、図の右側は凹部奥に波の峰がある時の同時水位分布である。なお、水位 η_S はすべて入射波高 H_I で除して無次元化してある。一般に線形を仮定した場合、反射率 C_R の壁に波の峰がある時の水位 η_S は次式で表される。

$$\eta_S/H_I = (1+C_R)/2 \quad \dots\dots(12)$$

この関係によれば、不透過部 ($C_R=1.0$) の前面では η_S/H_I が 1.0 になるはずであるが、左図に示す計算結果では 0.6 程度である。これは回折によって凹部内に波が回り込むためである。図中の等水位線のコンターにもこうした波の回り込む様子が現れている。一方、凹部の奥壁に波の峰があるときの水位分布を示す右の図では、凹部内での波高増幅が顕著となる。反射率 $C_R=0.3$ の奥壁の前面においては、式(12)では η_S/H_I が 0.65 になるところが、計算では図に示すように 0.9 程度になる。

図-6 は、波高分布の計算結果である。凹部からある程度離れたところでは、波高は水路直角方向にはほぼ一樣になっている。また、波の進行方向には節と腹が交互

に現れている。このように入射波と反射波が重なった合成波に対しては、Healyの方法によって、節と腹での波高から反射率 K_R が求められる。図に示した計算結果では、節での波高比が1.3、腹での波高比が0.7程度であり、反射率 K_R はおよそ0.3となる。すなわち、凹部の共振集波効果によって、消波部が部分的であっても全体にある場合と同じ程度の反射率となることがわかる。

(4) 波パワーと水路全体の反射率

前出の図-4の上側の場合には、吸収される波パワー V_e は入射波の波高 H_I と群速度 C_g を用いて次式で求められる。

$$V_e = \frac{1}{8} w_0 H_I^2 C_g B_0 (1 - C_R^2) \quad \dots\dots(13)$$

ここで $C_R=0$ は入射波のパワーが消波部ですべて吸収される場合で、 $C_R=1$ は完全反射となり波パワーは全く吸収されないことを意味する。

同図の下側の凹型の構造に対しては、水路全体の反射率を定量的に求めるために、凹部から十分離れたところに検査面を設ける。検査面を通過する一周期の波パワー V_S は、数値波動解析法による数値計算結果と式(11)を用いて求められる。水路全体の反射率 K_R^* は V_S を用いて次式で計算できる。

$$K_R^* = \sqrt{1 - \frac{V_S}{(1/8)w_0 H_I^2 C_g B_0}} \quad \dots\dots(14)$$

前出の図-6の場合には、波パワーから求めた反射率 K_R^* は0.33となり、Healyの方法による反射率とほぼ一致する。

次項以下においては、消波部の諸元を種々に変えて数

値波動解析法による計算を行い、これらの諸元が K_R^* に及ぼす影響を調べている。なお、計算では波パワー V_S を求めているので、結果もこれにあわせて $(K_R^*)^2$ の形で表すことにする。変化させた構造諸元は、水路幅 B_0 、消波部の長さ B_1 、凹部の奥行き D^* および消波部の反射率 C_R である。

(5) 消波部の割合の効果

図-7は、消波部の割合 B_1/B_0 と水路全体の反射率 K_R^* の関係を示している。ここで、入射波の波長 L に対する消波部の長さ B_1 の比を0.145とし、凹部内の反射率 C_R を0.3で一定とした。また、凹部の奥行きと波長の比 D^*/L を0.145, 0.203および0.291の3種類に変化させた。 D^*/L が0.203の場合には、 K_R^* は B_1/B_0 が

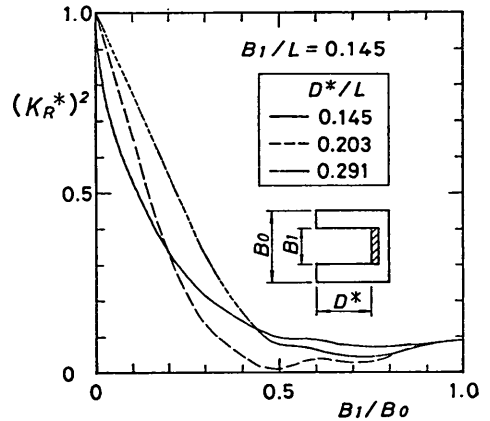


図-7 消波部分の割合の影響

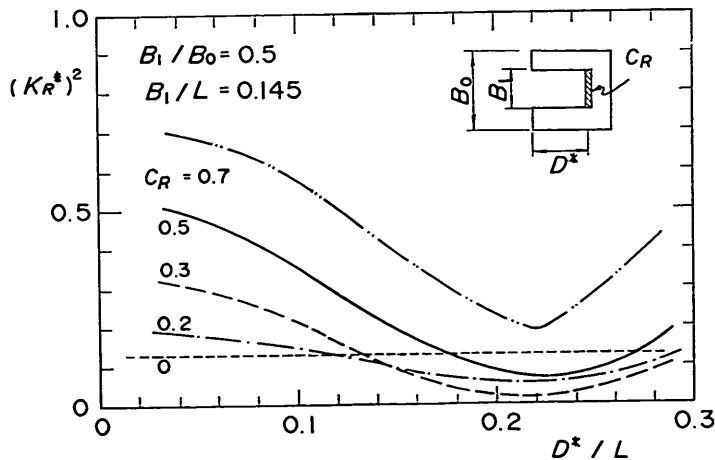


図-8 下げ幅の効果

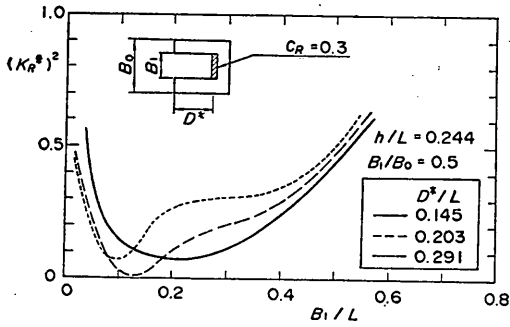


図-9 消波部の長さの効果

0.5付近で極少となる。それ以外の場合は B_1/B_0 が0.5より大きいところで K_R^* が極少となるが、これ以上消波部の割合を大きくしても K_R^* の変化は小さい。したがって、以下においては法線方向のケーソンの長さに対する消波部の長さを50%とした場合について検討する。

(6) 凹部の奥行きの効果

図-8 は凹部の奥行きに対する波長の比 D^*/L と水路全体の反射率 K_R^* の関係を示したもので、消波部の割合 B_1/B_0 を0.5、消波部の長さに対する波長の比 B_1/L を0.145としたときの計算結果である。結果は凹部内の反射率 C_R ごとに線種を違えて示している。計算結果では C_R が0のケースを除いて、全体的に D^*/L が0.2付近で反射率が最も小さくなっている。 C_R が0のケースは凹部奥から波が透過する場合を意味する。この場合 K_R^* は D^* の値にかかわらず一定で、反射率 K_R^* はおよそ0.5である。 C_R の値による反射率の違いをみると、 C_R が0.7から0.3まではその値とともに K_R^* が小さくなる傾向が認められる。また、 C_R が0.3より小さい場合には、徐々に $C_R=0$ の結果に近づく傾向がある。

(7) 消波部の長さの効果

図-9 は波長に対する消波部の法線方向の長さの比 B_1/L が、水路全体の反射率に及ぼす影響を示している。ここでは、 $B_1/B_0=0.5$ 、凹部の奥壁の反射率 $C_R=0.3$ で一定とし、波長に対する凹部の奥行き比 D^*/L を0.145、0.203および0.291の3種類に変化させた。

まず B_1/L が0.1以下、および0.4以上の場合には水路全体の反射率が高くなり、共振集波効果が生かされないことがわかる。また、 D^*/L が大きいほど、 K_R^* が最小となる B_1/L が小さくなっており、凹部内の水域の面積によって共振が発生する条件が決まる傾向が認められる。

2.3 共振集波効果の応用

(1) 応用の方法

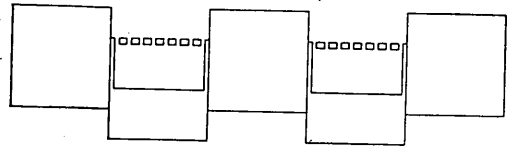


図-10 ケーソン配置による部分消波の例

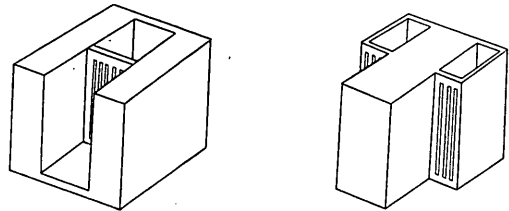


図-11 平面凹型ケーソンと平面凸型ケーソン

前節で述べた計算結果から、共振集波効果は以下の条件において顕著となることが明らかになった。

- ① 消波部の長さ B_1 は波長 L の10~40%とする。
- ② 凹部の奥行き D^* は波長 L の20%程度とする。
- ③ 消波部の割合 B_1/B_0 は0.5程度とする。

一般に消波ケーソンを用いた防波堤の場合、消波対象の周期は現地で6~10s程度となることが多い。ここで水深を仮に10mとすると、波長は50~100mとなる。ケーソンの大きさは設計条件や施工上の理由でいろいろなケースがあるため一概に決められないが、ここでは標準的な例として長さ、幅ともに20m程度の場合を対象として、現地の防波堤に共振集波効果を応用する方法を考える。

まず比較的周期の長い波を対象とした場合は、図-10の平面図に示すように、通常の不透過ケーソンの間に消波ケーソンを後退させる配置方法が考えられる。この場合、消波部の幅が最適になるように、ケーソンの法線方向の長さや連続して並べる函数を調整する。また、マウンドの天端幅を広くすることで、必要な下げ幅を確保することも可能である。

一方、比較的短い周期の波に対してはケーソンの構造を変化させる方法が有効である。図-11の左側は通常の不透過ケーソンの隔壁の一部を消波構造にした場合、右側は通常の不透過ケーソンの両側に消波部を付けた場合である。ここでは、こうした構造を部分消波ケーソンと呼び、ケーソンを上から見たときの平面形状に着目して、前者を平面凹型ケーソン、後者を平面凸型ケーソンと呼ぶことにする。ただし、同図では透過壁に縦スリット構造を用いた例を示しているが、たとえば透過壁を横

スリットなどの他の構造にすることも考えられる。また、透過壁の代わりに凹部内に消波ブロックを入れることも考えられる。すなわち、消波機構を有するものであれば、特にその形式や構造を問わず適用が可能である。

