

港湾技術資料

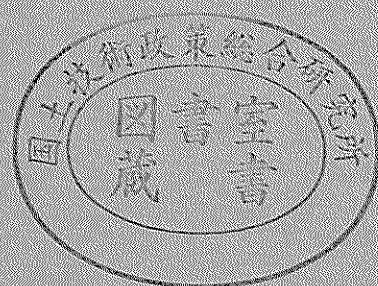
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 720 Dec. 1991

曲面二重スリットケーソン堤の水理特性

高橋重雄
細山田得三
片山忠

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. 既往の研究	4
2.1 曲面スリットケーソン堤	4
2.2 第二港湾建設局の実験	6
3. 実験の方法	8
3.1 実験の種類および実験水路	8
3.2 実験模型	9
3.3 実験波	10
4. 曲面二重スリットケーソン堤の反射・伝達特性	13
4.1 反射率	13
4.2 波高伝達率	13
5. 曲面二重スリットケーソン堤の波圧特性と設計波力	14
5.1 波の作用状況	14
5.2 部材波力	17
5.3 設計波力の提案	19
5.4 ひずみと設計波力	21
6. 滑動安定性	22
6.1 水平・鉛直波力	22
6.2 滑動合成波力	22
7. ま と め	23
参 考 文 献	24
主 要 記 号	24

Hydraulic Characteristics of Curved Double Slit Caisson Breakwater

Shigeo TAKAHASHI*
Tokuzo HOSOYAMADA**
Tadashi KATAYAMA***

Synopsis

Recently, many breakwaters have been constructed in offshore areas where waves are very high. The breakwaters in such seas are required to be stable and also to be gentle the sea nearby. The curved slit caisson breakwater is a kind of perforated wall caisson with an arc-shaped slit wall and a wave chamber. The caisson is very stable against storm waves and can dissipate wave force and wave energy. However, the curved slit caisson has some structural problems in an arc-shaped slit, which comparatively large wave force acts on. Especially wave force outwards from inner side of the water chamber is impulsive.

A curved double slit caisson is invented to improve the curved slit caisson and reduce the impulsive force. The curved double slit caisson has the second vertical slit wall with a rear wave chamber behind the vertical slit. It is expected that the curved slit caisson is more efficient in wave energy dissipation and can reduce wave force significantly.

A series of model experiments have been carried out to investigate the hydraulic characteristics of the curved double slit caisson breakwater. Major conclusions of experiment are as follows:

- 1) The curved double slit caisson can dissipate wave energy very efficiently as if the radius of curved slit wall is extended by the width of the rear wave chamber.
- 2) The design wave pressure distributions are proposed according to the results of model experiments. It is possible to discuss not only the strength of the members but stability of the whole breakwater using the pressure distributions.
- 3) The curved double slit caisson can reduce the impulsive pressure from the inner side of the wave chamber by about 50% compared with the conventional curved slit caisson. Total weight of the curved double slit caisson breakwater required for stability is reduced to 85~90%.

* Chief of Maritime Structure Laboratory, Hydraulic Engineering Division

** Member of Wave Energy Utilization Laboratory, Hydraulic Engineering Division

*** Director General of Yokohama Research and Investigation Office, 2nd Port Construction Bureau

曲面二重スリットケーソン堤の水利特性について

高橋 重雄*
細山田得三**
片山 忠***

要 旨

近年、防波堤はますます高波浪の沖合いに建設されることが多くなってきている。このため、激浪に対する安定性がより高いケーソンの開発が望まれている。さらに港湾空間の高度利用の観点から、消波機能の高い防波堤構造の開発も必要とされている。

曲面スリットケーソンは、こうした高波浪の海域に適用できる直立消波ケーソンとして開発されたもので、船川港に建設されている。曲面スリットケーソンは優れたケーソンであるが、スリット部材に強大な波力が作用するため設計上問題となっていた。

曲面二重スリットケーソン堤は、曲面スリットケーソン堤のスリット部の後部に遊水室を設け、耐波安定性と消波機能を改良したものである。第二港湾建設局横浜調査設計事務所では、小型断面実験を行いその構造の優位性を確認している。

本研究では、さらに大縮尺での詳細な模型実験を実施し、それによる曲面二重スリットケーソン堤の持つ詳細な波圧特性、水利特性の把握、そしてその耐波設計法の確立を行っている。

本研究で得られた主要な成果は以下のとおりである。

- 1) 曲面二重スリットケーソン堤は、曲面スリットケーソン堤に比べて小さな半径の曲面スリット部材でも同程度の反射率が得られる。
- 2) 曲面二重スリットケーソンの部材波力を考える上で考慮すべき2つの位相は、波面の衝突時と遊水室内部からの衝撃波力作用時である。これら2つの位相に対して設計波圧を与えた。この波圧分布は各部材の設計だけでなく、堤体全体の安定性の検討にも用いることができる。
- 3) 曲面二重スリットケーソンの曲面部材に作用する遊水室内部からの衝撃波圧は、曲面スリットケーソンに比して1/2に低減され、堤体重量は10~15%低減される。

1. まえがき

曲面二重スリットケーソン堤(Curved Double Slit Caisson)は、図-1に示すように曲面(一重)スリットケーソン堤(Curved Slit Caisson)に改良を加えた新しい構造の混成防波堤である。曲面スリットケーソン堤は、透過壁と遊水室を持つ直立消波ケーソンの一種で、その透過壁が曲面のスリット壁で、その曲面部材の持つ波力低減効果とスリットの持つ高い消波機能を有する構造である。曲面スリットケーソン堤は1976年より当所で研究開発が進められ、第一港湾建設局によって1985年に秋田

県船川港に建設されている(写真-1)。曲面二重スリットケーソン堤は、第二港湾建設局によって考案されたものであり、曲面スリットの遊水室後壁の部分をスリット壁にし、第二の遊水室を設けることによって消波性能や耐波安定性をさらに向上させようとした構造である。

港湾技術研究所では、設置海域の地形条件や波浪条件に適した種々の新しい構造形式の防波堤の開発を行っている。たとえば、マルチセルラーケーソン堤、上部斜面ケーソン堤、台形ケーソン堤、二重円筒ケーソン堤、半円形ケーソン堤などが基礎的研究を終え、現地に試験的に施工されたり、実際の防波堤として建設されたりして

* 水工部耐波研究室長

** 水工部海洋エネルギー利用研究室

*** 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所長

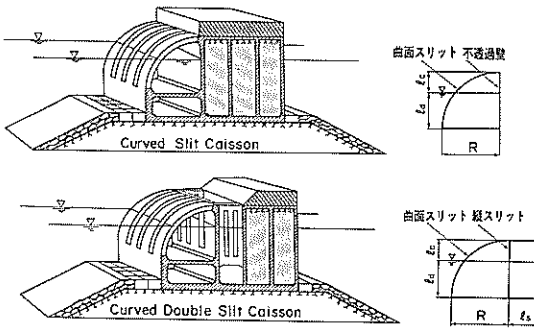


図-1 曲面（一重）スリットケーソン堤と曲面二重スリットケーソン堤

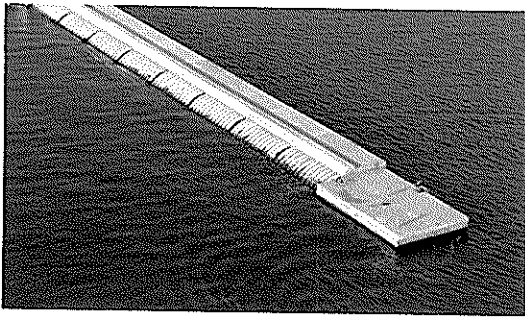


写真-1 曲面スリットケーソン堤（船川港）

いる⁵⁾。曲面スリットケーソン堤は、これらの新しい防波堤のなかでも、最も古いものであり、現地試験を経て上述したように実際に建設されている。曲面スリットケーソンは、それまでの直立消波ケーソンが波高の比較的小さい海域にのみ適用されていたのに対して、高波浪域に対しても適用できる直立消波ケーソンとして開発された。曲面のスリット壁によって、作用する波力の鉛直下向き成分を増大させ、見掛上堤体重量が増大し、堤体の滑動安定性を増すことができる。また、スリット部材がアーチ状であるため外側からの波力に対して、部材としての強度に優れている。ただし、このスリット部材を遊水室の側から押し上げる波力が衝撃的で大きいことなどの問題点があった。特に、消波対象波の周期が比較的に長い場合には、スリット部材が長くなり、スリット部材の強度に問題が生じた。しかしながら、この問題については、スリット部材をPC部材にすることによって一応解決されている。

第二港湾建設局では、曲面スリットケーソンの特徴をさらに向上させ、上述した問題点を克服する構造として曲面二重スリットケーソンを考案し、その基礎的な実験を行った。この実験では、新しい曲面二重スリットケーソンのほかに、曲面スリットケーソンや通常の不透透な

ケーソンなどについてもその機能や波力に関して実験を行って比較している。その結果、図-1に示したような曲面二重スリットケーソン堤が有利な構造であることが明らかとなっている。

港湾技術研究所では、曲面二重スリットケーソンの機能や作用する波力の特性を明らかにし、その設計法を確立するために、大型の二次元断面水理模型実験を行った。本資料は、その結果を報告するものである。本資料ではまず従来の曲面スリット堤の既往の研究成果を概観し、その断面形状の持つ反射・伝達特性、波力特性について整理する。また、曲面二重スリットケーソン堤のこれまでの実験結果についてもその概要を紹介する。そして、これらの研究成果を受けて実施した曲面二重スリットケーソン堤の大型断面水理模型実験に基づいて曲面スリットケーソン堤の反射・越波特性を取りまとめ、耐波設計法を提案する。

2. 既往の研究

2.1 曲面スリットケーソン堤

曲面スリットケーソン堤については多くの模型実験が実施されている。ここではそうした実験結果に基づき、曲面スリットケーソン堤の主要な特性や耐波設計法について述べる。なお、実験に用いた曲面スリットケーソン堤の模型は構造条件を変えたものが種々あるが、一般的には図-1の上段に示した構造である。

曲面スリットケーソン堤の構造を特徴づける条件として、スリットの開口率 ϵ 、スリット部材の曲率半径 R 、曲面スリット部材の下端高さ l_d と上端高さ l_e 、天端高さ h_c 、上部工形状等が挙げられる。既往の研究では、これらの条件の変化による影響が調べられている。

図-2は横軸に R/L をとり、周期による反射率の変

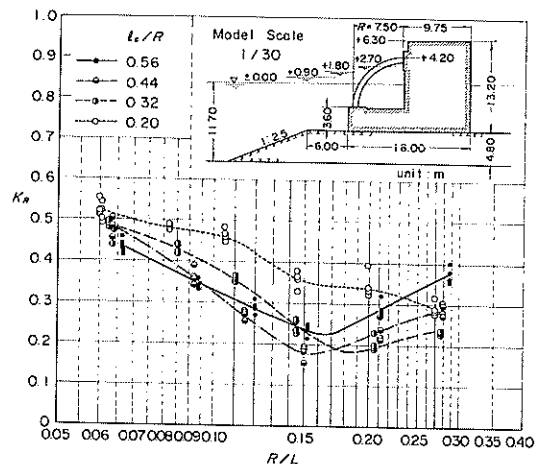


図-2 曲面スリットケーソン堤の反射率

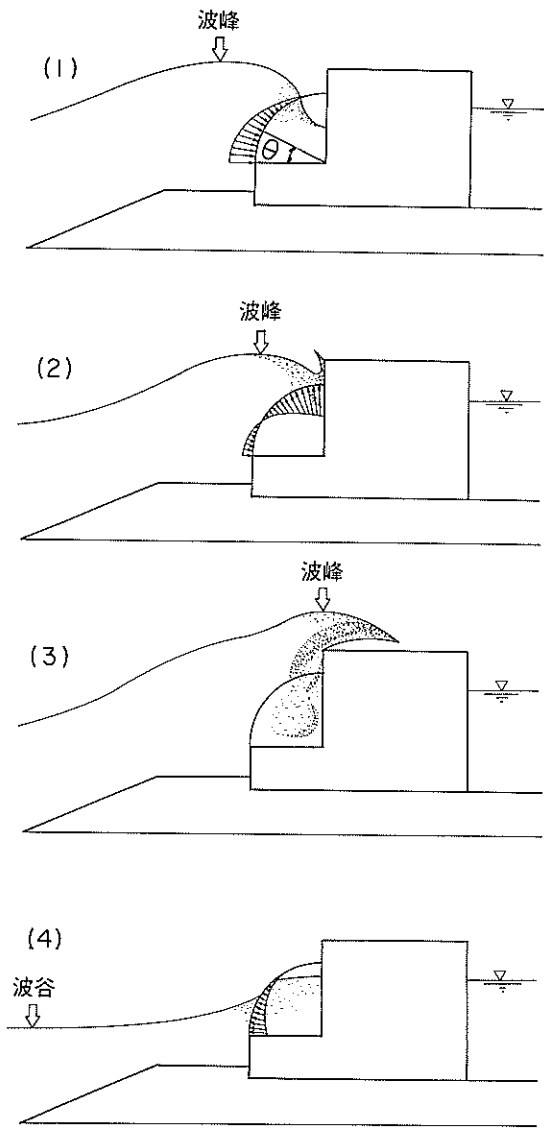


図-3 曲面スリットケーソン堤の波の作用状況

化を示したものである。また周期の他に4種類の水深 ($h=11.7\sim 14.4\text{m}$ すなわち $l_c/R=0.20\sim 0.56$) に対する結果も示している。水深の変化によって、静水面とスリット部材の位置の関係が変わり、反射率も変化すると考えられる。スリット部材の消波機能は、その間隙を通過する水の速度や流入流出量によって決まるため、静水面の高さとスリット部材の高さの関係も重要になる。図ではこれを曲面スリット部材の天端高と部材の曲率半径の比 (l_c/R) で表している。 l_c/R が $0.32\sim 0.56$ では、 R/L が 0.15 付近で極小の反射率をとることがわかる。 l_c/R が 0.2 の場合は、 R/L の値に関係なく他の場合よりも高い反射率をとる。これは静水位に比べて曲面スリット部材が低く、スリットによる消波機能が十分発揮されないことによる。

