

曲面二重スリットケーソンの開発に関する実験的研究

An Experiment on Curved Double Slit Caisson

菅原邦彦*・黒澤忠男*・遠藤秀則*・高橋重雄**・細山田得三**

Kunihiko Sugawara, Tadao Kurosawa, Hidenori Endou, Shigeo Takahashi, Tokuzo Hosoyamada

A curved double slit caisson breakwater is a kind of perforated-wall caisson with an arc-shaped slit wall. The caisson is very stable against storm waves and can dissipate large amount of wave energy. However, impulsive wave forces act on the arc-shaped slit wall with a rear chamber.

Curved double slit caisson is invented to improve the curved slit breakwater. The curved double slit caisson has the second vertical slit wall with a rear wave chamber. The curved double slit caisson can reduce the impulsive force greatly and can dissipate wave energy with a relatively small wave chamber.

keywords: Curved slit caisson, Breakwater, Perforated-wall caisson, Wave force

1. まえがき

近年の経済社会の発展にともない、わが国の港湾整備は水深が大きく厳しい自然環境下に展開しつつある。このため、沖合いの大水深で且つ高波浪の海域に防波堤が建設される例が各地で増加し、それに応じて様々なケーソン防波堤が考案されてきた。その中でも曲面スリットケーソン堤（図-1上段）は、前面が曲面のスリット壁で、曲面スリット部材による波力低減効果と高い消波機能を有する防波堤である。また、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、堤体の滑動安定性を増すことができる。さらに、スリット部材がアーチ状であるため、部材としての強度に優れている。ただし、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、曲面スリットにPC部材を用いることによってこの問題は一応克服されている。曲面スリットケーソン堤は1976年より港湾技術研究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た。

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、これらの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堤（図-1下段）を考案した。曲面二重スリットケーソン堤は、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。第二港湾建設局では、種々の断面比較のための基礎的な実験を行い、曲面二重スリットケーソン堤が有利な構造であることを明らかにした。

港湾技術研究所ではこれらの結果をうけて曲面二重スリットケーソン堤の詳細な波圧特性、水理特性を把握すべく大型模型実験を実施した。本論文ではまず従来の曲面スリット堤の既往的研究成果を概観し、その断面形状の持つ水理特性、波力特性について整理する。次に、曲面二重スリットケーソン堤と他の構造との比較検討結果の概要を紹介する。さらに大型模型実験に基づいて曲面二重スリットケーソン堤の詳細な波圧特性、水理特性を取りまとめ、耐波設計法を提案する。

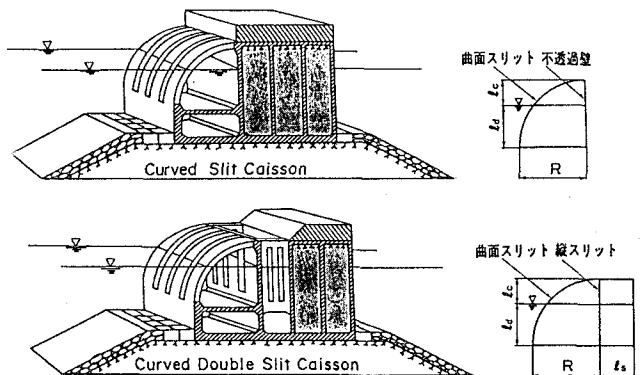


図-1 曲面スリットケーソン堤と
曲面二重スリットケーソン堤

2. 曲面スリットケーソン堤の研究

曲面スリットケーソン堤の水理特性、波力特性については谷本ら（1980）の実験によって既に多くの知見が得られている。それらを列挙すると以下の通りである。

- ① 反射率を極小にするのは、概ね部材の曲率半径と波長の比 R/L が0.15の場合である。
- ② 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材に到達したときと波面がスリット背後の直立壁に到達し、遊水室内部から外側へ向けて衝撃的な波圧が作用したときである。
- ③ 遊水室内部からの外側への衝撃波力は、 $1.5W$ 、 H_{max} と大きい。
- ④ 堤体の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

* 正会員 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所（220 横浜市西区高島 1-2-5）

** 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部

対し、合田式において $\alpha_s=0$ としたときの波圧が働くものとして算定する。

- ⑤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。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。