以下、平面凹型ケーソンを例として、部分消波ケーソンの特性を検討する。

(2) 部分消波ケーソンの期待される特徴

これまで述べてきたことで、法線方向に部分的に消波部を持つ場合でも、共振集波効果によって消波部が連続的に並ぶ通常の消波ケーソンと同程度の反射率が得られることがわかる。それ以外の水理特性から見ても部分消波ケーソンは通常の直立消波ケーソンに比べて有利な点がいくつか考えられる。

第一には重量バランスの良さである。直立消波ケーソンでは前部にある遊水室が軽く、重量が後方に集中するため、端趾圧の増大や浮遊時に不安定になり、設計や施工上の欠点になり易い。これに対し、断面的に重量が平均化された部分消波ケーソンではこうした問題は生じない。

第二は、波力低減効果の向上である。前面の不透過部分と凹部奥の後壁に作用する波力に位相差が生じるため、ケーソン全体に作用する波力が小さくなる可能性がある。また、不透過部では波が回り込む効果により、作用波力が減少することが期待できる。

第三には、構造上の特色を生かして、防波堤の新しい要請に応えることが挙げられる。ひとつには、凹部の奥壁を透過構造とすることが比較的容易であることから、海水交換機能を有する防波堤に活用できる。また、越波水の打ち上げを制御することにより、親水型防波堤としても利用できる可能性が考えられる。

以下の章では、まず部分消波による共振集波効果の特性について水理実験で確認する。さらに平面凹型ケー

ソンを例として、部分消波による波力低減効果と滑動安定性について検討する。

3. 部分消波ケーソンの反射・伝達波特性

3.1 実験の方法

(i) 実験水路および模型

部分消波ケーソンに関する反射および伝達波実験は、図-12 に示す小型造波水路で実施した。模型堤体は図-13 の低マウンド型の混成堤とし、ケーソンの平面形状を図-14 のように変化させた。同図の縦方向には、法線方向のケーソンの長さ B_0 に対する消波部の長さ B_1 の比が異なる平面形状を示したものである。ここで、 $B_1/B_0 = 1$ は通常の直立消波ケーソン（全消波：Ordinary Absorption）である。これに対し、部分消波（Partial Absorption）については B_1/B_0 が $1/2$ と $1/3$ の2種類の形状がある。一方、同図の横方向は、右にいくほど透過壁の下げ幅 D_2 が大きくなる平面形状を示している。ここでは遊水室の幅 D_1 を一定として、 $D_2/D_1 = 0, 0.5$ および 1.0 の3種類とした。

透過壁は縦スリット構造とし、その開口率 ϵ_S は 24.5% を標準とした。ここでは開口率 ϵ_S は消波部の全面積に対するスリット開口部の総面積の比（百分率）で定義する。なお、 $B_1/B_0 = 1/3$ に対しては、 ϵ_S が 36.0% および 50% のケースについての実験も行った。また伝達波特性に関しては、 $D_2/D_1 = 1$ で、 $B_1/B_0 = 1/2$ および $1/3$ の部分消波と全消波の結果を比較した。この他に、凹部の奥壁を透過壁とした実験も行っている。この場合のケース等については後述する。

ケーソン模型は耐水ベニア製で、ケーソン内に詰める鉛塊の量によってその重量を変化させることができる。この模型は後で4. で述べる滑動実験でも使用するため、底面にはモルタル版を貼り付けている。水槽内でケー

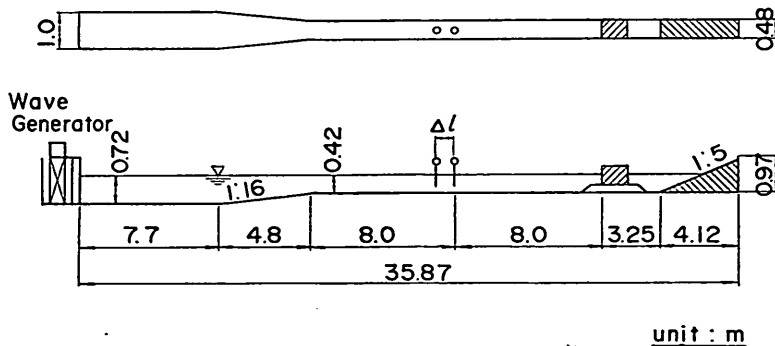


図-12 小型造波水路

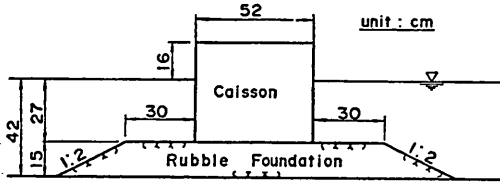


図-13 混成堤の断面図

ンに水平荷重を作用させて摩擦検定を実施したところ、摩擦係数 μ の平均値は 0.5 となった。この値は通常設計

で用いる 0.6 より小さいけれども、これは使用したモルタル版の表面が若干滑らかだったことが理由と考えられる。

一方、ケーソン配置による部分消波の効果に関する実験は、図-15 に示す大型造波水路内の幅の広い水路で実施した。ここではマウンドのない構造とし、波向き直角方向にケーソンを2函並べた。全消波のケースでは、図-16 に示す縦スリットケーソンを2函並べ、部分消波のケースでは図-17 に示すように、消波ケーソンと不透透

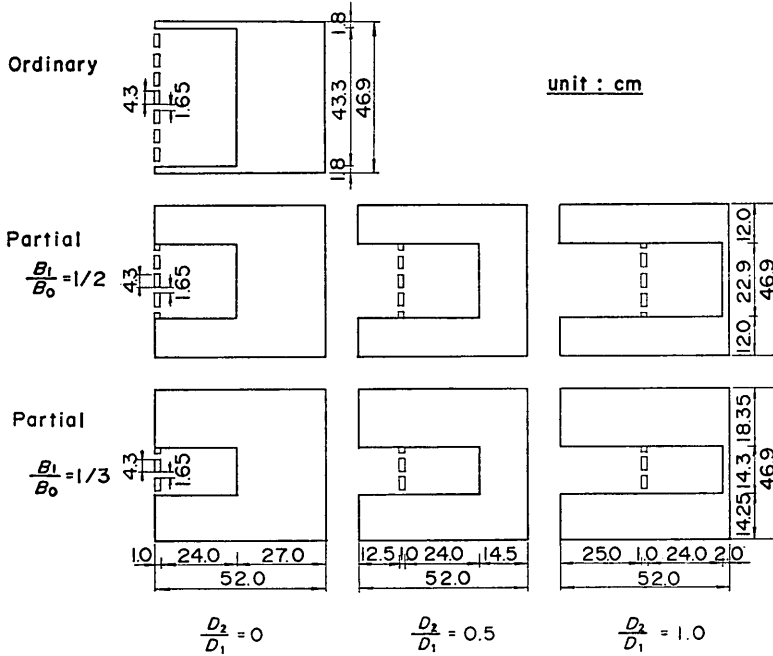


図-14 ケーソンの平面形状

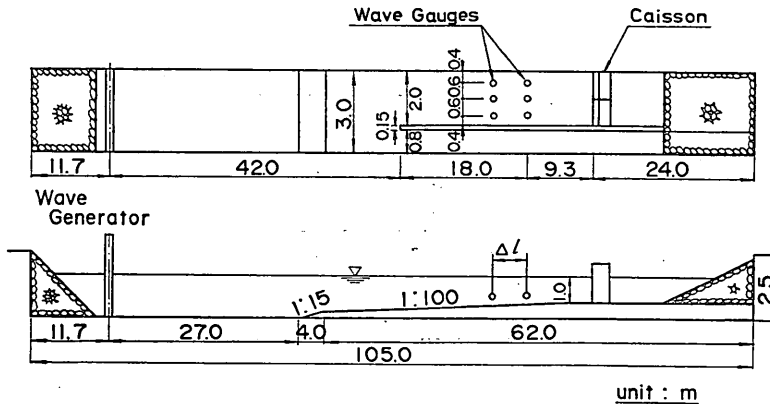


図-15 大型造波水路

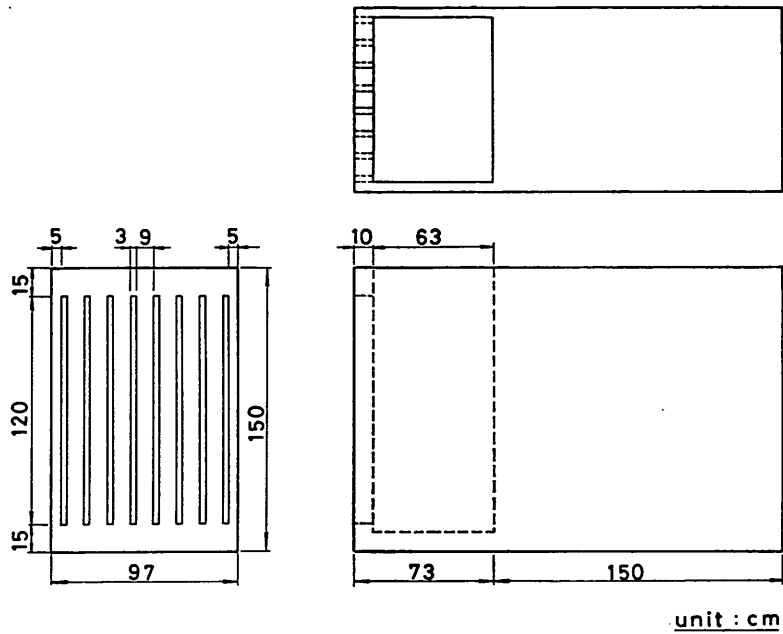


図-16 直立消波ケーソン模型

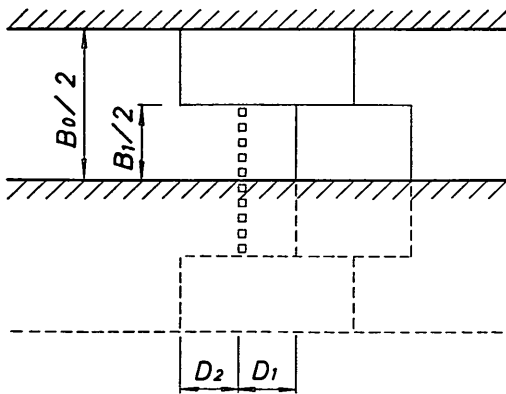


図-17 ケーソンの平面配置

ケーソンを1函ずつ並べて、その相対位置を変化させた。部分消波の場合は、鏡像の原理に基づいて現地での状態の半分を再現したものである。

(2) 実験波の特性

反射波実験はすべて不規則波により実施し、いずれの水路に対しても有義波周期の5種類の実験波を用意した。目標とした周波数スペクトルは修正 Bretschneider・光易型で、造波信号は逆FFT法で作成した¹⁰⁾。各周期に対しては、波群を1種類のみとした。