図-3は、波の作用状況を4つの位相について模式的に示したものである。部材波力を考慮する際に重要になる位相は、波面が曲面スリット部に到達したとき(図-3(1))、波面がスリット背後の直立壁に衝突し、衝撃的な波圧が作用したとき(図-3(2))、そして引き波時(図-3(4))である。波峰が堤体上に乗り上げたとき(図-3(3))には、スリット部材の表と裏から作用する波力は相殺し、部材波力は小さい。図-4には各位相における設計部材波圧分布を示す。これらは設計最大波高に比例する形で表示されているが、特にスリット壁や遊水室の各壁に作用する波力が $1.5w_0H_{max}$ と大きい。部材に作用する波力にはこれらの値をもとに計算し、最も厳しくなる波力を用いる。

図-5には安定性の検討に用いる設計波圧分布を示す。堤体の滑動や転倒に対する安定性は、図-3(3)に示した遊水室後壁に波の峯がある時、最も厳しくなると考えている。すなわち、安定性の検討に用いる設計波力は曲面スリットによる消波部を無視し、その背後のケーソン本体に対し、合式において $\alpha_2=0$ としたときの波圧が働

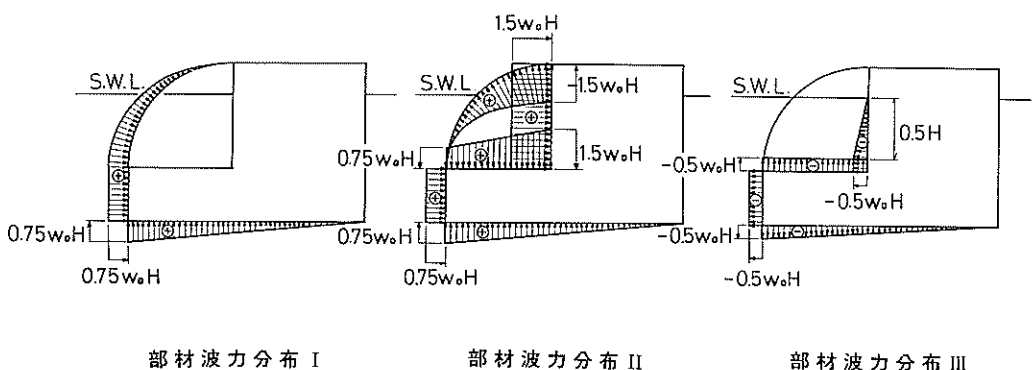


図-4 曲面スリットケーソン堤の部材波圧分布

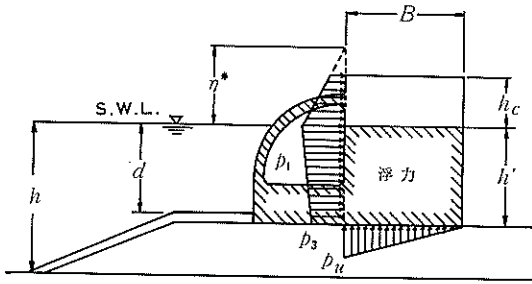


図-5 安定性の検討に用いる仮想波圧分布

くものとして算定する。滑動実験結果によれば、曲面スリットケーソン堤は上記の設計法で十分安全であることがわかった。また滑動限界波高以上の波を作用させた場合、波高の増加に対する滑動量の増加率は混成堤に比べてかなり小さく、曲面スリットケーソンは粘り強い構造であることがわかった。

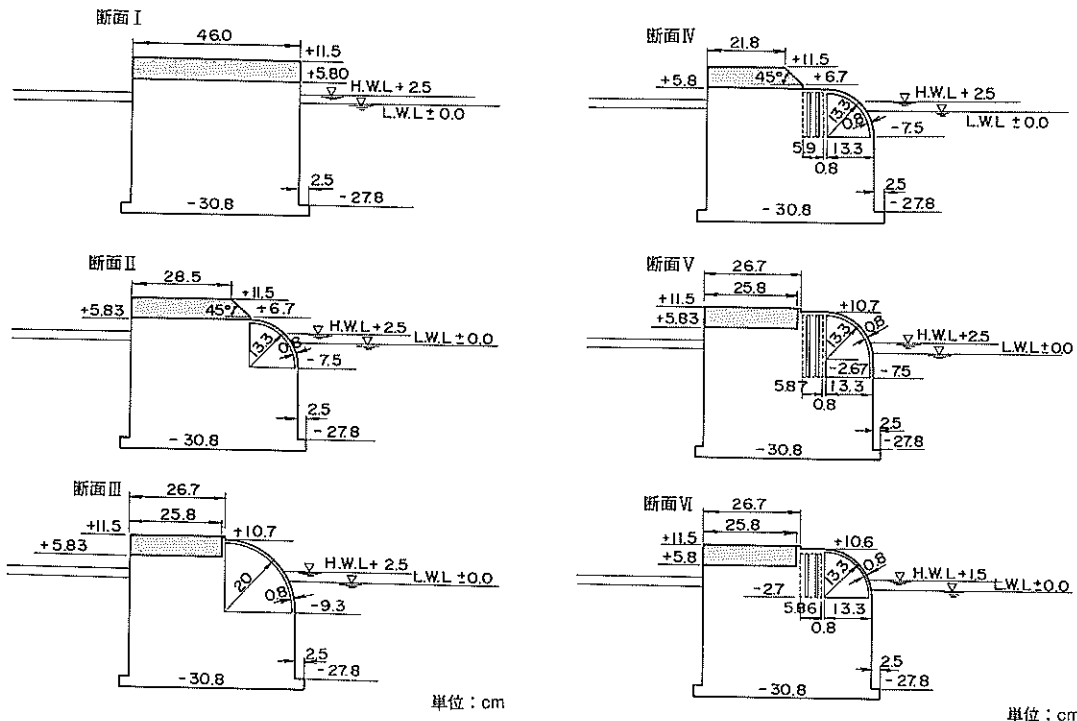
ただし現行設計法では部材波力を検討する際、周期の変化による影響が考慮されていない。また堤体全体の安定性を検討する波圧分布とこの部材波力との関連が明確にされていないことなど2、3の問題点が残されている。

2.2 第二港湾建設局の実験

第二港湾建設局横浜調査設計事務所では、1990年度に山面二重スリットケーソン堤に関する実験を行っている。この実験では、曲面二重スリットケーソンを含む種々の

ケーソンの反射・伝達波特性と波力特性を2次元造波水路(38m×1m×1.5m)で調べている。反射波実験では消波対象の比較的周期の短い不規則波を用い、伝達波実験では設計波に近い長い周期の不規則波を用いた。周期はそれぞれ2種類用いている。波力実験は規則波で行っている。

図-6は実験に用いた6種類の断面形状である。これらはケーソン天端高、設置水深、ケーソン幅などケーソンの全体的な寸法を同一にし、曲面スリット部の構造と上部工形状等を変化させたものである。断面Iは比較のために行った直立の混成堤の断面であり、断面IIが最も基本的な断面で、通常の曲面(一重)スリットケーソン(Curved Slit Caisson: CS)である。断面IIの曲面スリット部材の構造は、消波対象周期(実験周期0.9s, 実験波長1.3m, 現地周期7s, 現地波長80m)の波に対し、所定の反射率(0.4)を達成するため、図-2の実験結果を受けて決定されたものである。図-2では、 K_R が0.4に対応する R/L は0.1となり、 R が13cmとなる。また断面IIは上部工が斜面形となっている。断面IIIも曲面スリットケーソンであるが基本断面よりも R を1.5倍大きくし、曲面スリット部材の上端がケーソン天端まで達している。この断面IIIの場合、 R/L が0.15となり、設計周期に対して最も低い反射率が期待できる。しかし部材の曲率半径が大きくなり、施工面から見ると現実的な断面ではない。



単位: cm

単位: cm

図-6 実験に用いた堤体断面

断面IV, V, VIは、基本断面よりもさらに消波機能を高めるため、断面IIの遊水室の後部に縦スリットを介して遊水室を設けた曲面二重スリットケーソン堤(Curved Double Slit Caisson: CDS)である。これら3種類の曲面スリット部材の曲率半径 R は、基本型である断面IIと同じである。また後部の遊水室長 ℓ_s は、すべて $0.5R$ である。 ℓ_s の値は、全遊水室長($\ell_s + R$)を断面IIIの曲率半径と等しくし、最も反射率が小さくなることを期待して設定されたものである。断面Vは断面IVとほぼ同じであるが、スリット部を堤体の天端まで高くしたものである。またスリット部の下端は基本型と同じ高さになっているため下部は曲面スリットにつづき鉛直のスリット壁となっている。この断面はスリット部分が鉛直方向に長くなり、基本型よりも高い消波機能が期待される。断面VIは、断面IVと同じ曲面スリット部をケーソン天端まで高くしたものである。このためケーソン前面の垂直壁の長さが他の断面よりも長くなっている。各堤体の断面形状の詳細は表-1にまとめて示す。なお図では曲面スリットケーソン堤をCS, 曲面二重スリットケーソンをCDSと表記して区別する。

図-7には堤体形状ごとに反射率の周期(R/L)に対する変化を示す。曲面スリットケーソンの断面IIと曲面二重スリットケーソンの断面IVを比較すれば、IVの方が各周期において反射率は小さく、二重スリットの消波効

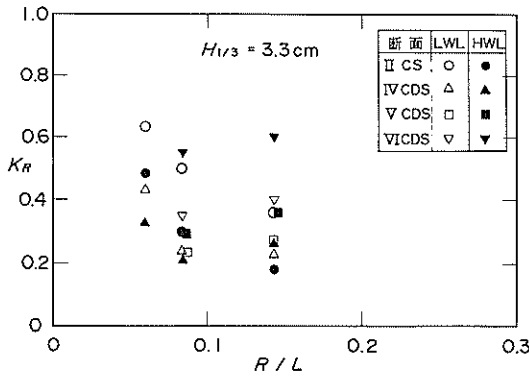


図-7 反射率

果が有効であることがわかる。その効果は、部材の半径 R を後部遊水室長 ℓ_s だけ長くしたものに相当している。

曲面二重スリットの断面VIとIVを比較すれば、断面IVの方が反射率が小さくなる。断面VIの反射率は他の断面と比べてかなり大きい。したがって、曲面スリット部材の静水位に対する高さが反射率に大きく影響することがわかる。

断面Vはスリット部が最も長いので、反射率がかなり小さくなることが想定される。しかしながら断面Vの反射率は断面IVよりもHWLで高く、LWLでは同程度となる。

以上の結果より、同一の R/L に対して最も K_R が小さくなるのは曲面二重スリットケーソン堤のIVタイプとなる。

図-8には波高伝達率(K_T)の $h_c/(H_i)_{1/3}$ に対する変化を示す。図中の点線は、通常の混成堤における実験式による K_T を示す。各堤体とも実験値は、実験式によって推定された K_T よりも小さくなっている。実験条件の範囲では、 K_T は $h_c/(H_i)_{1/3}$ によってほぼ整理され、周期の影響は小さいことがわかる。各断面の中では、断面IIとIVが比較的大きな値となる。これは曲面スリットの上部工が斜面で越波ししやすい構造となっているからである。しかしながら、通常の直立混成堤の設計天端高である $h_c/(H_i)_{1/3} = 0.6$ においても、 K_T は約0.15程度であり、ばらつきがあるものの0.2を越えることはなかった。

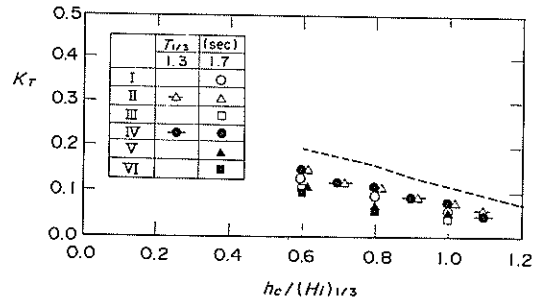


図-8 波高伝達率

表-1 実験断面の詳細(断面形状比較実験)

断面 NO.	ケーソンタイプ	一重スリット部				二重スリット部		上部工形状	
		曲面半径 γ	開口率 ϵ_1	上端高	下端高	開口率 ϵ_2	遊水長 ℓ_s	形状	天端高 h_c
I	直立							直角	11.5cm
II	曲面スリットケーソン	13.3cm	30%	5.8cm	7.5cm			傾斜角45°	11.5
III	曲面スリットケーソン	20.0	30	10.7	9.3			直角	11.5
IV	曲面二重スリットケーソン	13.3	30	5.8	7.5	25%	6.7cm	傾斜角45°	11.5
V	曲面二重スリットケーソン	13.3	30	10.7	7.5	25	6.7	直角	11.5
VI	曲面二重スリットケーソン	13.3	30	10.7	7.5	25	6.7	直角	11.5

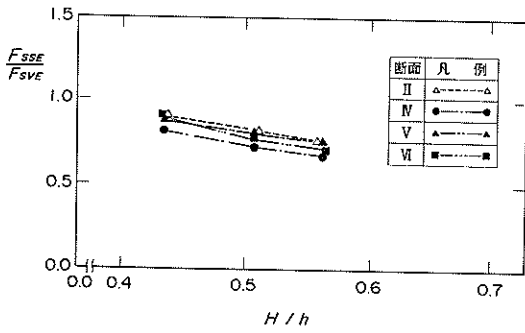


図-9 滑動合成波力

図-9は、滑動実験から求めた滑動限界重量の波高に対する変化である。縦軸は、通常のケーソン混成堤の滑動限界重量に対する各堤体の滑動限界重量の比である。この入射波高の領域では、どの堤体も入射波高の増大とともに滑動合成波力の比は減少している。このことから入射波高が大きくなるほど、通常の混成堤に作用する波力より小さくなってゆくことがわかる。各断面の中では、断面IVがいずれの波高でも最も滑動限界重量が小さい。断面IVが最も有利になった理由は、反射率実験からわかるように、この断面が曲面スリット部材の消波機能を最もよく発揮できる構造であることと、上部工を斜面形状にして上部工に鉛直波力成分が作用するようにしているためと考えられる。