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。

3. 曲面二重スリットケーソン堤の比較実験

(1) 実験方法

第二港湾建設局横浜調査設計事務所では、曲面二重スリットケーソン堤に関する基礎的な実験を行った。この実験では、いくつかの曲面スリット構造について反射・伝達波特性と波力特性を二次元水路で調べ、比較している。

図-2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が曲面スリットケーソン堤（CSと記す）の最も基本的な断面である。断面IIIは、断面IIの曲率半径を1.5倍にしたものである。断面IV、V、VIは、スリット部材の曲率半径を一定とし、スリット部材の高さと上部工形状を変化させた曲面二重スリットケーソン堤（CDSと記す）である。

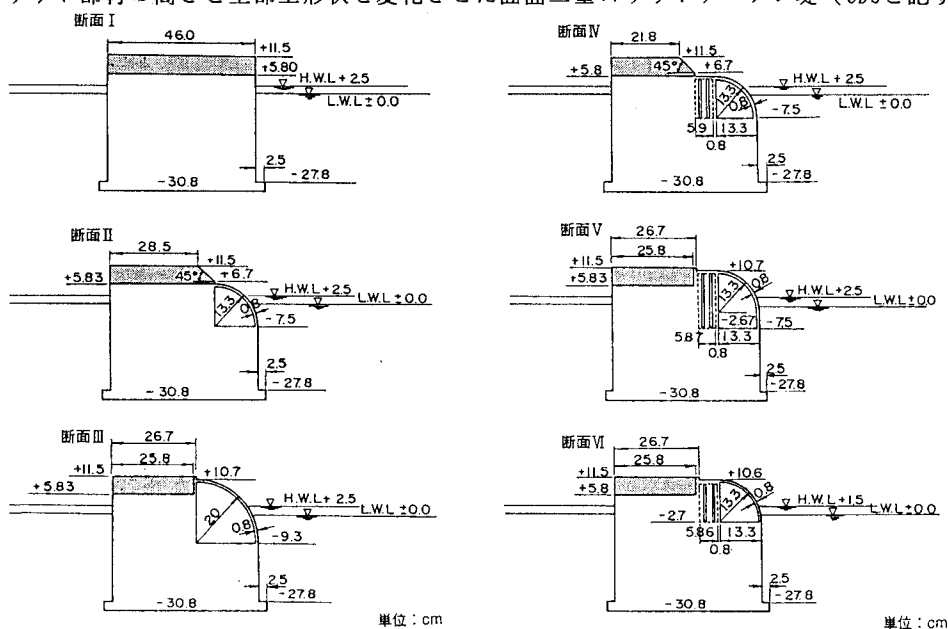


図-2 実験に用いた堤体断面

(2) 反射・伝達率

図-3には、堤体形状ごとに部材半径と波長の比（ R/L ）に対する反射率の変化を示す。曲面スリットケーソンの断面II（CS II）と曲面二重スリットケーソンの断面IV（CDS IV）を比較すれば、IVの方が各周期に対して反射率が小さく、二重スリットの消波効果が有効であることがわかる。その効果は部材の半径 R を遊水長 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IVとVIを比較すれば、断面IVの方が反射率は小さくなる。断面VIの反射率は他の断面と比べてかなり大きい。従って曲面スリット部材の静水位面に対する位置が反射率に影響することがわかる。同一の R/L に対して最も反射率が小さくなるのは曲面二重スリットケーソン堤のIVタイプであった。

図-4には $hc/(H_i)_{1/3}$ に対する波高伝達率（ K_T ）の変化を示す。図中の点線は通常の混成堤の実験式による

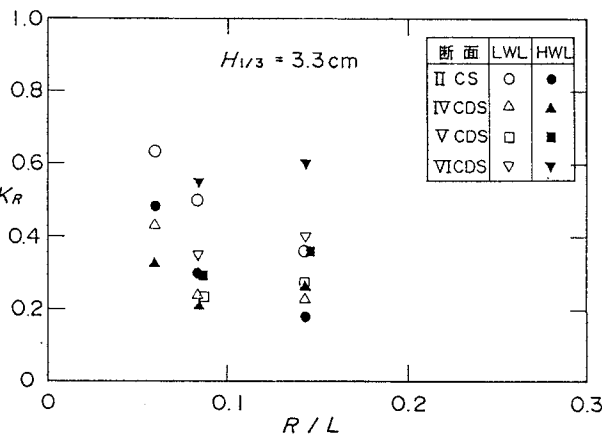


図-3 反射率

K_T である。各堤体とも推定された波高伝達率よりも小さくなっている。断面ⅡとⅣの場合、上部工が斜面で越波しやすい構造になっており、比較的大きな値となる。 K_T 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。