表-1 実験波の諸元

(A) 小型造波水路実験					
波名	A	B	C	D	E
有義波周期 $T_{1/3}$ (s)	0.86	1.05	1.27	1.76	2.10
有義波高 $H_{1/3}$ (cm)	0~10			0~20	
波数	150				
水深波長比 h/L	0.368	0.264	0.198	0.130	0.106
(B) 大型造波水路実験					
有義波周期 $T_{1/3}$ (s)	1.34	1.57	1.79	2.24	3.35
有義波高 $H_{1/3}$ (cm)	0~30				
波数	400				
水深波長比 h/L	0.356	0.271	0.221	0.162	0.100

一方、伝達波実験および4.で述べる滑動実験では、有義波周期 2.1s の不規則波を用いて、碎波領域も含めた実験を行っている。とくに滑動実験では波群による最高波高の出現特性を考慮するため3種類の波群を用意した。表-1は、以上の実験波の条件をまとめて示したものである。

本実験に先立ち、水路内に堤体模型を設置しない状態

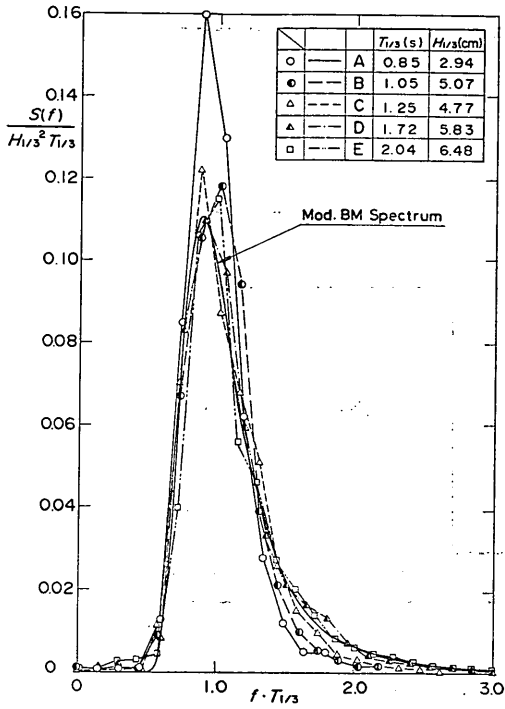


図-18 発生波のスペクトル特性

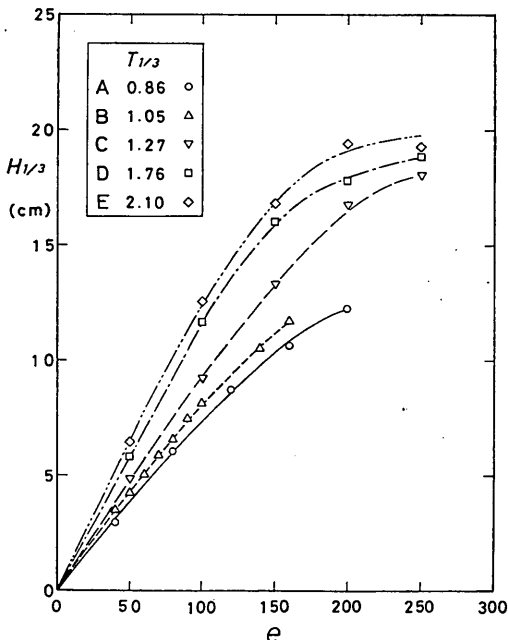


図-19 造波機の振幅と発生波高の関係

で波を測定する通過波検定を実施した。波高計を設置したのは、本実験において堤体を設置する位置および沖側の反射率の測定位置の合計2ヶ所である。これらの不規則波の解析は、データサンプリング周波数を10~40Hz、データ数4,096個で、不規則波実験制御解析装置¹¹⁾で実施した。図-18は、小型造波水路において、堤体模型の設置位置で得られた通過波のスペクトルである。スペクトルは通過波の有義波高および有義波周期を用いて無次元表示したものであるが、おおむね目標としたスペクトルに一致していることがわかる。大型造波水路における発生波でも同様に目標としたスペクトルとの一致を確認している。

図-19は、堤体模型の設置位置での有義波高 $H_{1/3}$ を造波信号の増幅率 e に対してプロットしたもので、小型造波水路における結果である。どの周期に対しても、 e の増大とともに砕波の影響を受けて $H_{1/3}$ の増大率が鈍化する傾向がある。ただし反射波実験で対象とした波高が小さい領域では、 $H_{1/3}$ が e に対して線形的に変化している。

図-20は、 $T_{1/3}=2.1$ sの波について H_{max} と $H_{1/3}$ の関係を示したものである。波群ごとに記号を違えてあるが、 $H_{1/3}$ が15cm以上の砕波後の波については波群ごとのばらつきが多い。実験値の上限に着目すると、図中に実線で示した $H_{max}/H_{1/3}=1.56$ という関係が得られる。

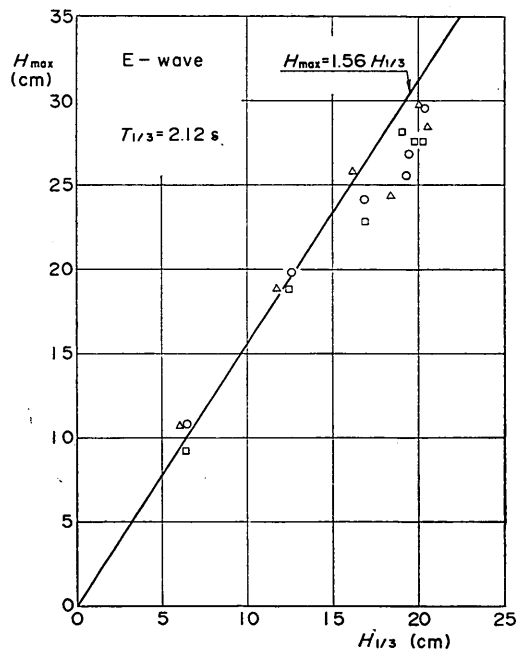


図-20 最高波高と有義波高の関係

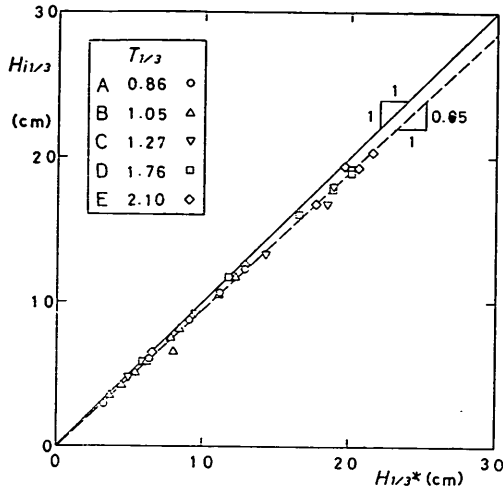


図-21 分離入射波測定位置と模型設置位置の波高の相関

伝達波実験および滑動実験では、砕波領域を含む実験を行っている。

図-21 は小型造波水路における、堤体模型の設置位置での有義波高 $H_{1/3}$ と沖側の反射率測定位置での有義波高 $H_{1/3}^*$ の関係を示したものである。これによると波高の小さいところでは両者に差はみられないが、砕波の影響を受ける領域では模型設置位置での波高が5%程度減少する傾向がある。同様の結果が、他の周期および大型造波水路の場合についても得られている。

(3) 反射率および伝達率の算定法

堤体からの反射率は、沖側に設置した波高測点での水位記録から、合田の方法¹²⁾を用いて計算した。大型造波水路の場合には、前出の図-15に示すように波向きと直

角方向に3組の波高計を設置し、反射率はその平均値を用いた。入射波高は沖側の波高測点で得られた分離入射波高 $H_{1/3}^*$ を、前出の図-21に例示したような波高相関図を用いて、堤体設置位置での入射波高 $H_{1/3}$ に換算した。

伝達波高は堤体模型の後方2.0mのところ、50cm間隔で2台の波高計を設置して測定した。伝達波は非常に小さくゼロアップクロス法で波高を求めると誤差が大きくなるためスペクトルを求め、次の関係を用いて伝達波の有義波高 $H_{T1/3}$ を求めた。

$$H_{T1/3} = 4.0(m_0)^{1/2} \quad \dots\dots(15)$$

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(f) df \quad \dots\dots(16)$$

これより、有義波諸元の伝達率 K_T は次式で定義される。

$$K_T = H_{T1/3} / H_{1/3} \quad \dots\dots(17)$$

3.2 反射特性

(1) 消波状況の目視観察結果

写真-1(a)は $B_1/B_0=0.5$, $D_2/D_1=1.0$ とした部分消波ケーソンの波の作用状況を、水路の上方から連続的に撮影したものである。波浪条件は $T_{1/3}$ が $1.1s(h/L=0.20, D^*/L=0.23)$ で、 $H_{1/3}$ が $12.0cm$ であり、測定された反射率が $0.3\sim 0.4$ の場合である。①は波の峰が不透過部に達している時のようすである。ケーソン前面は急縮部となり流れが流入している。②はスリット前面に波の峰が達した時で、スリットを通過する際に発生した渦が見える。写真-1(b)はケーソンの後方からその状況を示しており、スリットでの渦とケーソン前面から流入する流れのようすがよくわかる。③は凹部奥の後壁に波の峰が達した時の状況である。この時スリットの前面水域はすでに水位が低下しており、スリットの前後の水位差が

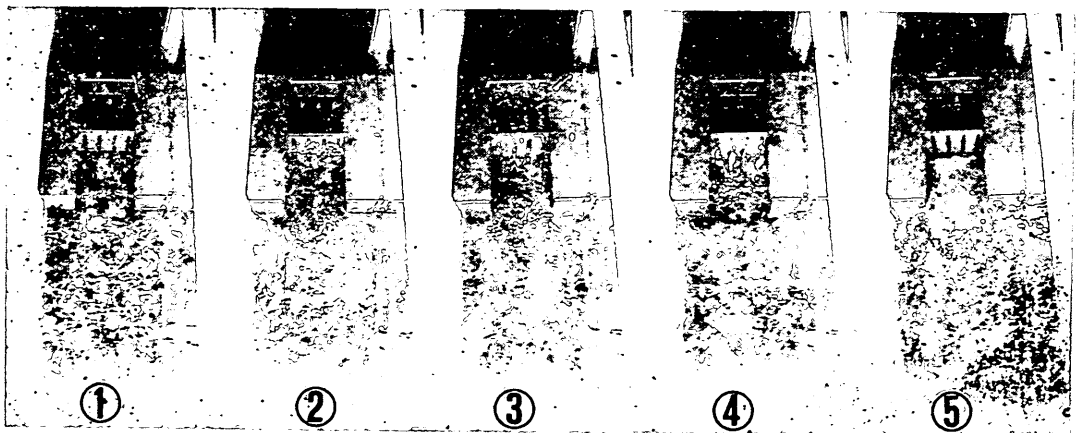
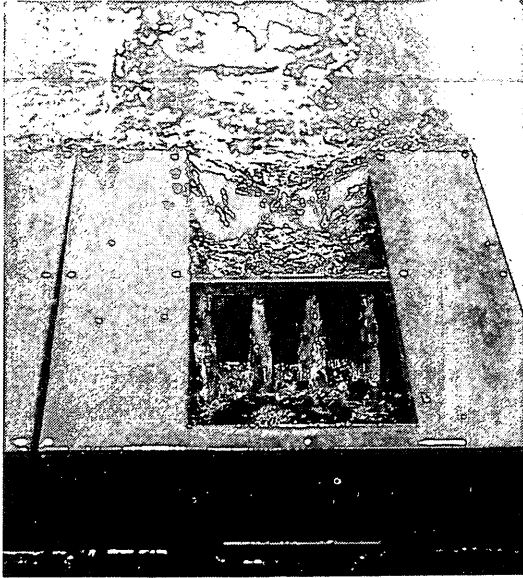