以上の結果から、波力特性と水理特性の観点から断面IVが最も有利な断面形状となっていることがわかった。しかしながら、第二港湾建設局の実験結果は堤体の形状による特性の違いを検討することを目的にしていたため、詳細な波圧計測にもとづく設計波圧分布を提案するまでには至っていない。

3. 実験の方法

3.1 実験の種類および実験水路

曲面二重スリットケーソン堤について、不規則波造波水路を用い以下に示す実験を行った。すなわち、

- ① 反射・伝達波実験
- ② 波力・波圧実験
- ③ 滑動実験

である。この実験では、堤体の構造条件を一定とする代わりに、第二港湾建設局の実験よりも幅広い波浪条件に対する水理特性および波圧特性について調べた。また波圧計やひずみゲージを堤体や各部材に細かく配置し、波圧、波力やひずみの詳細な計測を行った。

実験は概ね不規則波を用い、必要に応じて補足的に規則波で行った。反射・伝達波実験と波力実験は、①潮位(HWL, LWL)、②周期(6周期)、③波高を逐次変化させて行った。なお、波高は各周期に対して6種類を標準としたが、短周期で波高が大きくなり砕波が顕著になる

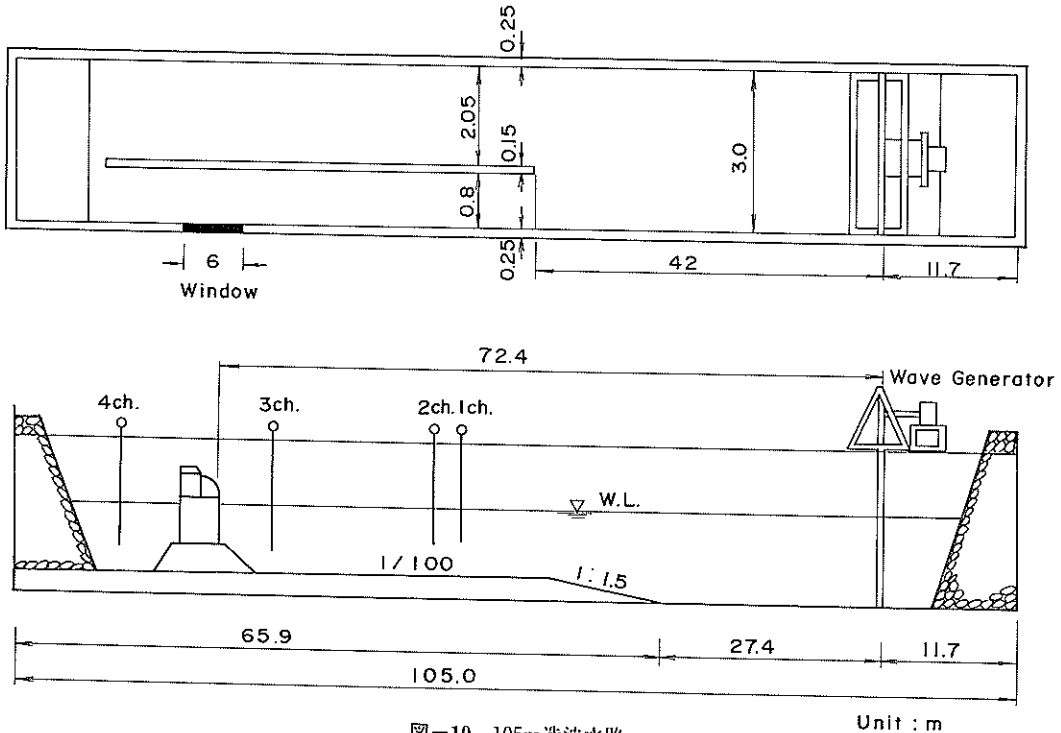


図-10 105m造波水路

Unit : m

場合は、実験のケースから除外した。滑動実験では、上記3つの量以外に堤体重量を変化させている。堤体の滑動量は、変位計および堤体後方に取り付けたスケールによって計測した。堤体重量は、模型ケーソン内の鉛塊の重量を変化させることによって調整している。

実験は、図-10に示す105m造波水路(105m×3m×2m)で行った。水路は造波機から42mの位置で幅79cmと220cmの2つに仕切られている。模型堤体はそのうちの幅79cmの水路に設置した。幅220cmの水路は水路端で消波して、造波機による再反射波の影響を軽減している。水路床は、造波板の中立位置から27.4mまでが水平で、その後の堤体設置位置を経て水路終端の消波装置までが1/100勾配である。

3.2 実験模型

図-11は、実験に用いた曲面二重スリット堤の基本断面である。水位はHWLとLWLの2つを用いた。この断面は、第二港湾建設局の実験結果を受けて、図-6の断面IVと同じ形状となっている。表-2に実験断面の諸元を示す。本実験では、堤体に作用する詳細な波圧および波力を測定するために、第二港湾建設局での実験に用いた模型の2倍の大きさの模型を用いている。上部工は波力低減のために斜面形を採用した。底板はコンクリートモルタル製で、捨石マウンドとの摩擦係数 μ は0.6である。上部工は塩化ビニール製で、それ以外の部分はアクリル板製である。マウンド被覆ブロックには、空中重量0.6kgのピーハイブを用いた。模型ケーソンの幅は77cm

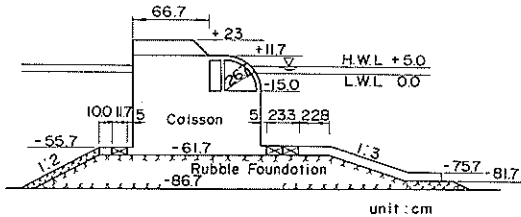


図-11 曲面スリットケーソン堤の基本断面

表-2 実験断面の諸元

		記号	模型諸元
水	深	h	86.7cm
潮	位		+5 cm
ケーソン設置	水深	h'	61.7cm
曲面一重スリット部	開口率	ε_1	30 %
二重スリット部	開口率	ε_2	25 %
曲面一重スリット部	曲率半径	R	26.7cm
二重スリット部	遊水長	l_s	11.7cm
天端	高	h_c	23 cm
スリット天端	高	l_c	11.7cm

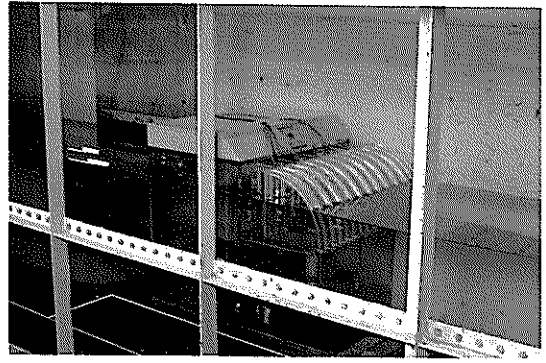


写真-2 曲面二重スリットケーソン堤の実験模型

で、水路内に設置されたとき、模型と側壁の間には約1.0cmずつのすきまを設けている。写真-2は模型の設置状況である。

図-12は、堤体各部のひずみゲージや波圧計、分力計の配置を示す。ひずみゲージは2枚ずつ5カ所に取り付けられている。ひずみゲージが張られた部材は以下の5カ所である。

- ① 下端を自由端とした曲面スリット部材の上端 (S1)
- ② 上端を自由端とした曲面スリット部材の下端 (S2)
- ③ 曲面スリット部材上端 (S3)
- ④ 曲面スリット部材下端 (S4)
- ⑤ 縦スリット部材上端 (S5)

2枚のひずみゲージは部材の両面に張られ、そこで曲げモーメントと軸力を測定することができる。ただし今回の実験では曲げひずみのみを測定している。

図-13(1)および(2)には、片持ち部材に取り付けたひずみゲージ(S1, S2)と、両端固定部材に取り付けたひずみゲージ(S3, S4, S5)の検定結果を示す。図の横軸には、各部材に加えた集中荷重 P をとっている。曲面スリット部材の場合、外側から内側に向けて $\theta=30^\circ$ の方向から集中荷重 P を作用させ、縦スリットの場合は、部材中央に水平に作用させた。縦軸は、各ひずみゲージで計測した曲げひずみの正値をとっている。ここでの曲げひずみは、部材の表と裏のひずみの差をとり、軸力を相殺した後2で除したもので、曲面スリット部材片面の曲げひずみである。各測点における実測値は○, ●, ⊙であり、各々の計算値は実線と点線である。計算値は、各ひずみゲージを取り付けた部材以外の部材をすべて剛体と仮定して求めた。アクリル材の弾性係数 E の値には 3.0×10^7 g/cm²を用いた。

ひずみゲージS1とS2については、実測値と計算値はほぼ一致しており、片持ち部材のひずみを集中荷重 P と作

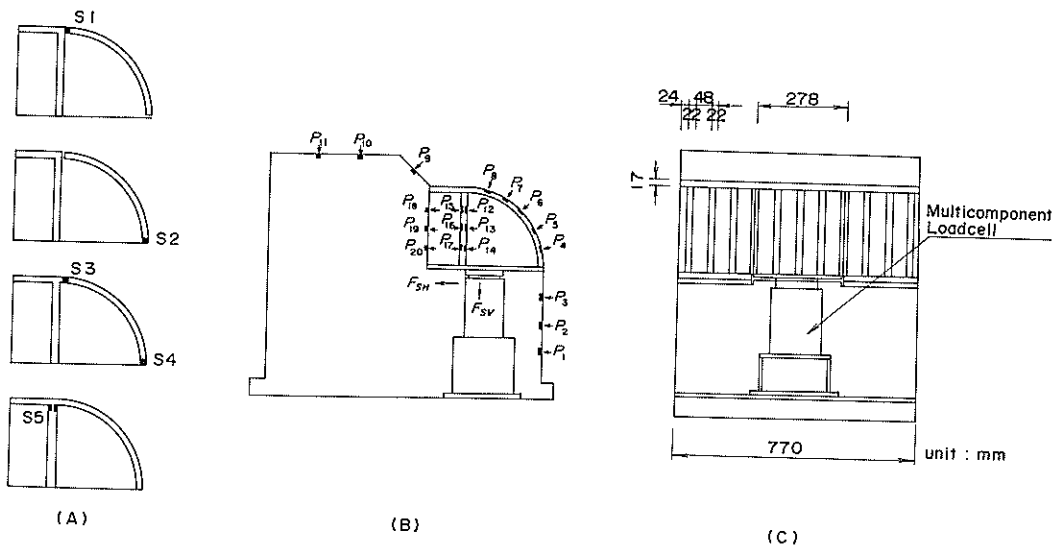


図-12 ひずみゲージ、波圧計、分力計の配置

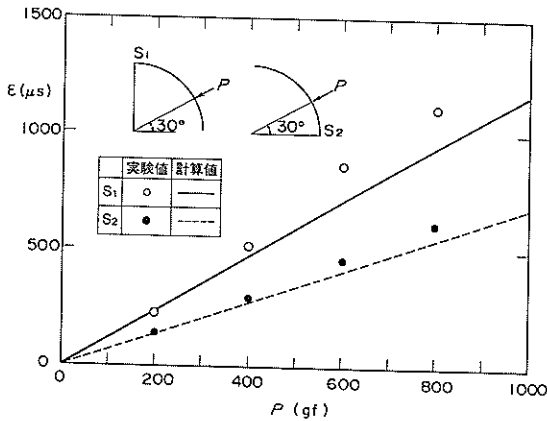


図-13(1) ひずみと集中荷重 (片持ち部材)

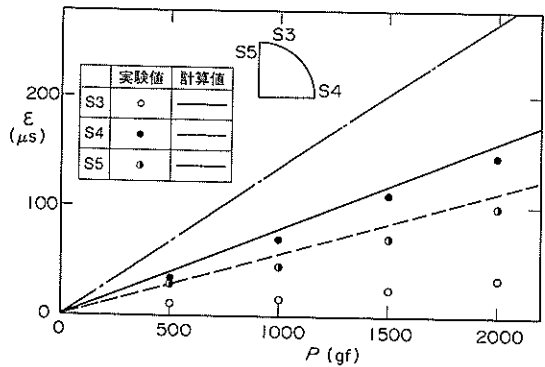


図-13(2) ひずみと集中荷重 (両端固定部材)

用点の角度 θ で説明できることがわかる。S3やS5については計算値の方が実測値よりもかなり大きく、S4では、実測値の方が計算値よりも若干大きい。実験値と計算値の差異の原因は、ひずみゲージを取り付けた部材以外を剛体とした仮定が、模型に対して十分でなかったためである。

また、ひずみゲージを取り付けたスリット部材に衝撃的な荷重を加え、固有振動数を測定した。片持ち部材の固有振動数は、約25Hz、両端固定部材の固有振動数は、約150Hzであった。各部材の固有振動数は衝撃波力によるひずみ値を測定するには低過ぎるため、衝撃波力によるひずみ値を正確に捉えることはできない可能性がある。

図-12(c)に示すように、曲面スリット部は水路幅方向に3つに分割され、中央の部分に作用する波力のみが測定できるようにしている。すなわち、中央の部分は、他

の部分とは分離されて分力計上に載せられている。堤体全体に作用する波力は、分力計によって計測された曲面スリット部に作用する波力と、ケーソン前面の直立部の波圧計によって計測された波圧を合成することによって求めた。揚圧力の合力は、堤体前面の最も下側にある波圧計の値を堤体前端での揚圧力とし、後端での値を0とした三角形分布を仮定することによって求めた。

3.3 実験波

(1) 不規則波の発生法

実験に用いた不規則波の造波信号は、当所大型造波水路に常設されているデータ処理装置(DS-600)を用い、逆フーリエ変換法により作成した。不規則波のスペクトルは修正Bretschneider-光易型である³⁾。