(3) 滑動実験結果

図-5は、波高を横軸にとって滑動実験から求めた滑動限界重量を示すものである。縦軸は、通常の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。各断面の中では、断面Ⅳの曲面二重スリットケーソン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。以下ではこれらの結果をうけて実施した曲面二重スリットケーソン堤の大型模型実験について述べるが、この比較実験の結果も含めて検討している。

4. 曲面二重スリットケーソン堤の大型模型実験

4. 1 実験の方法

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。

実験には修正ブレットシュナイダー光易型のスペクトルを持つ不規則波を用いた。実験周期は有義波周期で1.0s, 1.5s, 2.0s, 2.37s, 2.5s, 3.0sの6種類で、波高は短周期を除いて有義波高で10cm, 15cm, 20cm, 25cm, 30cm, 35cmの6種類である。堤体前方と後方には容量式波高計を設置し反射率、波高伝達率を測定した。図-6は、実験に用いた曲面二重スリット堤の基本断面である。例えば模型縮尺を1:20とすれば現地水深 $h=17.3$ m, $R=5.3$ m, $h_c=4.6$ m, $h'=12.3$ mとなる。

この断面は、第二港湾建設局の実験結果を受けて、図-2の断面Ⅳと同じ形状となっている。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、スリット各部には波圧計、分力計を設置した。

4. 2 反射・伝達特性

図-7は、横軸にスリットの半径と波長の比(R/L)をとり、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。 R/L が0.1よりも小さい領域では、 R/L が増大するほど K_R は小さくなる。しかし R/L が0.1程度を越える領域では、 R/L が大きくなると若干増加する傾向が現れる。曲面二重スリット