写真-1(a) 部分消波ケーソンへの波の作用状況



(b) ケーソン後方からみた波の作用状況

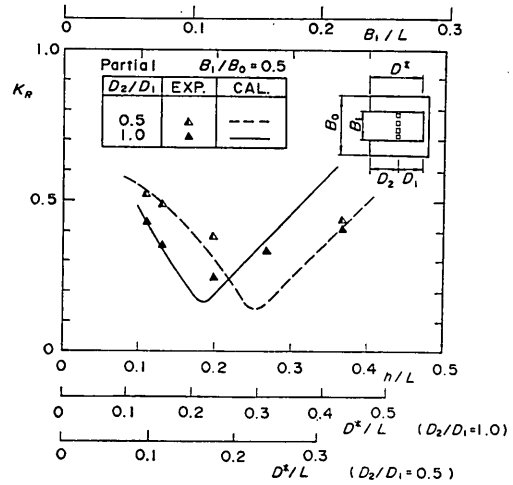


図-23 下げ幅が反射率に及ぼす影響

全体的に反射率が高くなっている。

これに対し 図-23 は、 $B_1/B_0=0.5$ の部分消波ケーソンで、下げ幅 D_2 を順に大きくしていった場合の実験結果である。これによると D_2 が大きいほど、反射率が極小となる h/L の値が小さくなるとともに、極小値自体も小さくなる傾向がある。とくに D_2/D_1 が 1.0 の場合には、 $h/L=0.2$ のときに反射率が 0.25 まで下がり、先に示した全消波の場合に比べて反射率が小さくなっている。同図の上側には、横軸に波長に対する B_1 の比を示してあるが、実験範囲は $B_1/L=0.05\sim 0.22$ であり、2. で示した共振集波の必要条件をほぼ満たしていることがわかる。

図中の曲線は実験条件に対して数値波動解析法を用いた計算結果である。計算では凹部内での損失に相当する奥壁の反射率 C_R を 0.3 で一定とし、凹部の奥行きを D^* ($=D_1+D_2$) としている。図の下側には横軸に D^*/L をとった場合を示してある。計算曲線では D^*/L が 0.2 付近で K_R^* は極小となり、この傾向は実験値と一致している。ただし、計算による K_R^* の極小値は実験値よりもさらに小さくなっている。これは計算では規則波を対象としたため、 $D^*/L=0.2$ 付近での K_R^* の減少傾向が、不規則波を用いた実験結果よりも顕著に現れたためと考えられる。

部分消波ケーソンの場合には、すでに写真-1 で示したようにケーソン前面およびスリット部の 2 箇所において損失が生じている。その効果を凹部奥の壁の反射率で与えた簡易的な計算法によっても、部分消波ケーソンの反射特性をある程度把握できる。ただし、 h/L がやや大

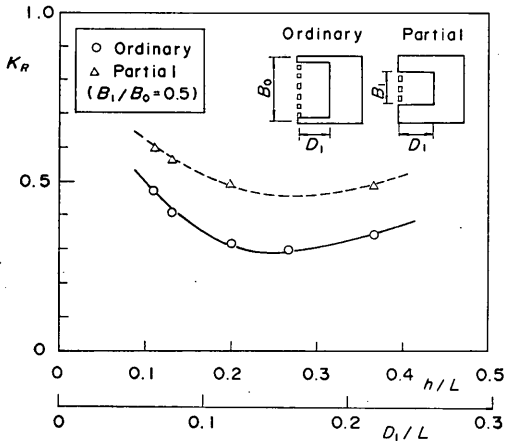


図-22 消波部の長さが反射率に及ぼす影響

大きくなっている。④では遊水室からスリット壁前面に水が流れ出る時に渦が発生している。⑤は引き波時の状況で、ケーソン前面は急拡部となり水が流出するようすがわかる。

(2) 下げ幅および消波部の長さの効果

図-22 は、全消波と部分消波 ($B_1/B_0=0.5$) で下げ幅 D_2 が 0 の場合の反射率を比較したものである。ここでは横軸に水深波長比 h/L とともに、波長 L に対する遊水室の幅 D_1 の比も併せて示している。全消波の場合には、 D_1/L が 0.12 から 0.15 程度で反射率が極小値の約 0.3 になるのに対し、部分消波では消波部分が減少したため

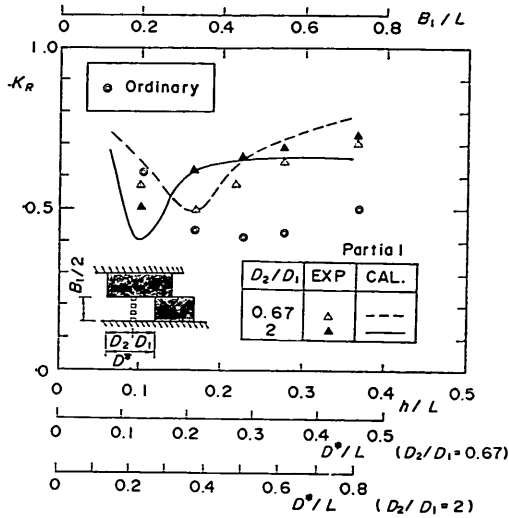


図-24 ケーソンの平面配置による部分消波の効果

きいところでは、実験値と計算値に差が認められる。

図-24 はケーソン配置による部分消波の効果を調べた大型造波水路での実験結果である。 h/L を横軸にとって D_2/D_1 が0.67と2の場合を示している。また、比較のため全消波の場合の結果を示している。 h/L が0.1付近では部分消波によって、全消波の場合より反射率が下がる傾向がある。しかしながら、 h/L がそれ以上の領域では、部分消波によっても全消波の場合より反射率が高くなっている。横軸に B_1/L も示しているが、 h/L が0.2以上では B_1/L が0.4以上となり、2.2(1)で述べたように、この領域では共振集波効果が期待できない。すなわち、配置によって部分消波の効果を得るためには B_1/L の条件に留意する必要があることを示している。

図中の実線および破線は、実験条件に対して数値波動解析法を用いた計算結果である。計算では奥壁の反射率 C_R を全消波の実験結果に基づいて与えた。図の下側には横軸に D^*/L をとった場合を示してあるが、計算曲線はどの下げ幅に対しても D^*/L が0.2付近で極小となっており、実験値の傾向とよく一致している。

(3) 消波部の割合の影響

図-25 は、部分消波ケーソンについて D_2/D_1 を1.0で一定として、消波部の割合 B_1/B_0 が反射率に及ぼす影響を調べたものである。 B_1/B_0 が1/3と1/2の結果を比較すると、両者の h/L に対する傾向は良く似ているが、全体的に消波部分が長い $B_1/B_0=1/2$ のほうが反射率が低い。ただし、 B_1/B_0 が1/3のように消波部分が短い場合にも、かなり広い条件で K_R が0.5以下の低反射構造と

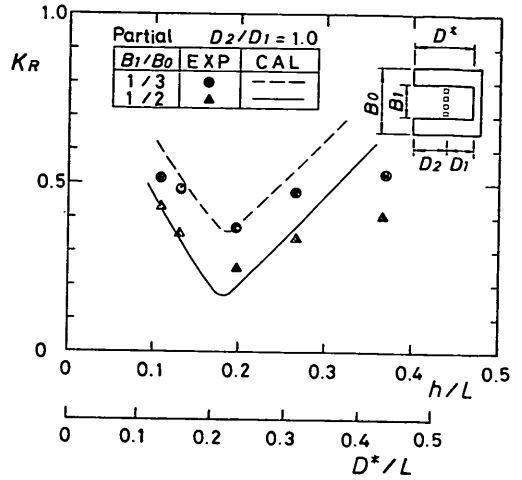


図-25 消波部の割合が反射率に及ぼす影響

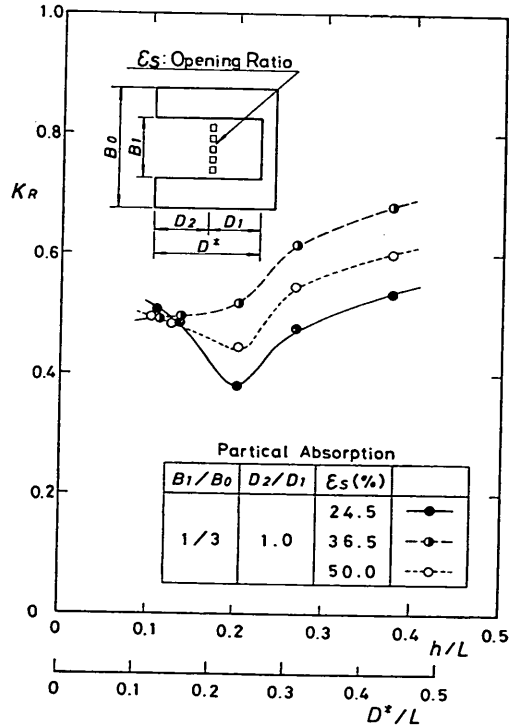


図-26 スリットの開口率が反射率に及ぼす影響

なる。図中にはそれぞれの条件に対する計算曲線を示しているが、短周期側の $h/L=0.37$ の場合を除いて実験値と良く一致している。

(4) スリット開口率の影響

図-26 は、 $B_1/B_0=1/3$ 、 $D_2/D_1=1.0$ の部分消波ケー

ソソにおいて、中央部のスリット壁の開口率 ϵ_S を標準値の24.5%のほかに、36.0%および50.0%の合計3種類に変化させたときの反射特性を示している。同図の横軸は、 h/L とともに凹部の奥行き $D^*(=D_1+D_2)$ の波長に対する比を示している。実験結果ではいずれも $D^*/L=0.2$ 付近に極小値をもつ傾向があるが、開口率 ϵ_S の効果をみると、24.5%から36.0%でいったん反射率が上がったあと、50%でふたたび下がっている。これは開口率によって凹部内で卓越する共振のモードが微妙に変化するため生じたものと考えられる。こうした現象は、消波の機構を単純な反射率で表現した今回の計算法では表すことはできない。今後はスリット壁による消波や反射の機構を取り入れた計算法が必要である。なお、最適な開口率については未確認であるが、部分消波ケーソンのスリット部の開口率としては、通常の直立消波ケーソンと同じように25%程度が適当と考えられる。