実験波の目標有義波周期は、1.0、1.5、2.0、2.37、2.5、3.0sの6種類で、以下周期の短い方から、A波、B波、C

波、D波、E波、F波と呼ぶ。なお不規則波の解析有効波数は、全実験を通して500波を標準とした。

作成した造波信号は、アナログデータレコーダに収録し、造波機への入力に際しては、造波信号の増幅率 e を調整して波高を変化させた。

(2) 不規則波の解析法

図-10に示した沖側1点(1ch.)と堤体設置位置1点(3ch.)で、堤体を設置していない状態における通過波の波高を容量式波高計を用いて計測した。波高計アンプはパーソナルコンピュータ(HP-9000)に接続されており、 $H_{1/3}$ やスペクトルの形状など入射波の特性量が直接計算できるようになっている。堤体設置後は入射波と反射波を分離するために沖側の2点で波高を計測した。また堤体前面付近の波高と堤体後部での伝達波高を計測するために、各点に波高計を1本ずつ設置した。

(3) 発生波の特性

図-14は、通過波のスペクトルの例である。図の縦軸は、スペクトルを $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ で無次元化したもので、横軸は周波数を $T_{1/3}$ で無次元化したものである。図には目標とした修正Bretschneider-光易型のスペクトルを実線で示している。発生波のスペクトルは、これとよく一致していることがわかる。

図-15は、入力基準電圧と発生波の $H_{1/3}$ の関係を示している。周期が比較の長い場合、入力電圧に対して入射波の $H_{1/3}$ がほぼ直線的に変化していることがわかる。周期が短い場合は、入力電圧を増加しても砕波のため $H_{1/3}$ の増加は鈍くなる。図-16は岸側(2ch.)と沖側(1ch.)の $H_{1/3}$ の相関を示す。波高が大きい領域では砕波の影響を受け、沖側の波高に比べて岸側の波高が若干小さくなっているが、この領域を除けば全ての周期において岸沖の波高の間にはほとんど差がないことがわかる。

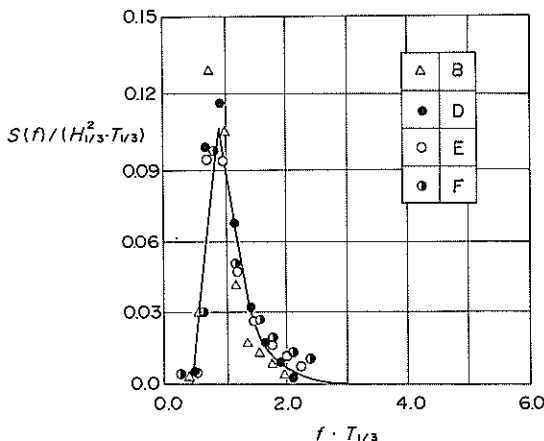


図-14 発生波のスペクトル

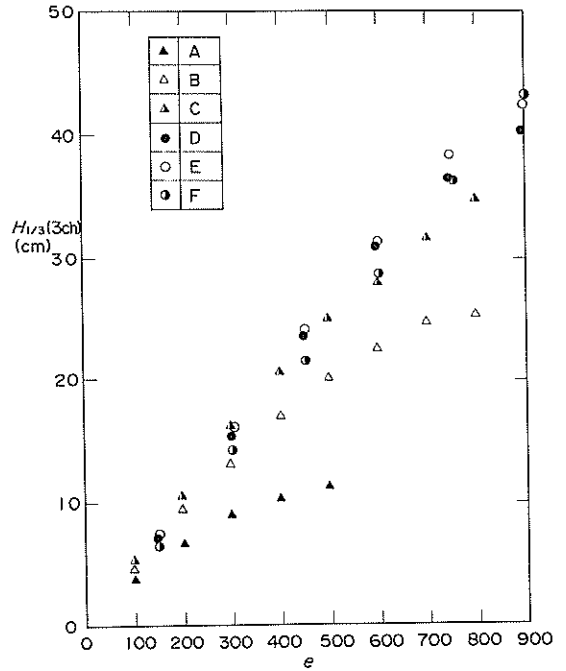


図-15 有義波高と造波信号の増幅率

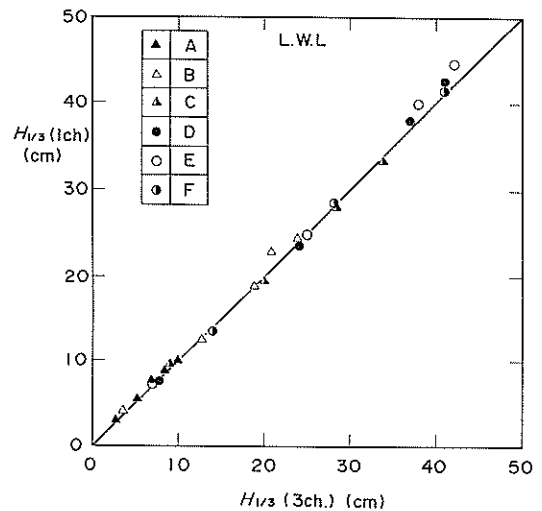


図-16 有義波高の岸沖相関

図-17には発生波の $H_{1/3}$ に対する有義波周期 $T_{1/3}$ を示す。同一造波信号を用いても、 $H_{1/3}$ によって発生波の有義波周期は変化する。 $H_{1/3}$ が小さいときは $T_{1/3}$ は目標値よりも短い、大きくなると目標値よりも長くなる傾向がある。この傾向は他の目標有義波周期の場合にも認められた。以下においては実験波の有義波周期を目標周期で示す。

図-18は、発生波の $H_{1/3}$ と最大波高 (H_{max}) の関係を示す。レーリー分布に基づく H_{max} と $H_{1/3}$ の期待値は最頻値

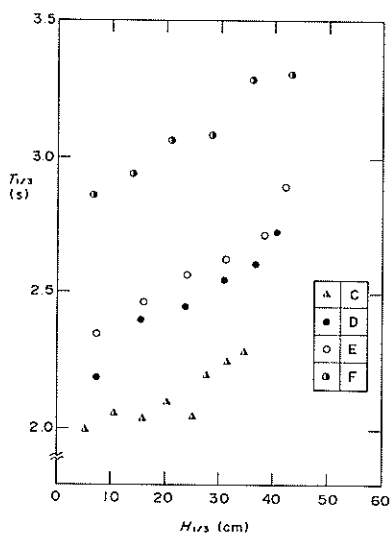


図-17 有義波高と有義波周期

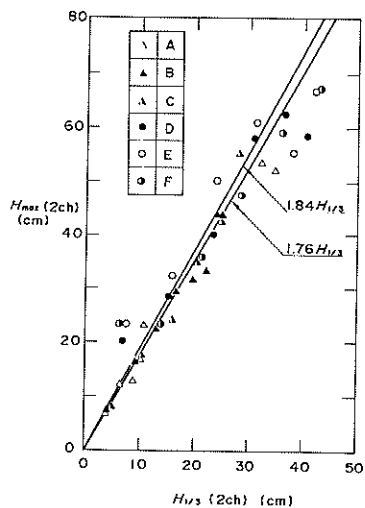


図-18 有義波高と最大波高

表-3 実験波の諸元

不規則波名称	周 期	波 高			
		H. W. L.		L. W. L.	
		有 義 波	最 大 波	有 義 波	最 大 波
A	1.0 s	5cm	8.5cm	5cm	9 cm
		10	17.0	10	18.0
B	1.5	5	9.0	5	12.0
		10	18.0	10	21.0
		15	25.5	15	28.5
		20	31.5	20	35.0
C	2.0	5	8.7	5	9.0
		10	17.0	10	18.0
		15	25.5	15	27.2
		20	34.0	20	35.7
		25	42.5	25	44.9
		30	50.7	30	53.5
D	2.37	10	23.0	10	18.5
		15	30.0	15	27.2
		20	36.7	20	36.2
		25	43.0	25	45.0
		30	52.5	30	54.2
		35	61.7	35	60.5
E	2.5	10	29.5	10	23.0
		15	37.5	15	35.2
		20	44.5	20	46.8
		25	51.0	25	53.7
		30	56.5	30	57.0
		35	61.0	35	57.8
F	3.0	10	16.5	10	20.0
		15	24.8	15	26.5
		20	32.5	20	33.5
		25	40.8	25	41.0
		30	48.8	30	48.0
		35	57.0	35	55.2

で1.76, 平均値で1.84である。測定値はばらついているが、全体としてはほぼ理論値と一致している。実験は碎波が生じる範囲まで行っており、 $H_{1/3}$ が30cmよりも大きくなると H_{max} の増加が鈍っている。表-3には実験波の諸元をまとめて示す。

4. 曲面二重スリットケーソン堤の反射・伝達特性

4.1 反射率

図-19(1)および(2)は横軸にスリットの半径と波長の比(R/L)をとり、 LWL と HWL での反射率(K_R)の変化を示したものである。横軸には実験周期を併せて示している。第二港湾建設局の実験(図-7)に比べて R/L が小さい範囲を中心に実験している。 R/L が小さい領域では、 R/L が増大するほど K_R は小さくなる。 R/L が0.08を越える領域では、図-7と同様に R/L の増大にともなう K_R の減少は緩やかになり、さらに R/L が小さくなると若干増加する傾向も現れている。曲面二重スリットケーソン堤では、 R/L が0.1程度で K_R が極小値をとることが推測される。第二港湾建設局の実験においても同様の傾向がみられた。

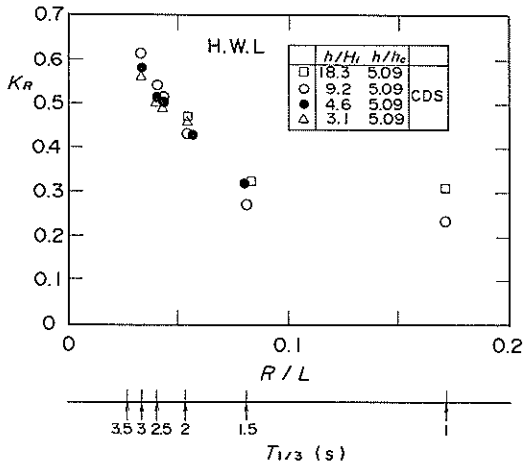


図-19(1) 反射率 (HWL)

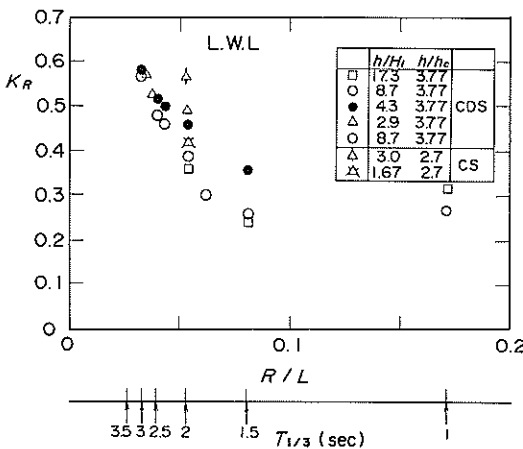


図-19(2) 反射率 (LWL)

ットケーソン堤では、 R/L が0.1程度で K_R が極小値をとることが推測される。第二港湾建設局の実験においても同様の傾向がみられた。

図-19(2)には比較のため曲面スリットケーソン堤のデータも示している。他のパラメータが異なるため一概には言えないが、同一の R/L に対して、曲面二重スリットケーソン堤の方が反射率が低くなる。これは曲面二重スリットケーソン堤では背後の遊水室によって、消波機能が増大したためと考えられる。曲面二重スリットケーソン堤の反射率は、曲率半径を $(R+l_s)$ とした曲面スリットケーソン堤の反射率とほぼ等しくなる。例えば、曲面二重スリットケーソン堤は R/L が0.1程度で極小値をとり、このとき $(R+l_s)/L$ は0.15となる。図-2で示したように、曲面スリットケーソン堤の反射率の極小値は R/L が0.15程度のときであり、両者がほぼ一致している。

4.2 伝達率

図-20(1)および(2)には天端高と入射波の有義波高の比 h_c/H_i に対する波高伝達率(K_T)の変化を示す。ただし(1)および(2)はそれぞれ HWL と LWL に対応する結果であ

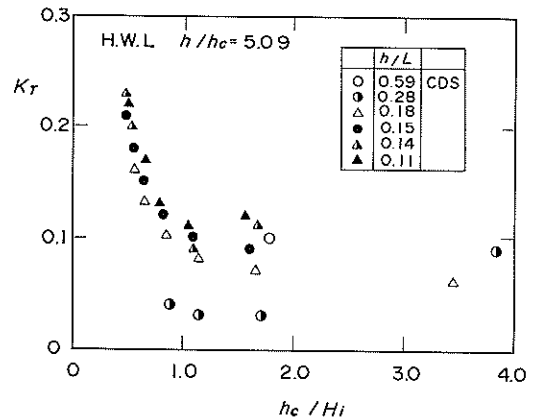


図-20(1) 波高伝達率 (HWL)

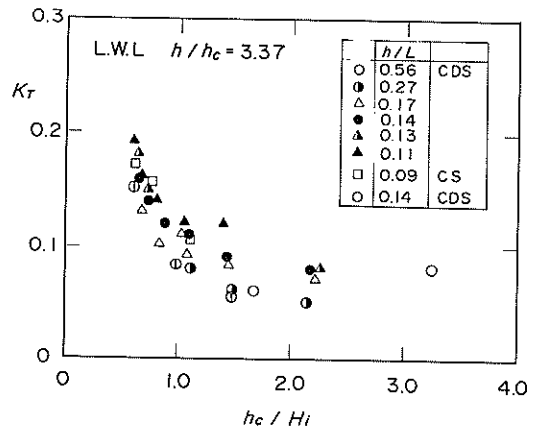


図-20(2) 波高伝達率 (LWL)