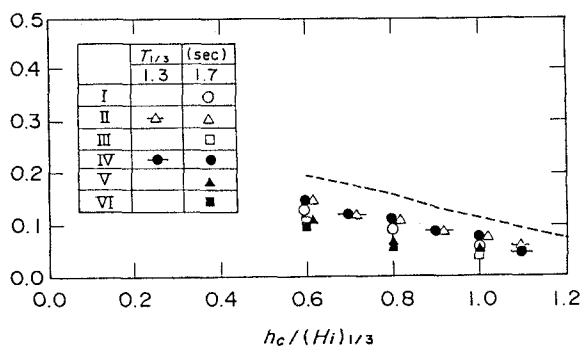


図-4 波高伝達率

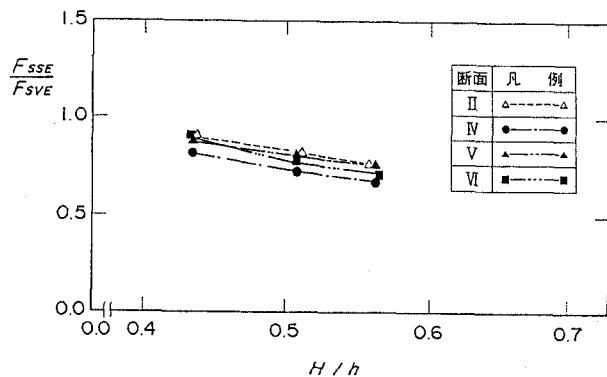


図-5 滑動合成波力

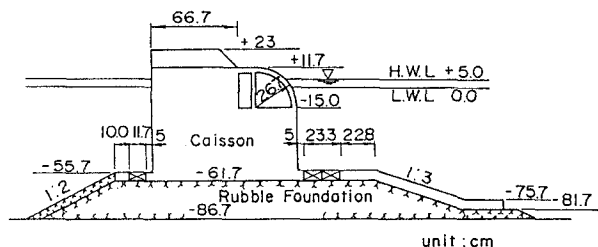


図-6 曲面二重スリットケーソン堤の実験断面

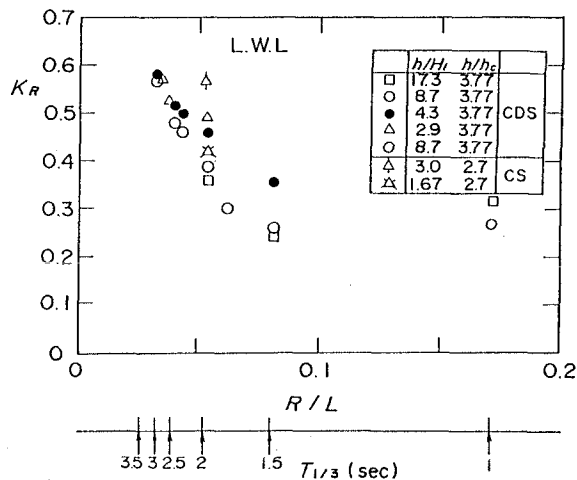


図-7 反射率

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。

図中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。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。曲面二重スリットケーソン堤の反射率は、曲率半径を $(R+ls)$ 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 $(R+ls)/L$ は0.15となる。前述したように、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。

図-8は天端高と入射波の有義波高の比 h_c/H_1 に対する波高伝達率(K_T)の変化を示す。通常の混成堤の設計波高である $h_c/H_1=0.6$ 付近では、波高伝達率は0.17程度となった。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、伝達特性に関して両者に差がないことがわかる。

4. 3. 曲面二重スリットケーソン堤の波圧特性と設計波力

(1) 波の作用状況

図-9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2つの位相を示す。(1)は波面が各部材に衝突する位相、(2)は波面が後部不透過壁に衝突し、部材の内部から衝撃波力が作用している位相である。

図-10(1)には波圧や波力の時系列を示す。作用させた波は有義波高 $H_{1/3}$ が30cm、最高波高 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。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。位相Ⅰのピークは波面の先端が各点に到達したときに生じる波圧である。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、流体音を音速で伝播するためピークをとる位相がどの位置でもほぼ一致している。前述したように、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。

図-10(2)には波圧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す。図中のスリット部鉛直力(F_{sv})および全鉛直力(F_v)については、鉛直下向きを