3.3 伝達波特性

写真-2は、通常型の直立消波ケーソンへの波の作用状況を示している。この場合は遊水室後壁で水塊が打ち上げられる。これに対して部分消波ケーソンでは、主としてスリット部および凹部奥の後壁で越波が生じ、ケーソン前面での越波水塊がケーソンの上部工に打ち込むことは少ないようである。写真-3は、部分消波ケーソン ($B_1/B_0=1/2$, $D_2/D_1=1.0$) への波の作用状況であるが、凹部奥の後壁での水塊の打ち上げているようすがわかる。

図-27は、部分消波ケーソンで $B_1/B_0=1/2$ および $1/3$ の場合と通常の直立消波ケーソンを対象として、波高伝達率 K_T と相対天端高 $hc/H_{1/3}$ の関係と比較したものである。実験結果は $hc/H_{1/3}$ が大きいものしかないが K_T の変化傾向には構造による影響は認められない。図中の実線は、不透過ケーソンを用いた混成堤に関する合田の実験式¹⁹⁾であるが、今回の実験結果はほぼこれと一

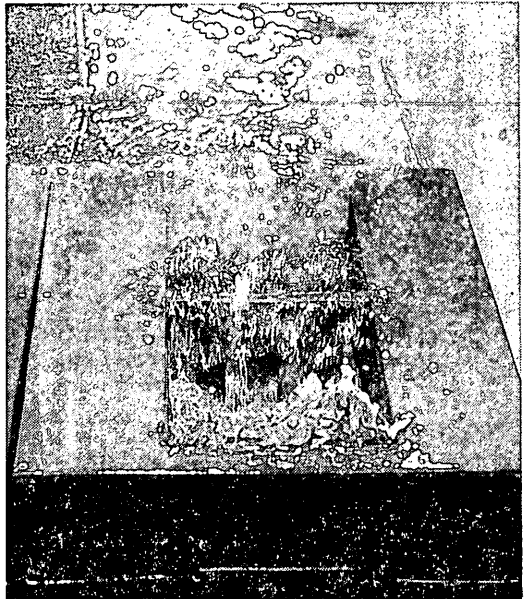


写真-3 部分消波ケーソンの越波状況

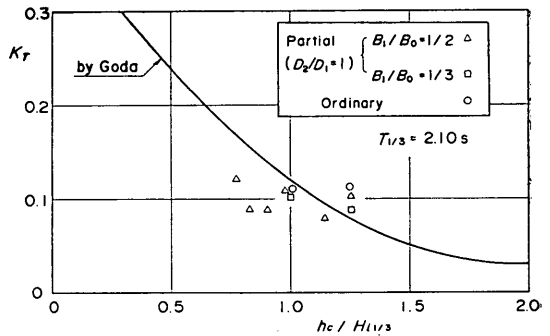


図-27 波高伝達率と相対天端高の関係

致する。

3.4 その他の構造の反射・伝達波特性

部分消波ケーソンについては、すでに示した基本的な構造 (以下、これを基本型と呼ぶ) の他に、凹部奥壁を有孔壁とした透過型と、透過壁背後の遊水室の形状を変えた構造についても検討した。

図-28には、凹部奥壁の開口率 ϵ_T を5%とした透過型の反射率を△で、基本型の反射率を●で示している。実験を行ったモデルは $B_1/B_0=1/2$, $D_2/D_1=1.0$ の部分消波ケーソンで、凹部後壁の開口率 ϵ_T は、ケーソンの全断面積に対する開口部の面積の比率である。両者を比較すると、周期の短い場合には透過型の反射率がやや小さくなる傾向がある。部分消波ケーソンの場合は凹部奥壁を透過性にするのは比較的容易であり、海水交換機

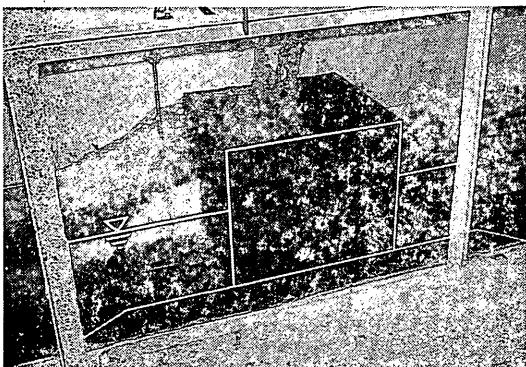


写真-2 通常型の直立消波ケーソンの越波状況

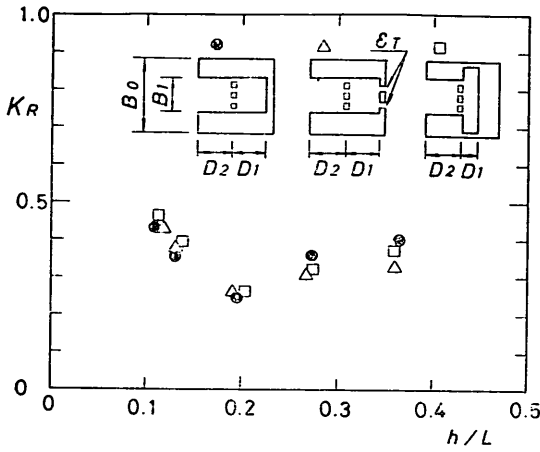


図-28 透過型の反射率

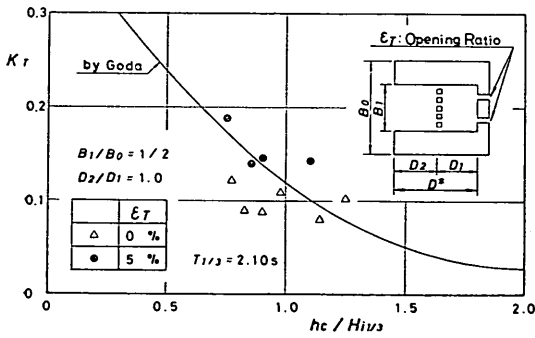


図-29 透過型の波高伝達率

能を有する防波堤に利用できる。一方、同図の□印は遊水室の幅を1/2として、波向き直角方向の長さを2倍にした場合の実験結果である。この場合は周期が長い場合に反射率が若干大きくなっているが、基本型と遊水室の容積が等しいため両者の差は小さい。したがって、ケーソン幅の制約で最適な遊水室幅が確保できない場合には、このように遊水室の形状を法線方向に長くすることで対処できる。

図-29は透過型と基本型の波高伝達率を比較したものである。全体的に透過型のほうが大きくなっているが、同図に実線で示した混成堤（不透過ケーソン）に対する合田の実験式¹³⁾とほぼ一致しており、それほど波高伝達率が高くなってはいないことがわかる。

4. 部分消波ケーソンの波力および滑動安定性

4.1 波圧特性

(1) 測定方法および実験ケース

波圧の測定は、 $B_1/B_0=1/2$ の部分消波ケーソンと、

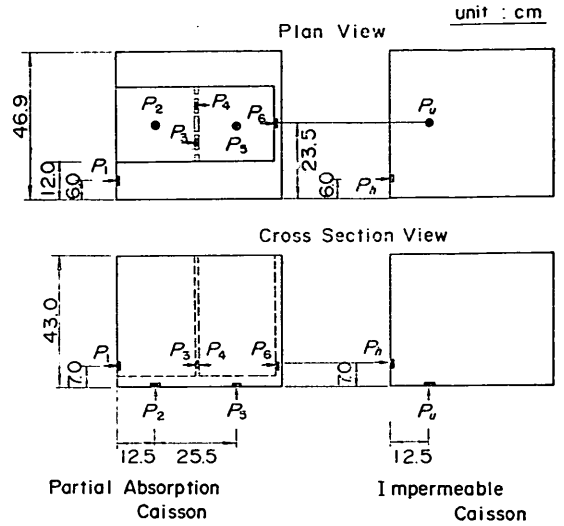


図-30 波圧計の配置図

表-2 規則波実験のケース

周期 $T(s)$	0.9	1.3	1.8	2.1
波高 $H(cm)$	3~13			
測定波数	8	8	7	6
水深波長比 h/L	0.342	0.190	0.125	0.104

高さおよび幅がこれと等しい不透過ケーソンの2種類について実施した。図-30はそれぞれのケーソンの波圧計の設置位置を示している。水平方向の波圧は、主として各面に働く波圧の位相の影響を知ることを目的としたもので、静水面より下の位置に取り付けた。

波圧実験はすべて規則波で行った。実験波の周期は4種類とし、波高は重複波条件に限った。実験波の条件を表-2にまとめて示す。測定した波圧データは当所の解析処理装置(DS-600)により解析した。ここでは、規則波実験によって得られる波圧の時系列データを、谷本・吉本らの方法¹⁴⁾を用いて、一周期ごとの波形データに分割して重ね合わせを行い平均波形データを作成した。これを用いて各chごとのピーク値や同時波圧を求めている。

(2) 波圧データの例

図-31は、周期が短い、 $T=0.9s$ の場合について、部分消波ケーソンの各部に働く波圧の時系列変化を示したものである。ここでは同じ平均波形を2周期分並べてある。前面の p_1 に比べてスリット壁前面の p_3 では、ピークに達する時刻はおおよそ1/3周期、後壁の p_6 ではおおよそ

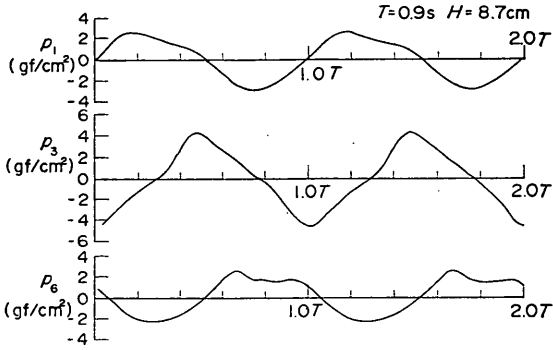


図-31 波圧の時間波形 ($T=0.9s$)

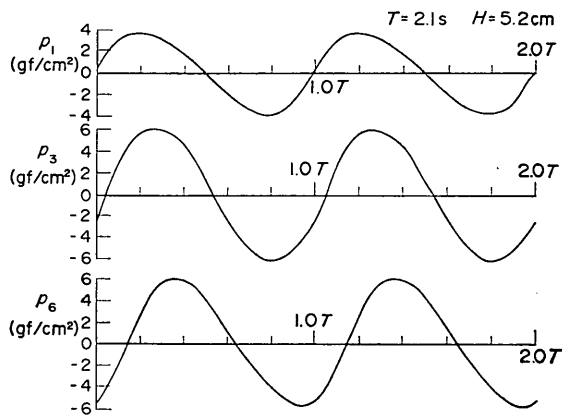


図-32 波圧の時間波形 ($T=2.1s$)