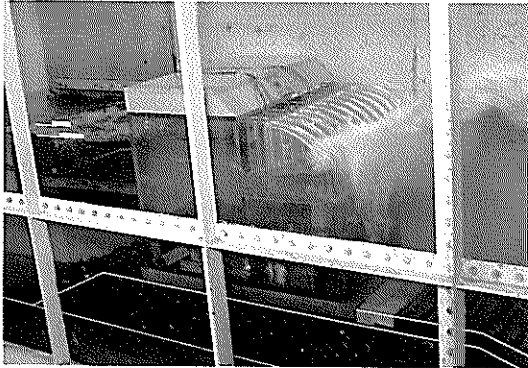
る。 K_T については周期の相違による変化はそれほど明瞭ではない。また、 h_c/H_i が大きくなるほど小さくなっている。通常の混成堤の設計波高である $h_c/H_i=0.6$ 付近では、 HWL および LWL ともに波高伝達率は0.17程度となった。ただし h_c/H_i が大きくなると K_T はかなり小さくなり、マウンドを透過する波やケーソンの側壁との隙間からの伝達波のため、完全には0にはならず、データがばらつく傾向が現れた。図には曲面スリットケーソン堤のデータもプロットしているが、ほぼ曲面二重スリットケーソン堤と同じ傾向を示しており、消波部の構造条件

の違いによる K_T の差は小さいと思われる。

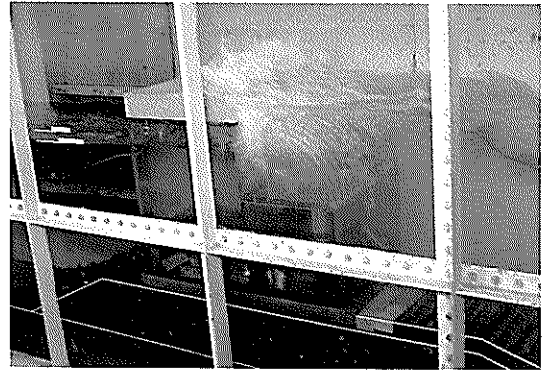
5. 曲面二重スリットケーソン堤の波圧特性と設計波力

5.1 波の作用状況

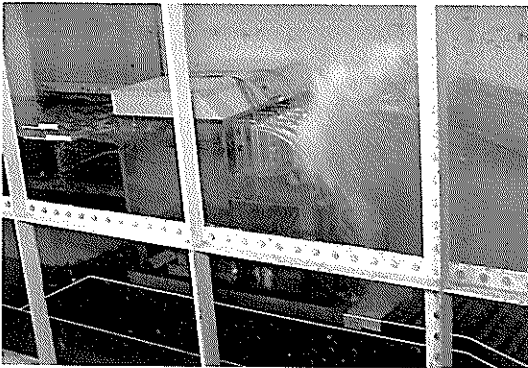
写真-3は、波の作用状況の変化を時間を追って示すものである。波面が曲面スリット部材の下部に到達し(1)、その後曲面スリット部全体に波面が衝突している(2)。さらに波面は気泡を巻き込みながら遊水室の後壁や上部工にも衝突し(3)、天端上に乗上げている(4)。(5)は、引き



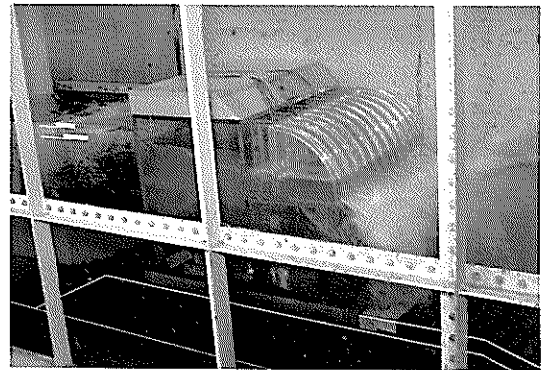
(1)



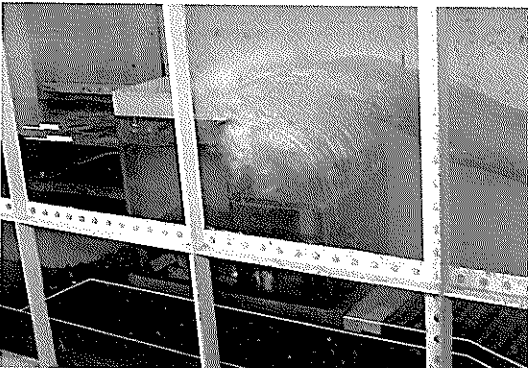
(4)



(2)



(5)



(3)

写真-3 曲面二重スリットケーソン堤への波の作用状況

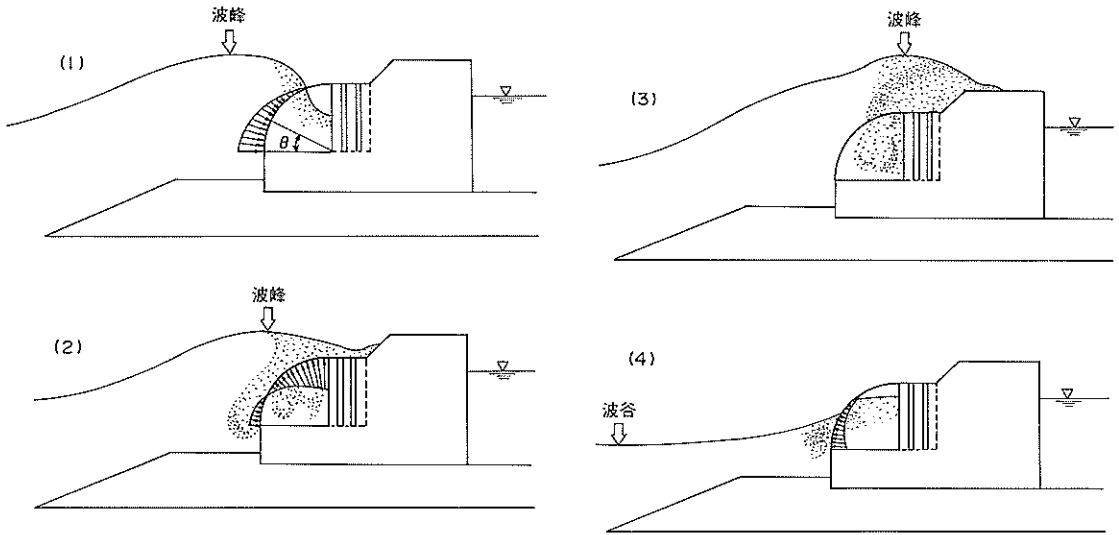


図-21 曲面二重スリットゲートの波の作用状況

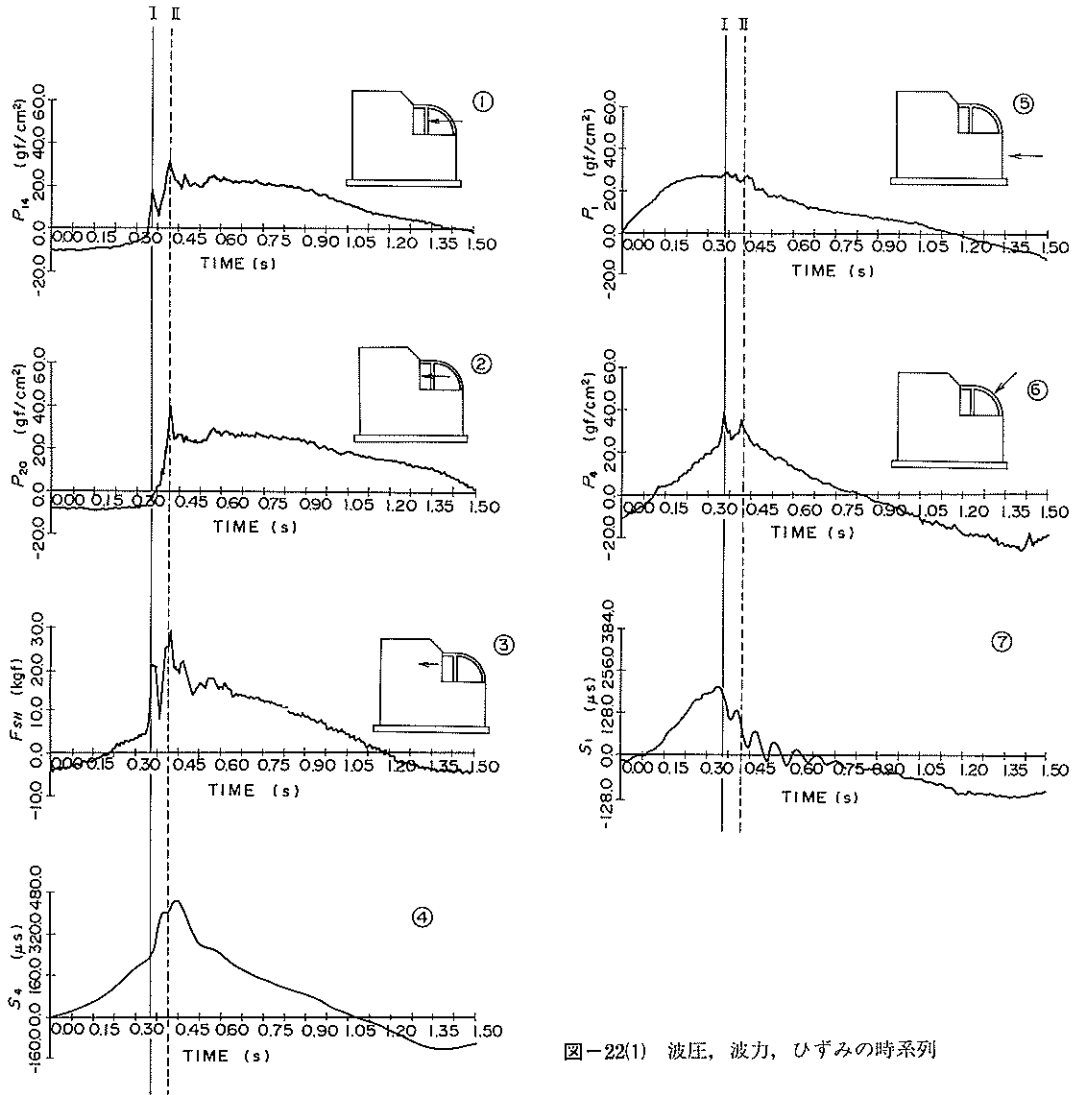


図-22(1) 波圧, 波力, ひずみの時系列

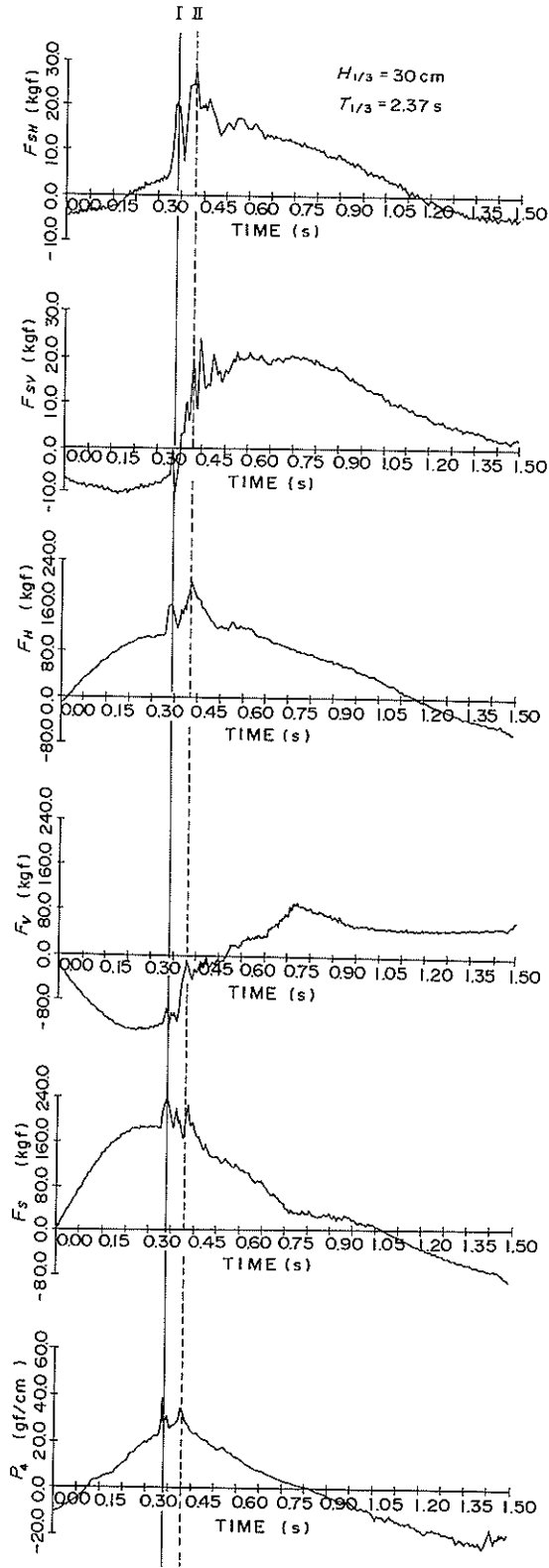


図-22(2) 各合成波力の時系列

波の様子を示している。

図-21は、曲面二重スリットケーソン堤への波の作用状況のスケッチであり、主要な4つの位相を示す。これらの位相は、図-3に示した曲面スリットケーソン堤の場合と同じで、波の作用状況も似ている。図-21(1)~(4)は、それぞれ写真-3の(2)~(5)にほぼ対応している。

図-22(1)には波圧や波力、ひずみの各時系列を示し、図-22(2)にはそれらを合成して計算される全水平力、全鉛直力、滑動合成波力の時系列を示している。作用させた波はD波である。波高レベルは、直立混成堤の設計波高に対応して $h_c/H_{1/3}=0.6$ 程度であり、 $H_{1/3}$ が30cm、 H_{max} が52.6cmの不規則波である。

曲面スリット上や縦スリット上の波圧の時系列の特徴は、時系列(⑥：曲面スリット上)に見られるように、各部の波圧が近い位相で二つのピークを持つことである。図にはこの二つのピークのうち、第一のピークを縦の実線、二つ目のピークを縦の点線で表している。これに対し後部不透過壁の波圧の時系列(②)には顕著なピークは一つしか現れていない。②におけるピークは曲面スリットにおける二つのピークのうちの第二のピークと同じ位相である。以後第一のピークを位相I、第二のピークを位相IIと呼ぶ。