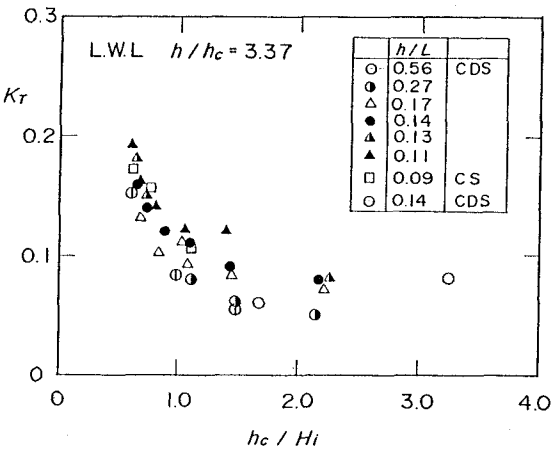


図-8 波高伝達率

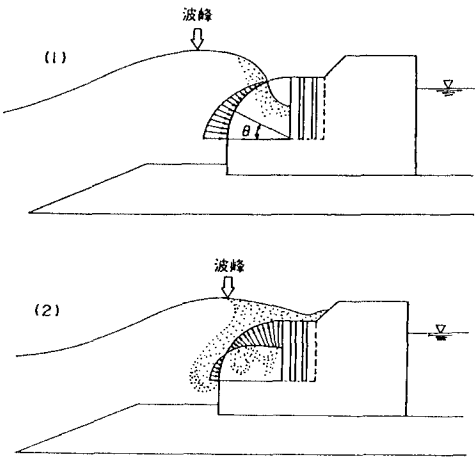


図-9 波の作用状況

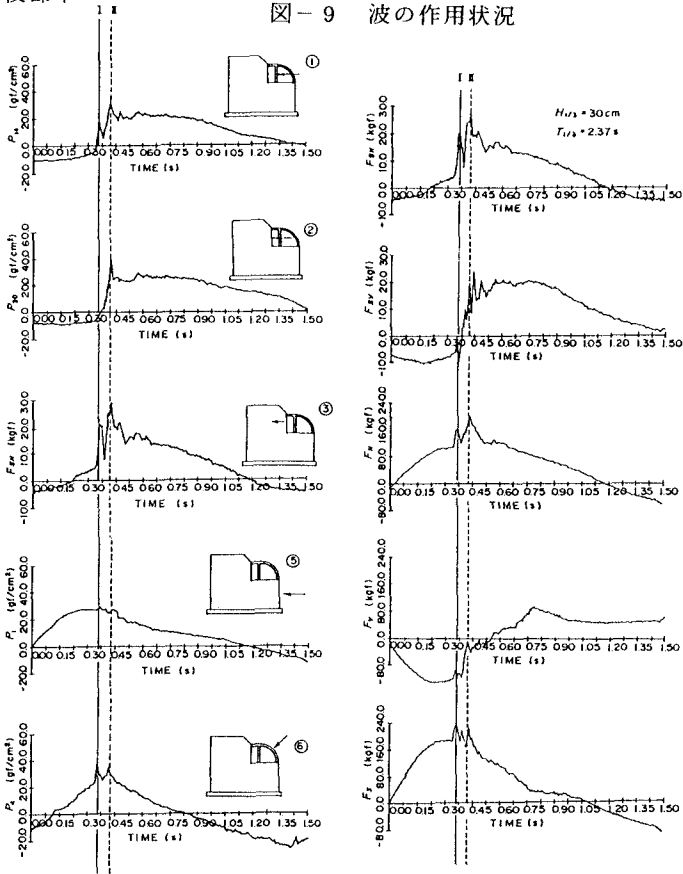


図-10 波圧・波力の時系列

正としている。全水平力 (F_H) は位相ⅠとⅡにおいてピークをとっている。全鉛直力 (F_V) 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において、曲面スリット部に作用する波力は鉛直下向きとなり、スリット部に働く鉛直下向きの波力がケーソン底面の揚圧力をうわまわっていることを示す。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。

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。

(2) 部材波力

図-11には、曲面部材の上端に作用する波圧 (P_B) のピーク値と H_{max} の関係を示す。無次元波圧係数 P_B/w 。 H_{max} は、0.8程度であった。図中に示した P_A 、 P_D 、 P_E 、 P_F での波圧係数はそれぞれ0.5、0.5、0.8、0.6程度であり、1.0を越えるような衝撃的な波圧にはならない。

図に示した実線は、位相Ⅱの場合の曲面スリットケーソン堤の部材設計波力を用いた P_B の計算値である。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。これは曲面二重スリットで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。

(3) 設計波力の提案

図-12は、波圧実験によって決定された二つの位相における設計部材波圧分布を示す。図中の P_{c1} 、 P_{c2} 、 P_{c3} はそれぞれ静水面、スリット部材下端、堤体下端の位置での通常の混成堤の直立壁に作用する合田波圧である。設計部材波力は以下に示した方法に従って設定した。

- 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形で表示する。
- ②曲面スリット部材の下部の直立部分は、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。

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、より精度の高い設計法となる。

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。

実験周期2.4秒の波を例にと

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、 $0.8w$ 、 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 $1.5w$ 、 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。