1/2 周期遅れており、こうした位相差が存在することにより、ケーソン全体に働く波力が大きくなることがわかる。これに対し、図-32 に示す周期が長い $T=2.1s$ の場合は、短周期の場合ほど位相差は顕著とならない。しかしながら、ピーク値に達する時刻に差があり各面での波力が同時に最大になることはない。

図-33 は、 $T=1.3s$ の場合を例として、部分消波ケーソンの波圧 p_1 , p_2 , p_3 , p_6 および不透過ケーソンの波圧 p_h , p_u と入射波高 H の関係を示したものである。上の図は水平波圧を示している。図中には合田式による計算曲線も示してあるが、不透過ケーソンの波圧の結果はこれとよく一致している。部分消波ケーソンの場合、遊水室後壁での波圧 p_6 は不透過ケーソン前面の波圧 p_h にほぼ等しいが、前面での波圧 p_1 は p_h よりやや小さい。また、スリット前面に働く波圧 p_3 は p_h に比べてやや大きい。同図の下側に示した揚圧力 p_2 については、不透過ケーソンの揚圧力 p_u より小さいがその差は小さい。 p_1 が p_h よりやや小さいことや、 p_2 が p_u より小さいこ

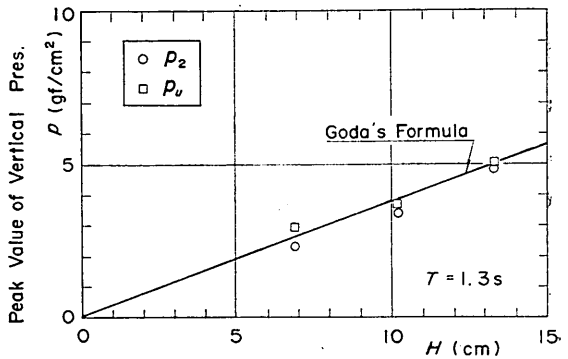
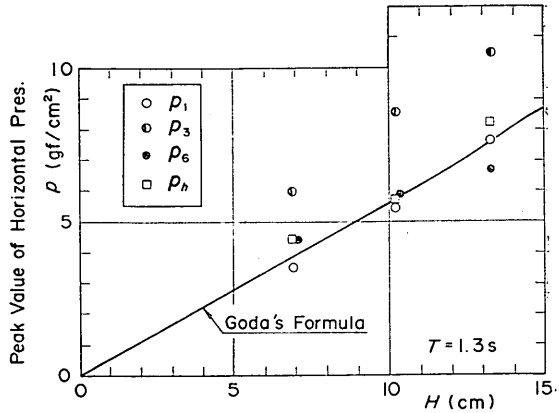


図-33 入射波高と波圧の関係

とは、凹部に波が入り込むことによって前面の波圧が低下するためと考えられる。また、 p_3 が p_h よりも大きいことも凹部に波が集められることによると考えられる。

(3) 各面での波力の低減率

部分消波ケーソンの場合、各面での波圧がピークに達する時刻に位相差が生ずることは、すでに時系列データで示したとおりである。ここでは測定した波圧が各面で均一に分布していると仮定して平均波力強度を求め、その低減率について検討した。対象としたタイミングは、スリット前面での波力がピークとなる時 (Phase I)、および遊水室後壁での波力がピークとなる時 (Phase II) の 2 種類である。

図-34 は前面壁に作用する波力の位相差による低減率を示している。ここで、波力低減率 λ_{Fl} は各タイミングにおける前面での波力強度を、そのピーク値 $(f_F)_{peak}$ で除して求めている。また図の横軸は、波力のピークが生じている位置から前面壁までの距離 D_P を入射波の波長 L で除したものである。 $D_P/L=0.20\sim0.25$ で λ_{Fl} が 0 となり、それ以上では負となっている。破線は $\cos(2\pi D_P/L)$ で示す曲線であるが、おおむね実験値の傾向と

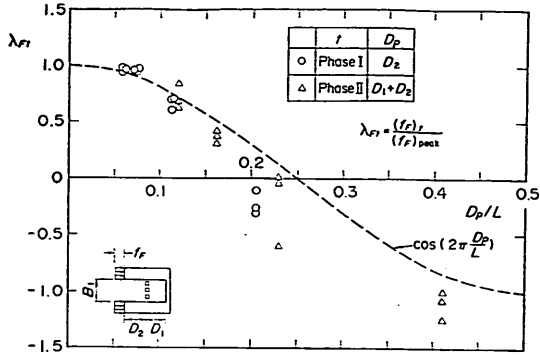


図-34 前面壁の波力に及ぼす位相差の効果

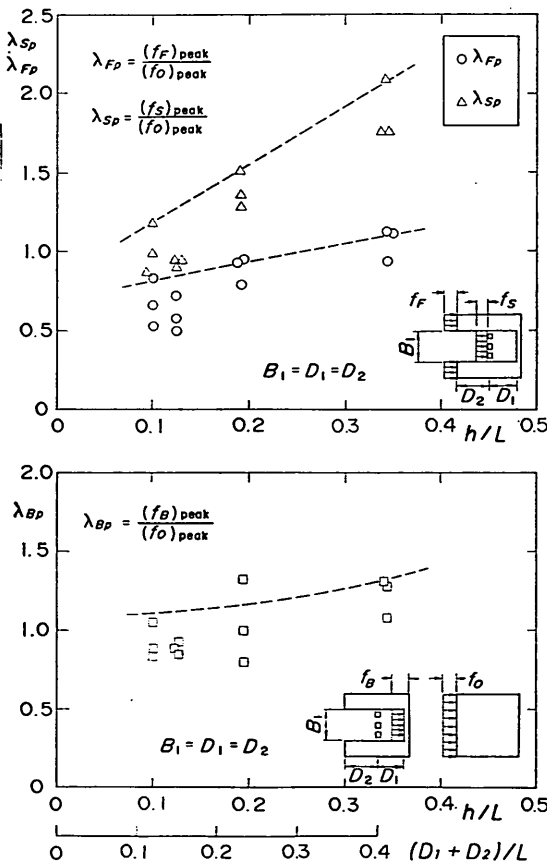


図-35 各部の波力のピーク値の低減係数

一致する。

図-35 は、部分消波ケーソンの各部に働く波力強度(ピーク値)を比較したものである。ここで上の図は、前面壁およびスリット前面の波力強度のピーク値 $(f_F)_{peak}$ および $(f_S)_{peak}$ 、下の図は遊水室後壁の波力強度のピーク値 $(f_B)_{peak}$ を示したものである。これらの値は不透過ケーソン前面の波力強度のピーク値 $(f_0)_{peak}$ で除して無次元化し、それぞれ低減係数 λ_{FP} 、 λ_{SP} 、 λ_{BP} として表した。横軸は比水深 h/L で、 $(D_1 + D_2)/L$ も示している。前面壁の波力は短周期波に対しては λ_{FP} が 1.0 付近の値であり、低減効果が現れないが、長周期側では波力が低減する傾向がある。これは周期の短い場合は凹部への波の回り込みが生じにくいことが理由と考えられる。スリット部の波力については、全体的に低減係数 λ_{SP} が 1.0 以上となり、特に短い周期の場合には 1.5 以上となる。このように短い周期の場合に特に大きくなる理由は明確ではない。一方、遊水室後壁の波力については、データのばらつきが大きい h/L とともに λ_{BP} が若干大きくなる傾向が認められる。これはスリット前面の波力低減係数 λ_{SP} の傾向にある程度似ている。なお、ケーソンの耐波設計に用いる波の周期は消波対象の周期より長く、 $(D_1 + D_2)/L$ が 0.2 より小さい条件となる。このときには、 λ_{FP} が 1 よりやや小さく、 λ_{SP} や λ_{BP} は 1 よりやや大きい値となる。

(4) ケーソン全体に働く波力算定法の考え方
 通常の直立消波ケーソンの設計においては、合田式の波圧係数 α_1 、 α_2 に対する低減率を λ_1 、 λ_2 として、各部の波圧 (p_1 、 p_3 、 p_u) を次式で算定するのが一般的である¹⁵⁾。

$$\eta^* = 1.5 \lambda_1 H_{max} \quad \dots\dots(18)$$

$$p_1 = (\alpha_1 + \lambda_2 \alpha_2) \lambda_1 \omega_0 H_{max} \quad \dots\dots(19)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad \dots\dots(20)$$

$$p_u = \lambda_1 \alpha_1 \omega_0 H_{max} \quad \dots\dots(21)$$

ここに、

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right] \quad \dots\dots(22)$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H_{max}}{d} \right), \frac{2d}{H_{max}} \right\} \quad \dots\dots(23)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left[1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right] \quad \dots\dots(24)$$

部分消波ケーソンでは、Phase I と Phase II の 2 つの位相について、合田式を準用して波力を算定することとし、図-36 に示すような波圧分布を仮定した。ただし低減率 λ_1 、 λ_2 は表-3 のように与えることにする。すなわち前面壁については、 λ_1 を λ_{FE} と λ_{FP} の積で求め、 $\lambda_2 = 1.0$ とした。スリット部の波力低減率 λ_1 は、Phase I では λ_{SP} にスリット部の空隙による受圧面積の減少を考慮し、Phase II では前後からの波圧が互いに打ち消し合うとしたものである。凹部後壁の波力低減率 λ_1 は、Phase I では波面が到達していないので $\lambda_1 = 0$ とし、

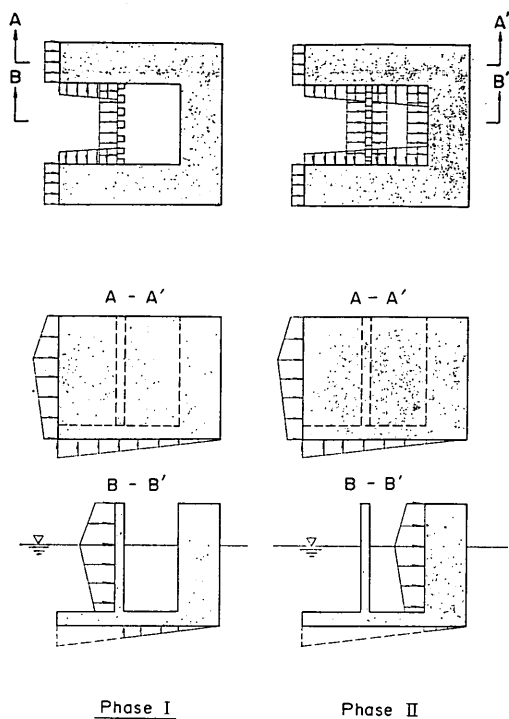


図-36 Phase I および II での波圧分布

表-3 波力低減係数

	Phase I		Phase II	
	λ_1	λ_2	λ_1	λ_2
前面壁	$\lambda_{Fp} \cdot \lambda_{Fl}$	1.0	$\lambda_{Fp} \cdot \lambda_{Fl}$	1.0
スリット壁	$\lambda_{Sp} \left(1 - \frac{\epsilon_S}{100}\right)$	0	0	0
後壁	0	0	λ_{B_2}	0