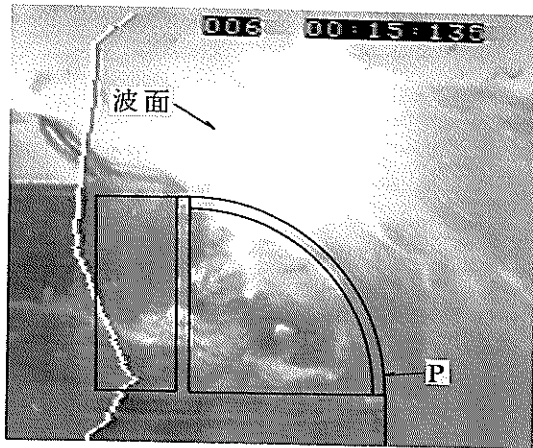
写真-4(1)、(2)は、曲面スリット部材周囲の波の作用状況を撮影したものである。上記二つのピークにそれぞれ対応した状況を示す。左側の線は写真中にPと示した点の波圧の時系列である。撮影時点での波圧は時系列の上端に現れている。

写真-4(1)によれば、位相Iのピークは波面が曲面スリット部材に衝突することによって発生している。波面の衝突は部材の位置によって若干の位相差を生じ、後部不透過壁にはその時点で波面が到達していない。

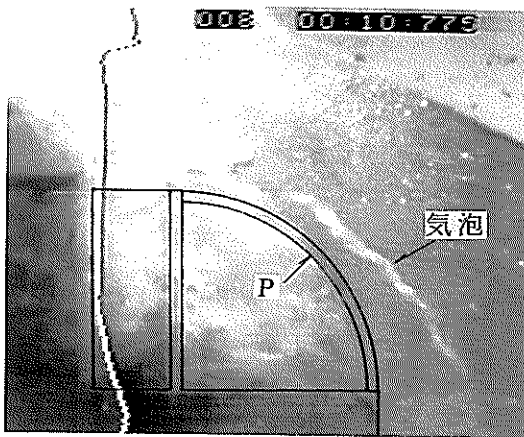
写真-4(2)は、スリット部分に巻き込まれた空気を通して発生する衝撃圧の様子である。写真を見ると気泡が曲面スリットの円形に沿って生じているのがわかる。これは衝撃圧が等方的で、各部材同じ位相であるためと考えられる。

位相IIのピークは波面の先端が後部不透過壁の上部付近に到達し、遊水室内の水と空気が閉じ込められて空気の圧縮を介して発生する衝撃圧と考えられる。衝撃圧は、流体内を音速で伝播するためピークをとる位相がほぼ一致している。

位相Iのピークは部材の位置によって若干の位相差が生じるが、基本的には曲面スリット中央の測点におけるピークを位相Iとする。ただし各点での位相Iにおける波圧のピーク値は、この位相付近のピークをとっている。



(1)



(2)

写真-4 曲面スリット部材周辺の波の作用状況

2章で述べたように、曲面スリットケーソン堤に対して行われた実験結果でも、曲面スリット部材に作用する波圧は、これら2つの位相でピークとなっている。

曲面スリット片持ち部材の固定端付近に発生するひずみ(時系列⑦)のピークは、波面の衝突によって位相Iで現れる。その後、スリット内部から作用する衝撃的波圧を受けて固有振動を起こしていることがわかる。このため、曲面スリット内部からの衝撃圧によるひずみは捉えられなかった。両端を固定した曲面スリット部材の端部付近におけるひずみを時系列④に示す。この測点では、既に述べたように曲面スリット部分に作用する波力によるひずみだけでなく、周辺の部材のひずみの影響を受けている。したがって、ここでのひずみは、分力計によって計測したスリット部分全体に作用する波力と類似の波形となり、ほぼIIに近い位相でピークをとる。しかしながら、今回の実験では、スリット部を横方向に3つに分

割するなど、部材の連結条件が現実的ではなく、波力によるスリット部材全体のひずみについて議論することは困難である。このため、ひずみゲージ(S3, S4, S5)のひずみ値は今回、解析の対象から除外した。

図-22(2)は、曲面スリット部や堤体全体に作用する波力の合力の時系列である。鉛直力については鉛直下向きを正としている。全水平力(F_H)は曲面スリット部材、縦スリット部材、遊水室後壁、上部工、ケーソン前面壁に作用する水平力の合力である。全鉛直力(F_V)は曲面スリット部材、スリット部底板、上部工、ケーソン底板に作用する鉛直力の合力である。なお、曲面スリット部材や縦スリット部材、遊水室後壁に作用する波力の水平成分 F_{SH} と鉛直成分 F_{SV} は、前述したように三分力計によって計測された。全水平力は位相IとIIにおいてピークをとっている。全鉛直力は位相IとIIよりもかなり遅れて正のピークをとる。位相IとIIにおいて、曲面スリット部に作用する鉛直下向きの波力は、ケーソン底面の揚圧力を相殺する効果を示す。位相IIにおいては、揚圧力と鉛直波力が釣り合ってほぼ全鉛直力が0となっている。滑動合成波力(F_S)は位相Iにおいて最大のピークをとり、位相IIに近いところでも位相Iに次ぐピークをとる。これらの結果を表-4にまとめて示す。

表-4 位相I IIと合成波力

	位相 I	位相 II
曲面スリット部水平力	2番目のピーク	最大値
鉛直力	0	正值
全水平力	2番目のピーク	最大値
全鉛直力	負値	0
滑動合成波力	最大値	2番目のピーク

以上の結果から、部材設計に対して考慮しなければならない最も重要な位相は、位相IとIIであることがわかった。また堤体の全体の安全性を検討する場合においても、位相IとIIにおける波力を考慮すればよいことがわかった。したがって、部材設計を行うための波圧分布を用いて、堤体の滑動や転倒に対する安定性について検討してもよいと考えられる。

5.2 部材波力

曲面二重スリットケーソン堤上の各点に作用する波圧は、波の作用状況によってかなりばらつきがある。しかしながらここでは、図-23に示すような波圧分布形状を仮定し、実際に計測された波圧と比較することによって部材波力を評価することにした。すなわち、曲面スリット部材に作用する波圧分布は、曲面スリットケーソン堤に対する一般式と同様の式(1)で表す。

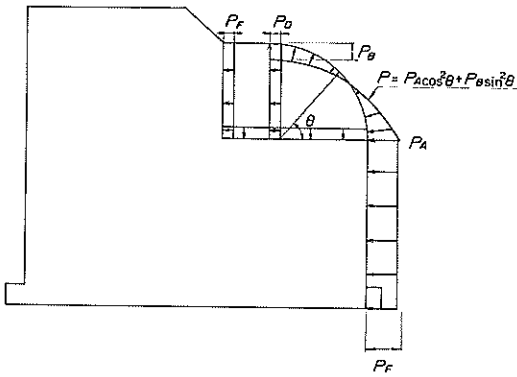


図-23 部材波力を評価するための波圧分布

$$P = P_A \cos^2 \theta + P_B \sin^2 \theta \quad (1)$$

ここに、 θ は曲率中心を縦スリットの下端にとり、曲面スリット部材の各点が水平面とのなす角度であり、 P_A は $\theta=0^\circ$ すなわち下端での波圧、 P_B は $\theta=90^\circ$ すなわち上端での波圧である。波圧はスリットの外側から内側へ向かうとき正、内側から外側へ向かうとき負と定義する。なお、位相Iの場合、曲面部材の内側からの波圧は0であり、波面は曲面部材の上端にまで達していないため $P_B=0$ とした。また位相IIにおいて曲面部材下端では、内側からの波圧と外側からの波圧が相殺しあうため、 $P_A=0$ とした。各鉛直部材及びケーソン前面鉛直壁上の波圧は、一様分布を仮定している。実際に堤体各部に作用する波圧は、必ずしも図に示すような分布とはならないが、各部に作用する波力の合力が実験と一致するように P_A 、 P_B 、 P_D 、 P_E 、 P_F を評価した。ただし、位相IとIIにおける波圧分布をそれぞれ与える必要がある。

図-24(1)~(5)には $P_A \sim P_F$ の各位相における波圧と H_{max} の関係を示す。前述したように波面が衝突する位相は部材ごとに若干異なることもある。このため曲面スリット部中央の波圧のピークに近い位相の範囲で各点のピークを読み取り位相Iでの値とした。各図において波高の増大と共に波圧はほぼ直線的に増大している。各点での比例係数 $P/w_0 H_{max}$ は、多少ばらつきがあるものの1.0を越えるような衝撃的なものはなく、 P_A 、 P_B 、 P_E が0.8程度、 P_D 、 P_F がそれぞれ0.5、0.6程度となっている。周期による違いは明瞭ではないが長周期の場合ほど大きな値となる傾向にある。曲面スリット部材に作用する波圧は、他の部材に比して大きな値をとる。縦スリットは曲面スリットの後方に位置しているため、波面の衝突による波圧(P_D 、位相I)は小さい。またここには位相IIの時、スリットの両面から波圧が作用し、相殺しあうため波圧は小さくなる。

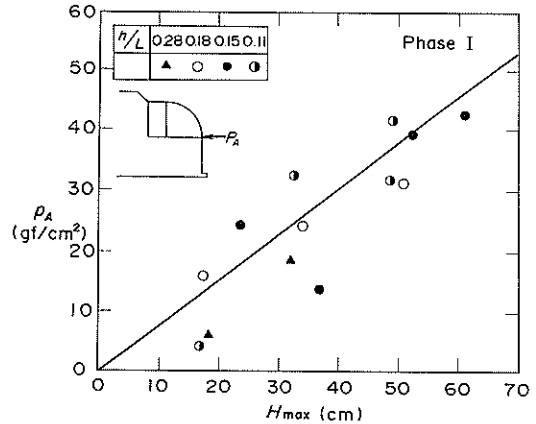


図-24(1) P_A における波圧と最大波高

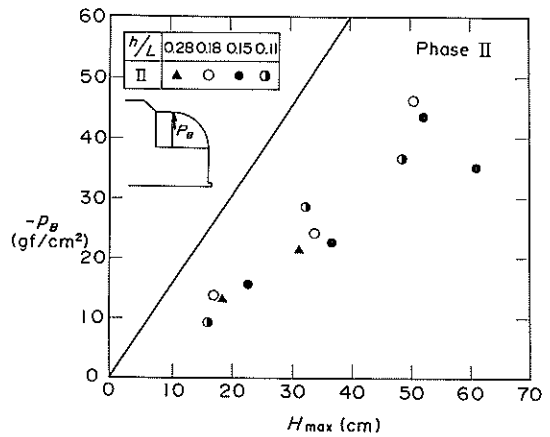


図-24(2) P_B における波圧と最大波高

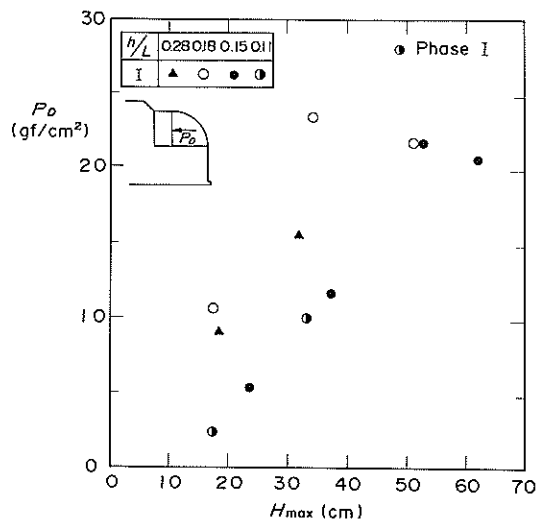


図-24(3) P_D における波圧と最大波高

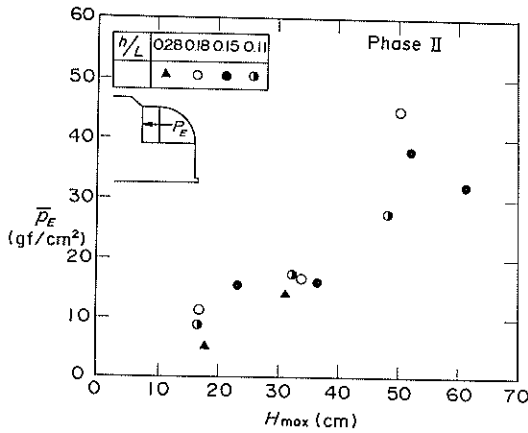


図-24(4) P_E における波圧と最大波高

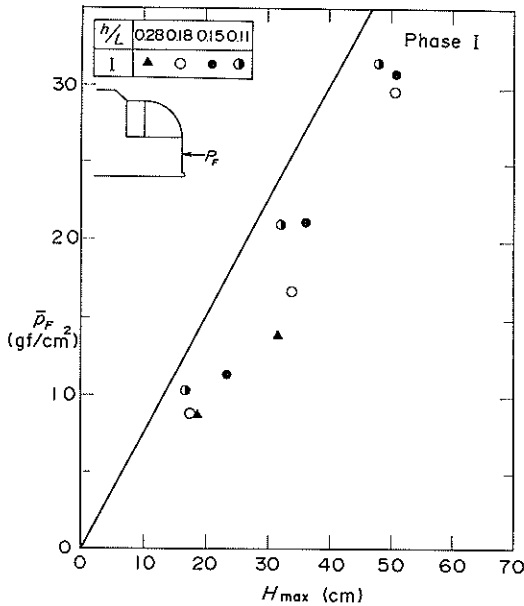


図-24(5) P_F における波圧と最大波高

図-24(1), (2), (5)に示した実線は、従来の部材設計波力(図-4)を用いた P_A , P_B , P_F の計算値である。 P_A , P_F については、曲面スリットケーソンの場合とほぼ同じであることがわかる。位相Iでは縦スリットまで波面が到達しておらず、曲面二重スリットケーソンの消波特性が発揮されていない。このため位相Iにおける波圧分布は、曲面二重スリットケーソンであっても曲面スリットケーソンと大差はない。しかしながら位相IIにおける P_B については、曲面スリットケーソンの設計波圧に比べてかなり小さくなる。これは曲面スリットの後方に縦スリットを設けたため不透過壁に比して上昇する波面の速度が低減し、衝撃的な波圧も低減されているためである。