4.4 滑動安定性

図-13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

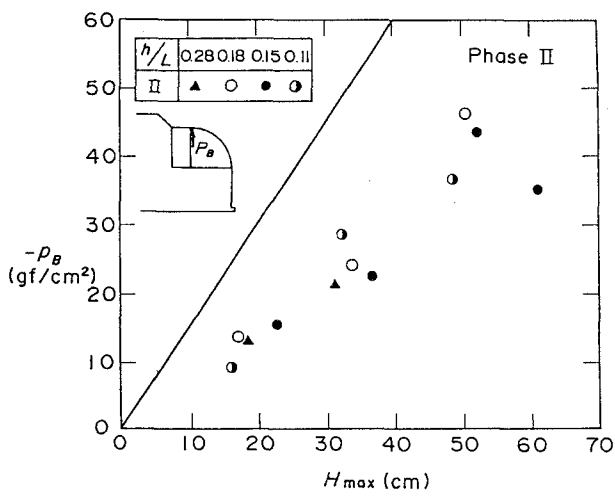


図-11 P_B における波圧と最高波高

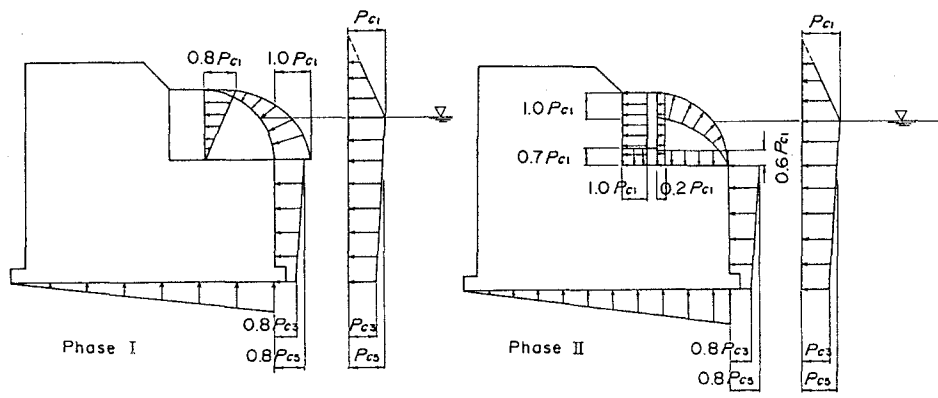


図-12 設計波圧分布

堤体の滑動量をmm単位で表す。Fは今回の滑動実験での限界滑動量10cmを越えたことを示す。
 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。計算値は二つあるが、これは位相 I, II に対応し、ここでは位相 I の時の方が全体の波力は大きい。新しく提案された曲面二重スリットケーソンの波力の計算値は、滑動実験結果や波力実験結果に一致している。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堤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。

最後に、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この設計法の拡張性について調べる。図-14は、2章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、直立混成堤の滑動合成波力の計算値で各種断面の滑動合成波力の実験値を除いた値をプロットしている。横軸は H_{max} である。図中の点線および実線は、その計算値である。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、従来の設計法によるものである。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。

5 まとめ

曲面スリットケーソンを改良した曲面二重スリットケーソンを考案し、それが耐波安定性等にすぐれていることを示した。また、曲面二重スリットケーソン堤の水理特性、波力特性を大型実験で検討し、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ls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。

参考文献

- 1) 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4号, 1980.12, pp3~53.
- 2) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 1990, pp85~117.
- 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.

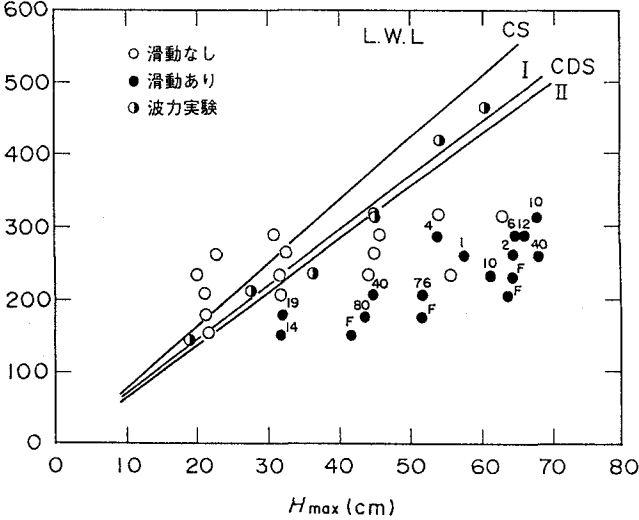


図-13 滑動合成波力

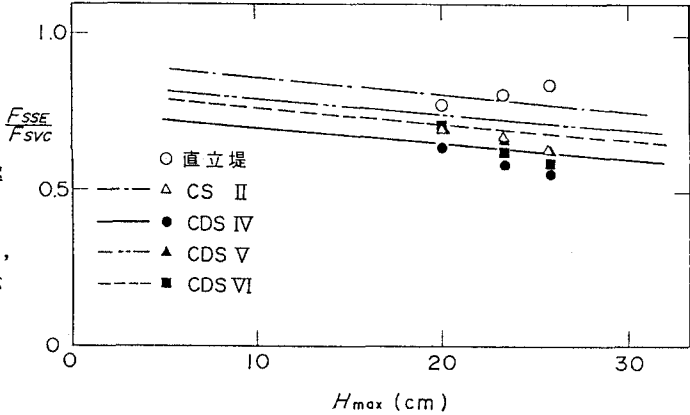


図-14 各種堤体形状に対する新設計法の応用