Phase IIでは $\lambda_1 = \lambda_{Bp}$ とした。また、スリット部および凹部後壁の波力低減率 λ_2 は、通常の直立消波ケーソンと同様に $\lambda_2 = 0$ とした。

今回の実験で対象としたケーソン形状に対しては、すでに示した波力実験結果を用いて波力低減率を計算できる。たとえば、後述する滑動実験の対象周期である $T = 2.1s$ の場合は、 $L = 398cm$ 、 $D_1 = D_2 = 25cm$ であるから、 $D_2/L = 0.06$ 、 $(D_1 + D_2)/L = 0.12$ となる。このとき、図-35 に示した実験結果から、波圧低減率は $\lambda_{Fp} = 0.80$ 、 $\lambda_{Sp} = 1.18$ 、 $\lambda_{Bp} = 1.10$ となる。一方、位相の効果を示した図-34 より、Phase I に対しては $\lambda_{Fl} = 0.93$ 、Phase II に対しては $\lambda_{Fl} = 0.73$ となる。前面壁での波

力低減率 λ_1 は λ_{Fl} と λ_{Fp} の積で求められ、Phase I では0.74、Phase IIでは0.68である。なお、ここに示した低減率は比較的限られた実験条件の範囲で求めたものであり、今後さらに検討が必要である。

4.2 滑動安定性

(1) 実験ケース

滑動実験はすべて不規則波で実施した。有義波周期は $T_{1/3} = 2.1s$ の1種類とし、波高レベルを徐々に大きくしていったつど滑動量を測定したものである。実験は3種類の波群について行い、滑動量はその平均値を用いた。また、滑動量とともに沖側で水位データを測定し、分離入射波高(有義波諸元)を求めている。ここでは、これを前出の図-21を用いて堤体位置での値に直し、さらに図-20の代表波間の関係を用いて最高波高に換算した。

対象とした構造は部分消波ケーソン ($B_1/B_0 = 0.5$ 、 $D_2/D_1 = 1$) と通常の直立消波ケーソンの2種類とした。なお、直立消波ケーソンの遊水部と部分消波ケーソンの凹部の容積は同じにしてある。ケーソンの水中重量は $W_1 \sim W_4$ (63.1kgf ~ 114.1kgf) の4種類を用意し、部分消波ケーソンの場合 $W_2 \sim W_4$ 、通常の直立消波ケーソンの場合 $W_1 \sim W_3$ の、それぞれ3種類について実験した。

(2) ケーソン変位の測定例

ケーソンの変位は、その背後に取り付けた変位計で測定した。今回の条件では、いずれのケーソンについても、押し波による岸方向へ変位しか生じなかったため、波群の作用前と後の変位の差から滑動量を求めている。

部分消波ケーソンについては、滑動変位とともに波圧計により滑動時の各部での波圧を調べる実験も行っている。図-37は、水中重量が50.2hgfのケーソンに、 $T_{1/3} = 2.1s$ 、 $H_{1/3} = 17.5cm$ の波を作用させたときの波圧とケーソン変位の時系列データである。波圧測点は前出の図-30に示したとおりであるが、 p_2 のみ受圧面を反対にして底板を上から押す力を測定している。これによるとケーソンは、スリット前壁での波力がピークとなるPhase Iにおいて滑動が開始することがわかる。その後、遊水室内の水位が上昇し、後壁での波力が最大となるPhase IIのタイミングでは、滑動を止めようとする力が働き、ケーソンの滑動速度が小さくなっている。このとき、スリット壁には前後から波圧が作用するため、その波力が相殺されている。また、遊水部はすべて水で満たされるため、その重量によってケーソンが動きにくくなる。

(3) 最高波高と滑動量の関係

図-38、39は、それぞれ通常の直立消波ケーソンと部分消波ケーソンについて、一波群約150波の作用後の滑

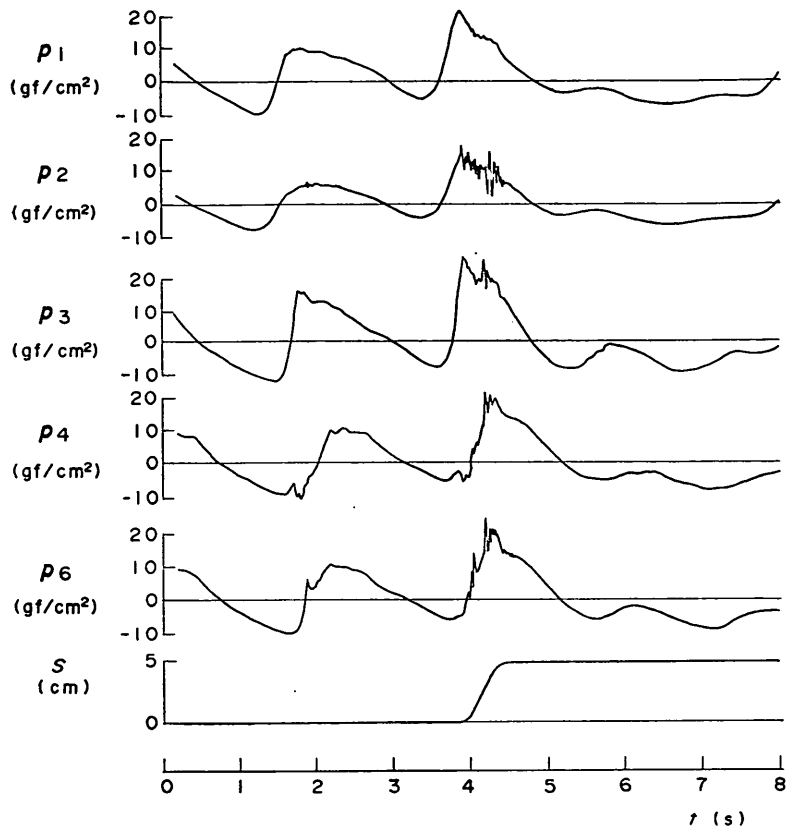


図-37 ケーソンの変位および波圧波形

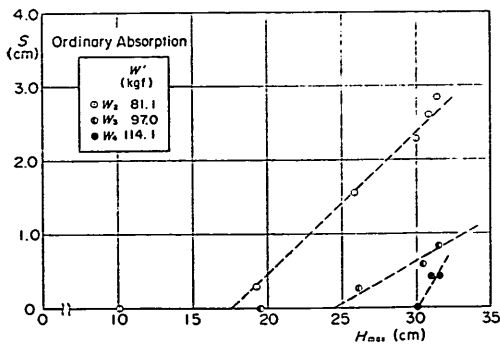


図-38 全消波ケーソンの滑動特性

動量 s を、作用させた波群の最高波高 H_{max} に対してプロットしたものである。 H_{max} が 30cm 程度までは、滑動量が波高に比例して増大する傾向があるが、それ以上の波高では、砕波が作用するため実験結果のばらつきが大きくなる。図中の破線は、実験結果の平均的な傾向を示したものであるが、これと横軸との交点が滑動限界波

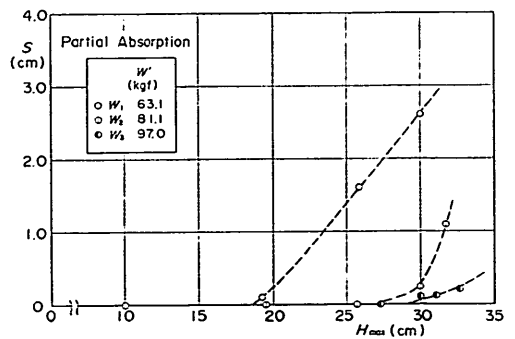


図-39 部分消波ケーソンの滑動特性

高 H_c である。ケーソン重量 W_2 に対する H_c は、部分消波ケーソンの場合 27.0cm、通常の直立消波ケーソンで 17.5cm、またケーソン重量 W_3 に対しては、それぞれ 29.9cm、24.5cm となり、部分消波ケーソンの滑動安定性が高いことがよくわかる。

通常の直立消波ケーソンでは、遊水室の後壁での波力がピーク時において、ケーソン全体の滑動が生ずるのが

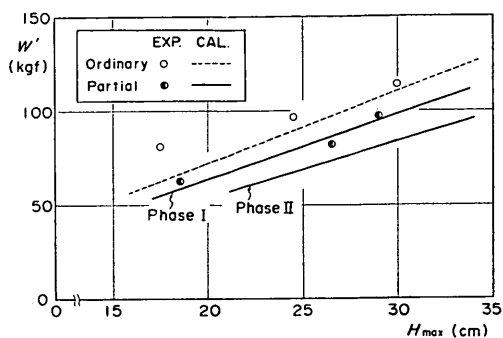


図-40 最高波高と滑動限界重量の関係

一般的である。これに対し部分消波ケーソンでは、すでに図-37で示したように、Phase Iで滑動し始める。その後Phase IIでは変位速度が減少傾向にあり、ケーソンの滑動時間が比較的短い。

(4) 滑動限界重量

一般に滑動限界状態においては、水平合波力 F_H 、鉛直合波力 F_V 、ケーソンの水中重量 W' の間には、以下の関係が成り立つ。

$$F_H = \mu(W' - F_V) \quad \dots\dots(25)$$

したがって、

$$\mu W' = F_H + \mu F_V \quad \dots\dots(26)$$

となる。式(26)の右辺の値を一般に滑動合成波力¹⁶⁾と呼んでいる。部分消波ケーソンに働く波力は4.1で示した方法で算定できる。滑動実験の対象周期である $T=2.1s$ の場合に対して波高と合波力の関係を求め、さらに式(26)を用いて滑動限界重量 W' の関係を求めたのが図-40である。ここでは、部分消波ケーソンに対するPhase IおよびPhase IIの計算曲線とともに、現行の設計法で求めた通常の直立消波ケーソンの計算曲線も合わせて示してある。まず部分消波ケーソンの場合は、Phase IよりもPhase IIのほうが波力が大きくなり、滑動実験での滑動のタイミングと一致している。また、部分消波ケーソンは、通常の直立消波ケーソンよりも波力低減効果が大いことがわかる。図には滑動実験による滑動限界重量もプロットしてあるが、計算結果とほぼ一致している。