5.3 設計波力の提案

図-25は、曲面二重スリットケーソンの設計波力の考え方を示すものであり、合田式を基本にしている。図中の右側に示した波圧分布は通常の混成堤の直立の壁に作用する合田式による波圧分布である。図中の P_{c1} , P_{c2} , P_{c3} はそれぞれ静水位置における波圧、スリット部材下端の波圧、堤体下端の波圧である。設計部材波力は以下に示した項目に従って設定する。

- ① 曲面スリット部の部材波力は、すべて合田式による混成堤に作用する静水位置の波圧(P_{c1})に補正係数を乗じたかたちで表示する。
- ② 曲面スリット部材の下部の直立部分には、直立壁に作用する合田式の波圧(P_{c2} , P_{c3})に係数を乗じたかたちで表示する。
- ③ 揚圧力は、堤体前面鉛直部の下端の波圧を底面前端部の揚圧力として後端で0となる三角形分布で与える。

前述したように、従来の曲面スリットケーソンの部材設計法(図-4)は設計波圧を直接設計波高に係数を乗じたかたちで表示している。このため周期の影響が考慮されない。新しく提案された波圧分布の場合、合田式の中で周期による波圧の変化が考慮されており、従来の曲面スリットケーソン堤に対する設計法よりも、より現実に近い設計法となる。

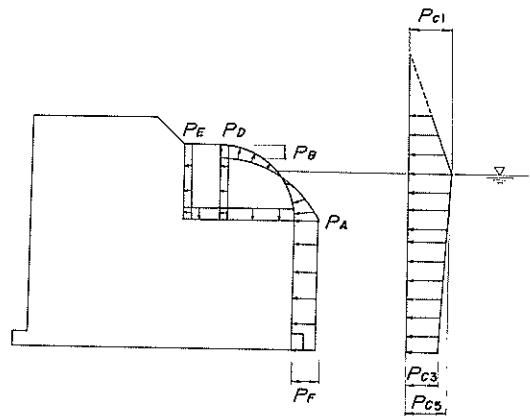


図-25 部材設計波圧分布の考え方

図-26(1)~(7)には、各点における位相IとIIの波圧とそれに対応した合田式による波圧の比を示す。どの図においても、点はかなりばらついているが、波高が大きくなるとばらつきが小さくなる傾向にある。図中に示した横の実線は、波高が大きく周期が長い場合の結果から決定された設計に用いる係数を示している。

これらの係数から求められた位相I, IIに対する設計

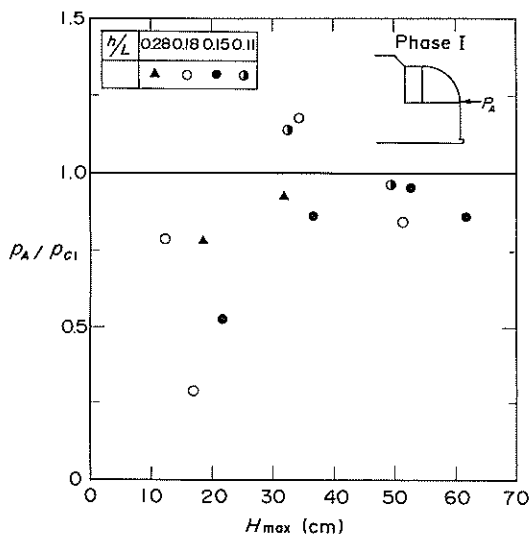


図-26(1) 波圧係数の決定 (P_A , 位相 I)

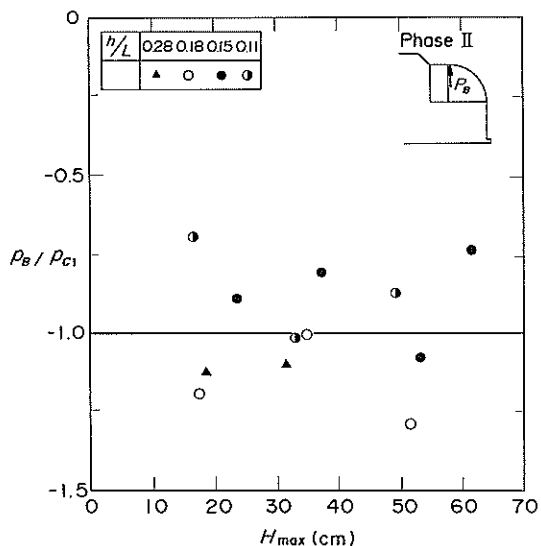


図-26(4) 波圧係数の決定 (P_B , 位相 II)

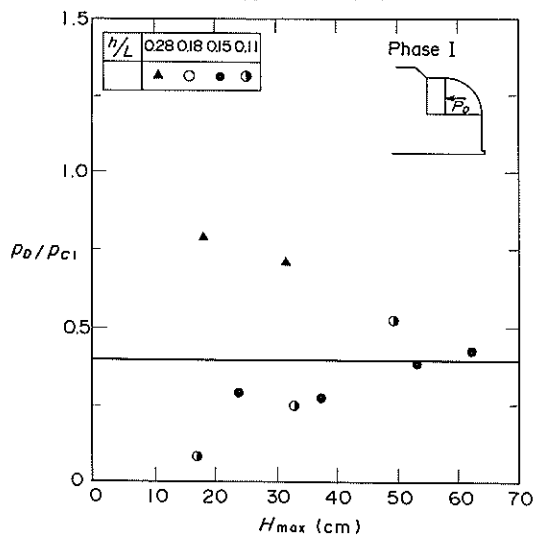


図-26(2) 波圧係数の決定 (P_D , 位相 I)

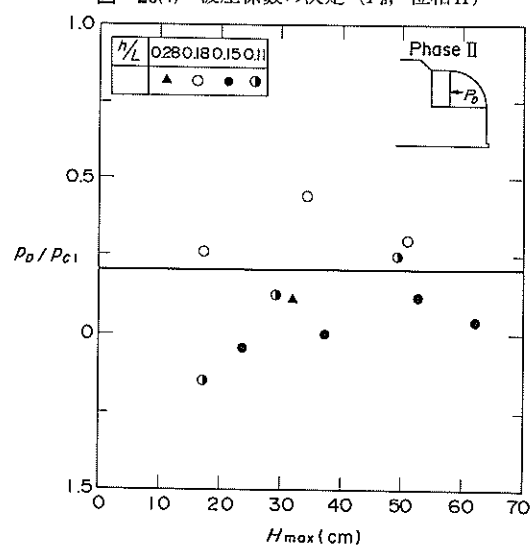


図-26(5) 波圧係数の決定 (P_D , 位相 II)

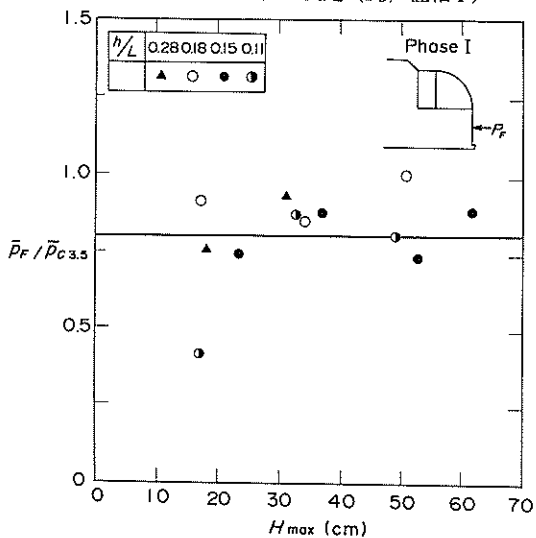


図-26(3) 波圧係数の決定 (P_F , 位相 I)

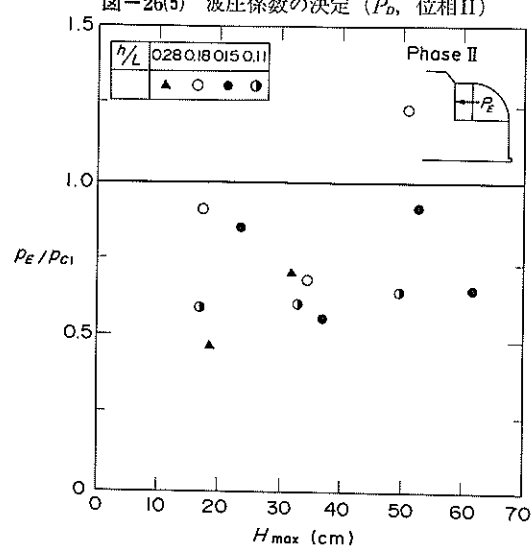


図-26(6) 波圧係数の決定 (P_E , 位相 II)

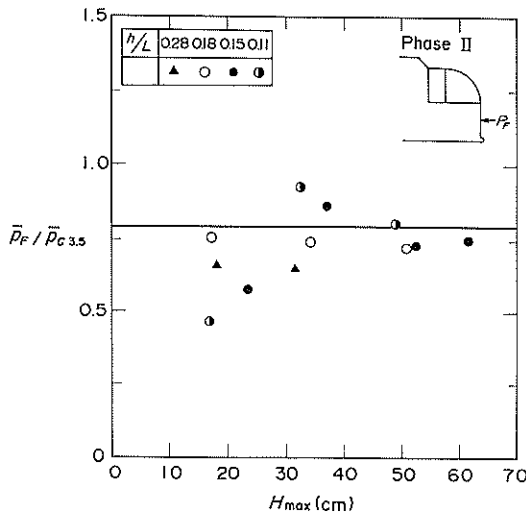


図-26(7) 波圧係数の決定 (P_F , 位相II)

波力の分布を図-27(1)および(2)に示す。位相Iの場合の縦スリット部材に作用する波圧分布は、平均波圧が P_D となるような逆三角形分布とした。この分布では、縦スリットを固定している底部からの作用高さが高くなり、部材に対して厳しい波力となる。D波を例にとれば位相IIの曲面スリット部材の上端に作用する波圧(P_B)は、0.8

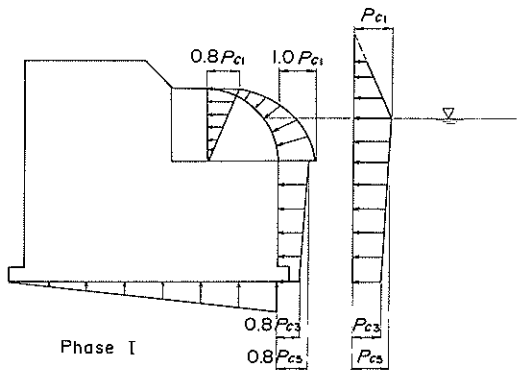


図-27(1) 設計波圧分布 (位相I)

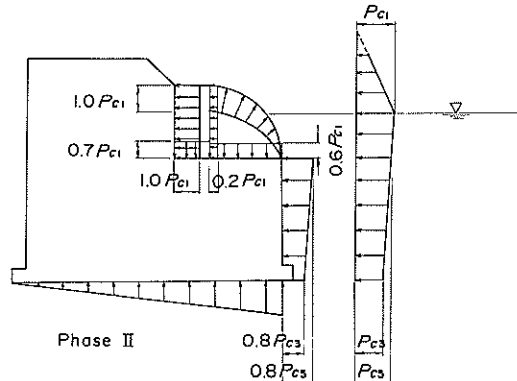


図-27(2) 設計波圧分布 (位相II)

$w \cdot H_{\max}$ となる。従来の曲面スリットケーソンの設計法によれば、この点の波圧は $1.5w \cdot H_{\max}$ であり、波圧が約半分ほどに低減されている。

以上の結果から曲面二重スリットケーソン堤は、二重スリットおよびその後方の遊水室の波力低減効果により、曲面スリットケーソン堤に比べて部材設計波力を十分低減できることがわかった。

5.4 ひずみと設計波力

図-28は H_{\max} に対する、位相Iの時の曲げひずみの計測値である。測点は、曲面スリット片持ち部材に取り付けられたひずみゲージS1, S2の位置で、部材片面の曲げひずみ値である。図中の実線と点線は、曲面スリット部材の設計波力分布(図-27, 位相I)を用いて計算した各点の曲げひずみである。位相Iの場合、曲面スリット部材に作用する設計波力の合力 P_G と作用点の角度 θ_G は、

$$P_G = \frac{\sqrt{5}}{3} R P_A \quad (2)$$

$$\theta_G = \tan^{-1}(0.5)$$

で与えられる。計算値は、式(2)を用い、設計波力分布を集中荷重に置き換えて求められた。計算値は、 H_{\max} に対して実験値とほぼ同様の傾向を示すが、どの波高でも実験値より大きくなっている。これらの結果から、提案された位相Iに関する曲面スリット部の設計波力分布が、妥当なものであることがわかる。なお、S1のひずみがS2よりも大きくなるのは、合力の作用点と各測点の距離はS1の方が長いからである。

両端固定の部材に生じるひずみは、5.1節で述べたように周辺部材の影響を受けている。本実験では、三分力計を取り付けた部分を他の部分と分離するなど、部材の連結条件が現実的ではなかった。スリット部全体のひ

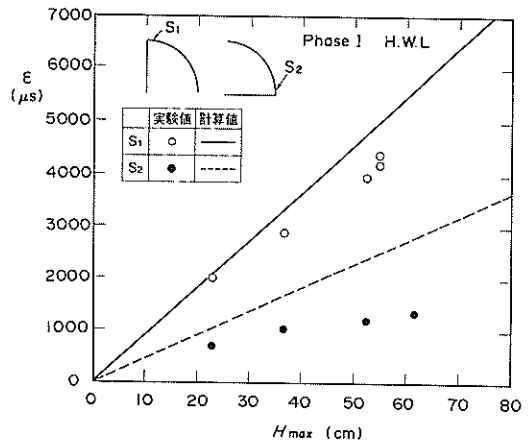


図-28 ひずみと最大波高 (片持ち部材)

ずみを調べるためには、今後、それらの条件を現実的なものとし、詳細な部材条件を設定し、FEM解析を行う必要があると思われる。

6. 滑動安定性

6.1 水平・鉛直波力

図-29(1)および(2)は、 HWL と LWL での模型堤体全体に作用する全水平波力の H_{max} に対する変化を示す。全水平波力は位相Iでの値、位相IIでの値、滑動合成波力を最大にする位相での値の3つの実験値を示す。位相IIでは、5.1節で述べたとおり最大値をとる。滑動合成波力を最大にする位相は、ほぼ位相Iであるが、若干の位相差を生じることがあるので実験値として併せて示す。 HWL では滑動合成波力のピークをとる位相での値は、ほぼ位相Iでの値と等しく、 LWL では位相I、位相IIでの値の間である。図中の実線は図-27に示した波圧分布から求めた全水平波力である。 LWL の場合、水平波力の実験値が波高が大きいところで計算値をやや上回っている他は、水平波力はほぼ位相IIの場合の計算値と同程度である。位相Iの場合の水平力についても、実験値と計算値はほぼ一致している。

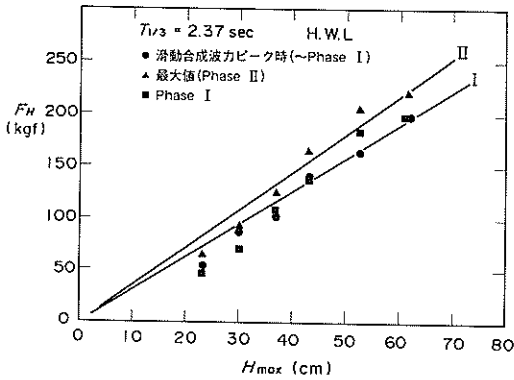


図-29(1) 全水平力と最大波高 (HWL)

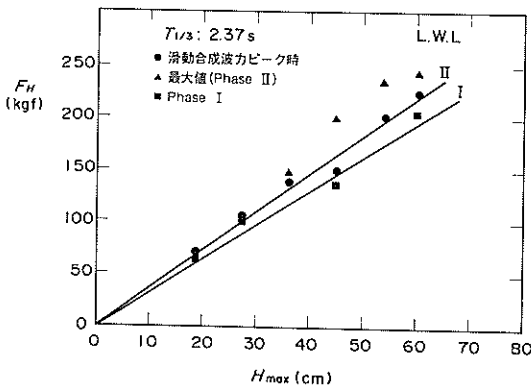


図-29(2) 全水平力と最大波高 (LWL)

図-30(1)および(2)は、全鉛直波力の H_{max} に対する変化を示すものである。堤体に対して鉛直下向きの波圧を正としている。位相I、II付近では、鉛直下向き波力よりも揚圧力による鉛直上向き波力が卓越しているため、それらの和である全鉛直波力は負の値となっている。図には位相Iと滑動合成波力のピーク時での実験値が示している。滑動合成波力ピーク時と位相Iとはほぼ同時であるため値も近い。実験値は、図中の実線で示した位相Iにおける計算値とも良く一致している。図には位相IIの計算値も示されているが、これは位相Iの計算値よりも絶対値が小さい。位相IIの実験値は示されていないが殆ど0に近く、計算は安全側になっている。

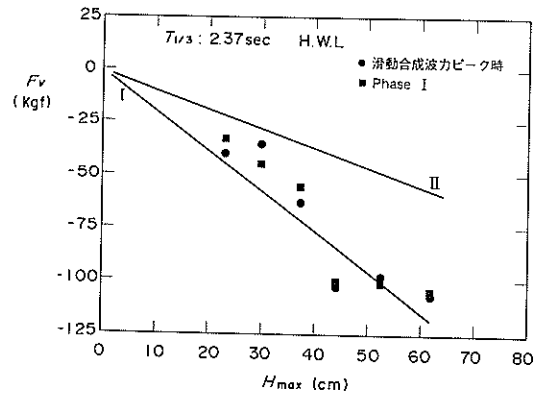


図-30(1) 全鉛直力と最大波高 (HWL)

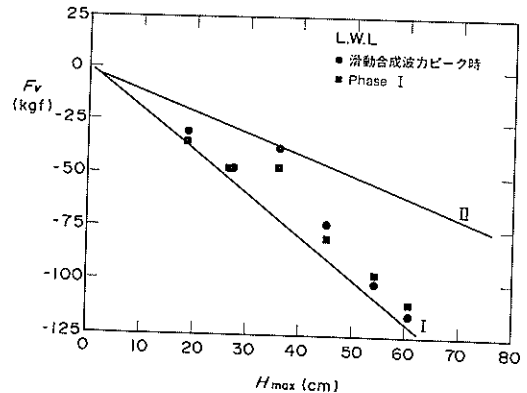


図-30(2) 全鉛直力と最大波高 (LWL)

6.2 滑動合成波力

図-31(1)および(2)は、縦軸に堤体水中重量(W')、横軸に H_{max} をとり滑動量の測定結果を示すものである。図中の白丸は各々の波高と堤体水中重量の条件で滑動しなかったことを示し、黒丸は滑動したことを示す。黒丸の上の数字は堤体の滑動量をmm単位で表す。Fは今回の滑動

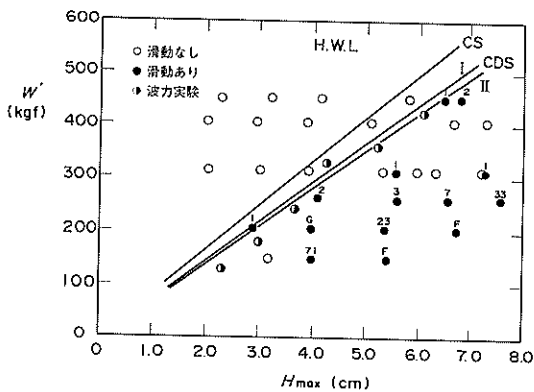


図-31(1) 堤体必要重量と最大波高 (H.W.L)

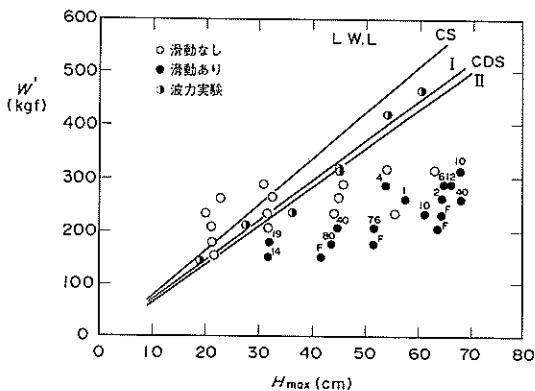


図-31(2) 堤体必要重量と最大波高 (L.W.L)

実験での限界滑動量10cmを越えたことを示す。

白丸と黒丸の境界は、実験ではばらつくが波力と堤体水中重量による滑動抵抗力が釣り合った状態を示している。このときの堤体重量は、各波高に対する滑動限界水中重量である。滑動限界水中重量に摩擦係数 μ を乗じたものが、滑動合成波力となる。境界よりも左上方は、波高に対する堤体水中重量が十分大きく、安定な領域であり、右下方ほど波高に対する堤体水中重量が小さく不安定な領域である。図中の●印は、波力実験から求めた滑動限界水中重量の実験値であり、実線 (CDS I, II) は設計波力から求めた滑動限界水中重量である。位相 I と II における滑動限界重量が与えられているが、設計ではもちろん大きい方を選ぶ必要があり、この条件では位相 I の時である。新しく提案された曲面二重スリットケーソンの計算値は、やや過大となる場合もあるが滑動実験結果や波力実験結果にほぼ一致している。図には曲面スリットケーソンの場合の計算値 (CS) も示している。曲面二重スリットケーソンの滑動限界重量は曲面スリットケーソンとして計算すると過大であることがわかる。すなわち曲面スリットケーソンに比して10~15%堤体を軽くすることができる。

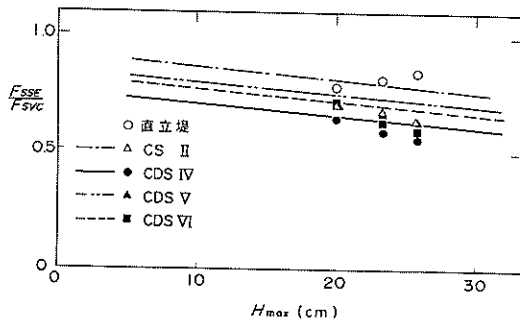


図-32 各種堤体形状に対する新設計法の応用

最後に、この設計法をやや構造の異なる他の曲面二重スリットケーソン堤への拡張の可能性について調べる。図-32は、2, 2節で示した第二港湾建設局における滑動実験結果とこの設計法を比較したものである。この図の縦軸には、直立堤成堤に作用する滑動合成波力の計算値に対する各種断面の実験値の比を示す。横軸は H_{max} である。図中の点線および実線は、直立壁に作用する波力に対する各堤体の計算滑動合成波力の比である。なお、図には曲面スリットケーソン堤も示しており、この場合の計算値は図-5に示した従来の設計法によるものである。図には計算値に対して実験値は小さくなっており、計算値は安全側となっていることを意味する。また計算結果は滑動合成波力の大きい方から順にII, V, VI, IVとなり、滑動実験結果ともほぼ一致している。ただし、堤体形状ごとの差は計算値の方が大きくなっている。

これらの結果から、新しく提案された設計波圧を用いれば、曲面二重スリットケーソンの滑動安定性に対する検討も可能であることがわかった。またこの設計法は、曲面二重スリットケーソン堤の構造条件の変化に対してもある程度対応できる。しかしながら、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ことが望ましい。

7. まとめ

以上、曲面二重スリットケーソン堤の水利特性、波力特性を実験的に検討し、曲面二重スリットケーソン堤の耐波設計法を提案した。さらにその妥当性を滑動実験によって検討した。

本研究において得られた主要な結論を以下に示す。

① 曲面二重スリットケーソン堤の反射率は、同じ曲率半径 R を持つ曲面スリットケーソン堤よりも小さく、曲率半径に後部遊水室長 l_s を加えた曲率半径を持つ曲面スリットケーソン堤とほぼ同程度である。曲面二重スリットケーソン堤の反射率は、 $(R + l_s) / L$ が0.15付近で

極小値をとることがわかった。

② 曲面二重スリットケーソン堤の波高伝達率は、通常の混成堤とほぼ同じであった。

③ 波力を考える上で考慮すべき位相は、曲面スリット部材への波面衝突時と、遊水室内部から曲面スリット部への衝撃圧作用時の2つある。この2つの位相に対して設計波圧分布を与えた。この波圧分布は、各部材の設計だけでなく、堤体全体の安定性の検討にも用いることができる。

④ 遊水室内部から曲面スリット部へ作用する衝撃波力は、曲面二重スリットケーソンの場合、従来の曲面スリットケーソンに比べて約1/2となり、スリット部の設計上の問題が大幅に緩和されることがわかった。また、曲面二重スリットケーソンは、曲面スリットケーソンに比べてその堤体重量を10~15%低減できる。

本研究は、第二港湾建設局横浜調査設計事務所から要請を受けて実施したものであり、守屋義一前調査課長、菅原邦彦調査課長を始め各位から御指導をいただいた。また、港湾技術研究所谷本勝利次長、高山知司水工部長にも貴重な御助言をいただいた。ここに記して深甚なる感謝の意を表する。

(1991年9月30日受付)

参考文献

- 1) 谷本勝利, 原中祐人, 富田英治, 和泉田芳和, 鈴村論司: 曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第19巻4号, 1980, 12, pp.3~53.
- 2) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 1990.
- 3) 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所: 久慈港及び常陸那珂港防波堤水理模型実験報告書, 1990, 12月.
- 4) 谷本勝利, 原中祐人, 大里睦男: 曲面スリット堤の反射特性について, 第26回海岸工学講演会論文集, 1979, pp.309~313.
- 5) 高橋重雄: 大水深・高波浪海域における新形式構造物の開発, 人工島の施工技術講習会講演集, 土木学会施工委員会, 1991.11.

主要記号表

CDS	: 曲面二重スリットケーソン
CS	: 曲面スリットケーソン
F_{SH}	: スリット部に作用する水平波力
F_{SV}	: スリット部に作用する鉛直波力
F_H	: 堤体全体に作用する水平波力
F_V	: 堤体全体に作用する鉛直波力
F_S	: 滑動合成波力
F_{SSF}	: 曲面二重スリットケーソンに作用する滑動合成波力の実験値
F_{SVC}	: 直立混成堤に作用する滑動合成波力の計算値
F_{SVE}	: 直立混成堤に作用する滑動合成波力の実験値
H	: 波高
H_i	: 入射波高
$H_{1/3}$: 有義波高
H_{max}	: 最大波高
K_T	: 波高伝達率
K_R	: 反射率
L	: 波長
P_{C1}	: 合田式による静水面における波圧
P_{C3}	: 合田式によるスリット部下端の波圧
P_{C5}	: 合田式による堤体下端の波圧
P_C	: 曲面スリット部材に作用する設計波力の合力
R	: 曲面スリット部材の曲率半径
$S(f)$: スペクトル密度
$T_{1/3}$: 有義波周期
W'	: 堤体の水中重量
h	: 水深
h_c	: 静水面からの天端高
h'	: ケーソン設置水深
ℓ_s	: 二重スリット部遊水長
ℓ_c	: スリット天端高
ℓ_d	: 二重スリット下端高
t	: 時間
w_0	: 水の単位体積重量
α_1	: 合田式で静水面の波圧の算定に用いるパラメータ
α_2	: 合田式で海底勾配やマウンドの影響を表すパラメータ
β	: 波向き
ϵ_1	: 曲面スリット部開口率
ϵ_2	: 二重スリット部開口率
μ	: 捨石マウンドと堤体底板との間の摩擦係数

港湾技研資料 No. 720

1991. 12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 昭和工業写真印刷所

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

Copyright © (1990) by P.H.R.I

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

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。