以上の検討の結果、部分消波ケーソンの場合は、通常の直立消波ケーソンに比べて、ケーソンの必要重量を今回のケーソン条件では10~15%の低減が可能であり、ほぼその程度ケーソンの幅を縮小できると考えられる。

5. 結論

防波堤の平面形状に着目して、「部分消波」という直立消波ケーソンの新しい構造を考案した。これは消波部

を防波堤の法線方向に部分的に、しかも前面から後退させて配置するものである。この方式は、平面的な凹部での波の共振現象によって波のエネルギーを平面的に集め、消波するところに特徴がある。本報告では、こうした部分消波構造によって生ずる共振集波効果の基本的な特性と、この効果を応用した部分消波ケーソンの水理特性について理論的、実験的に検討した。その主要な結果は以下のとおりである。

- ① 数値波動解析法による計算によって、平面的な共振集波効果が顕著になる条件を明らかにした。凹部の奥行きを波長のおよそ20%としたときにこの効果が最も顕著となる。また、消波部の法線方向の長さは、波長の約10~40%の範囲でなければこの効果は期待できない。
- ② 部分消波ケーソンは、重量バランスの優れたケーソンである。また、通常の直立消波ケーソンと比較しても消波性能は低下せず、かえって向上することが水理模型実験によって確かめられた。また、実験結果は数値波動解析法による計算結果と比較的良く一致している。
- ③ 部分消波ケーソンの場合、ケーソンの法線方向の長さに対する消波部の割合は50%程度が適当である。ただし、これより消波部の割合を小さくすることも可能であるが、反射率はやや大きくなる。なお、凹部内の透過壁の開口率は、通常の直立消波ケーソンと同程度とするのが適当である。
- ④ 通常の不透過ケーソンの間に、従来型の直立消波ケーソンを後退させて配置することによっても、部分消波による平面的な共振集波効果が得られる。ただし、波長が短い波に対しては、消波部の法線方向の長さが波長の40%以下になるように、ケーソンの法線方向の長さや連続して配置する函数を決定する必要がある。
- ⑤ ケーソン背後への波高伝達率については、部分消波ケーソンと通常の直立消波ケーソンの差はみられない。また、部分消波ケーソンの越波は、主として透過壁および凹部奥の後壁で生じ、前面の不透過部での越波は少ない傾向が認められる。
- ⑥ 部分消波ケーソンの凹部奥の後壁を開口率5%の有孔構造とした透過型の場合は、周期の短い条件で反射率が若干低下する。またこの場合波高伝達率はやや大きくなるが、その値は通常不透過ケーソンを用いた混成堤に対する合田の実験式と同じ程度である。
- ⑦ 部分消波ケーソンの遊水室の幅を1/2とし、波向き直角方向の長さを2倍にしても反射特性はほとんど変わらない。したがって、ケーソン幅の制約で最適な遊

水室幅を確保できない場合には、遊水室の形状を法線方向に長くすることで対処できる。

- ⑧ 部分消波ケーソン各部に作用する波圧特性を、規則波実験で明らかにした。前面の不透過壁、中間の透過壁、凹部奥の後壁の、各部に作用する波力には位相差がある。また波力の大きさは前面の不透過壁で小さくなり、中間の透過壁や後壁で大きくなる傾向が認められる。こうした波力の変化を含んだケーソン全体に働く波力の算定法の考え方を示した。
- ⑨ 不規則波による滑動実験を実施し、部分消波ケーソンが通常の直立消波ケーソンよりも滑動安定性が高いことを示した。また、前述した波力算定法を適用して求めた滑動合成波力の計算値が、実験値とよく一致することを確認した。

今回の検討は、すべて直角入射波を想定したものである。今後は、斜め入射波の場合についても検討する必要がある。波力特性については標準的なケーソン形状を対象として検討を行い、波力算定法の考え方を示したものである。今後はケーソン各部の諸元が波力低減率に及ぼす影響を明らかにして、一般的な設計法を確立する必要がある。また、部分消波ケーソンでは凹部へ波が集中するため、この部分の部材に働く波力を明らかにしなければならない。さらに、共振集波の現象については、スリット壁などによる消波機構を含んだモデルによって理論的に検討する必要がある。なお、部分消波ケーソンは、環境や親水性などの新しい要請に対しても有力な構造であるが、この点についてもさらに検討を深めなければならない。部分消波ケーソンの消波部は、今回用いたスリット壁でなくても、他の形状の透過壁としたり、消波ブロックを用いても良い。こうした消波部の違いの影響についても考える必要がある。

本報告のとりまとめに際しては、谷本勝利水工部長に多くの助言をいただいた。また、水理模型実験の実施においては、海洋エネルギー利用研究室の安達崇研究員、ならびに前耐波研究室（現海洋水理部海域環境研究室）宮崎啓司研究員の協力を得た。ここに記して、関係各位に感謝の意を表する次第である。

(1989年6月30日受付)

参 考 文 献

- 1) 佐藤昭二・合田良実：海岸・港湾一わかり易い土木講座第17巻—彰国社，1979年，pp.77~81.
- 2) Ippen, A. T. and Goda Y.: Wave Induced Oscillation in Harbours; Solution of a Rectangular Harbour Connected to the Open Sea, M. I. T., Hydrodynamics Laboratory, Report No. 59, 1963.

- 3) 合田良実：長方形および扇型の港の副振動について—フーリエ変換を用いた一解法，第10回海岸工学講演会論文集，1963年，pp.53~58.
- 4) 高山知司，平石哲也：数値計算と現地観測による港内副振動特性の検討，港湾技研資料 No. 636，1988年12月，70P.
- 5) 伊藤喜行・谷本勝利：新しい方法による波動の数値計算—防波堤周辺の波高分布への適用—，港湾技術研究所報告，第10巻，第2号，1971年6月，pp.97~120.
- 6) 谷本勝利・小舟浩治・小松和彦：数値波動解析法による港内波高分布の計算，港湾技術研究所報告，第14巻，第3号，1975年9月，pp.35~58.
- 7) Horikawa K.: Nearshore Dynamics and Coastal Processes, Univ. of Tokyo Press, 1988, pp. 271~291.
- 8) 渡辺昇・丸山康樹：屈折・回折・砕波減衰を含む波動場の数値解析法，第31回海岸工学講演会論文集，1984年，pp.103~107.
- 9) 磯部雅彦・佐藤典之・杉浦淳・泉宮尊司：港内波高分布の数値計算における境界条件に関する研究，第34回海岸工学講演会論文集，1987年，pp.86~90.
- 10) 谷本勝利・吉本靖俊・高橋重雄：大水深波浪制御構造物に関する水工的研究（その1）—透過性構造（海底設置型）の反射および伝達特性に関する不規則波実験—，港湾技研資料 No. 516，1985年3月，39P.
- 11) 富田英治：不規則波実験制御解析システムについて，港湾技研資料 No. 452，1983年6月，34P.
- 12) 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年12月，28P.
- 13) Y. Goda: Re-analysis of Laboratory Data on Wave Transmission over Breakwaters, *Rept. of Port and Harbour Res. Inst.* Vol. 8, No. 3, Sept. 1969, pp.3~18.
- 14) 谷本勝利・吉本靖俊・岡幸夫：大水深波浪制御構造物に関する水工的研究（その3）—波力特性に関する実験—，港湾技研資料 No.543，1985年12月，61P.
- 15) 運輸省港湾局監修：港湾施設の技術上の基準・同解説，(社)日本港湾協会，1989年2月，上巻 pp.130~132.
- 16) 谷本勝利・原中祐人・富田英治・和泉田芳和：曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第19巻，第4号，1980年12月，pp.3~53.

主要記号一覧

- B_0 : 法線方向のケーソン長さ
 B_1 : 部分消波ケーソンの消波部の法線方向の長さ
 C : 波速
 C_g : 波の群速度
 C_R : 数値計算で与えた凹部の後壁の反射率
 D^* : 部分消波ケーソンの凹部全体の奥行き
 (= $D_1 + D_2$)

D_1	: 部分消波ケーソンの遊水室の幅	p_h	: 不透過ケーソンの水平波圧
D_2	: 部分消波ケーソンの透過壁の下げ幅	p_u	: 不透過ケーソンの揚圧力または合田式の揚圧力
e	: 造波板の振幅	Q_x	: x 方向の線流量
f	: 波の周波数	Q_y	: y 方向の線流量
$(f_F)_{\text{peak}}$: 前面壁の平均波力強度のピーク値	s	: ケーソンの滑動量
$(f_F)_t$: 時刻 t での前面壁の平均波力強度	$S(f)$: スペクトル密度
$(f_O)_{\text{peak}}$: 不透過ケーソン前面壁の平均波力強度のピーク値	T	: 規則波の周期
$(f_S)_{\text{peak}}$: スリット部前面での平均波力強度ピーク値	$T_{1/3}$: 有義波周期
$(f_B)_{\text{peak}}$: 遊水室後壁での平均波力強度ピーク値	t	: 時刻
H	: 規則波の波高	V_e	: 全消波で消費される波パワー
H_I	: 入射波の波高	V_s	: 部分消波で消費される波パワー
H_R	: 反射波の波高	W_{1-4}	: 滑動実験のケーソン重量
H_{max}	: 最高波高	W'	: ケーソンの水中重量
$H_{1/10}$: 1/10最大波高	W_I	: 入射波のパワー (波エネルギー輸送率)
$H_{1/3}$: 有義波高	w_0	: 水の単位体積重量
H_c	: 滑動限界波高	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: 合田式の波圧係数
$H_{I1/3}$: 堤体設置位置での入射波高	Δl	: 分離計算用の波高計間隔
$H^*_{1/3}$: 分離入射波高	ϵ_S	: スリット部の開口率
h	: 堤体設置水深	ϵ_T	: 遊水室後壁の開口率
h_C	: ケーソンの天端高	η_I	: 外海の重複波の波形
K_R	: 波の反射率	η_O	: 凹部の水域内での重複波の波形
K_T	: 波高伝達率	η_S	: 水位
K_R^*	: 数値計算によって求めた水路全体の反射率	κ	: エネルギーの吸収率
k	: 波数 ($=2\pi/L$)	λ_1, λ_2	: 合田式の波圧低減係数
L	: 波長	λ_{Ft}	: 位相差による前面壁での波圧の低減係数
m_0	: 周波数スペクトルの0次モーメント	λ_{Fp}	: 前面壁での波圧の低減係数
n	: 群速度と波速の比	λ_{Sp}	: スリット壁前面の波圧の低減係数
p_n	: 測点 P_n における波圧 ($n=1\sim6$) または合田式の波圧 ($n=1\sim3$)	λ_{Bp}	: 遊水室後壁の波圧の低減係数
		μ	: ケーソンと捨石マウンドの間の摩擦係数