

直立消波ケーソンの模型実験の一例

— 大水深・大波浪海域への適用を目指して —

An Example of Model Experiment for Wave absorbing caisson

林 恒一郎*・高田 悦子**・五月女 誠***・長谷川 巖****

Koichiro Hayashi, Etsuko Takata, Makoto Saotome and Iwao Hasegawa

A wave absorbing caisson breakwater, which has less construction cost due to smaller cross-section than breakwater covered with wave-dissipating blocks, has been developed for years, is being used as port of breakwater in calm sea. However, the wave absorbing caisson breakwater has not been applied yet to rough sea, which has greater sea-depth and stronger wave force. In order to develop the wave absorbing caisson which is applicable to rough sea like offshore area of the Port of Onahama, Fukushima, two-dimensional hydraulic model experiments were carried out and also successful in finding out a feasible cross-section of the wave absorbing caisson. This paper shows the results of two-dimensional hydraulic model experiments for wave absorbing caisson for rough sea breakwater.

keywords : model experiment, wave absorbing caisson, reflection coefficient, wave force

1. はじめに

消波ブロック被覆堤と比べて断面が小さく経済的な直立消波ケーソン堤が現地に適用されるようになって久しいが、その適用地は湾内などの比較的波浪が静穏な海域に限られている。しかし、波浪条件が厳しく消波ブロック被覆堤では防波堤断面が大きくなる場合ほど、経済的な面から断面の縮小が要求される。

そこで、本研究では、直立消波ケーソン堤を外洋に面する第一線の防波堤に適用することを目的として、模型実験により防波堤断面の検討を実施した。ところが、適用可能と判断するまでには厳しい波浪条件のもとにおける反射率や部材波力の低減などに工夫が必要で、検討項目は多岐にわたった。本論文ではその研究内容を紹介する。

2. 大波浪海域への適用の問題点

直立消波ケーソンの反射率低減効果は遊水室幅 B と波長 L の関係によって異なり、 $B/L=0.15\sim0.20$ 程度の条件で反射率が最も小さくなり、 B/L がそれよりも小さいか大きい条件では、反射率の低減効果が低くなることが知られている(谷本ら, 1976)。

これまでの直立消波ケーソンの適用事例を見ると、遊水室幅は5m程度がほとんどである。これは、遊水室幅を大きくすると防波堤断面が大きくなって不経済であったり、既存のケーソンヤードでのケーソン製作が不可能になったりする問題によるものと考えられる。なお、谷本ら(1976)の実験結果を適用すると、遊水室幅5mの場合に十分な反射率低減効果が得られる周期は4～5s程度の波浪条件となる。

大水深・大波浪海域では湾内や港内の防波堤に比べてケーソンが大型になるので、遊水室幅をやや大きく出来る可能性もあるが、遊水室を大きくすると堤体重量が不足してケーソンの滑動安定性が確保できなくなる可能性もある。また、波長は周期の二乗に比例する(深海波の場合)ので、遊水室を多少大きくしても長い周期の(波長が長い)波浪が卓越する海域では B/L は小さくなってしまい、直立消波ケーソン堤による反射率の低減は難しいと判断される。

さらに、直立消波ケーソンではスリット壁と遊水室後壁の位相差や、各部材に作用する波力を考慮した設計が必要となり、波浪条件の厳しい条件ではこの点についても特に注意が必要である。

3. 実験内容

長さ38.0m×幅0.5m×高さ1.5mの二次元不規則波造波水路を用い、1/50の縮尺模型で、反射率実験、越波実験、波圧実験を実施した。対象防波堤は第二港湾建設局管内の小名浜港の外港防波堤(港湾計画完成時には防波護岸)とした。対象防波堤の設計波は $H_{1/3}=7.9\text{m}$ 、 $H_{\text{max}}=14.3\text{m}$ 、 $T_{1/3}=13.0\text{s}$ で、設置水深はD.L.-20.1mである。H.W.L.の潮位における防波堤設置位置での水深は21.6mで、設計波の波長 L は173mとなる。

なお、本論文では、実験結果をフルードの相似則に従って現地に換算した数値で示した。

* (正会員)運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所

** 運輸省港湾技術研究所 水工部波浪研究室 (元 横浜調査設計事務所 水理・環境実験センター)

*** 運輸省第二港湾建設局 鹿島港湾工事事務所 (元 横浜調査設計事務所 水理・環境実験センター)

**** 株式会社エコー 環境水理部 横浜分室

当該防波堤には、スリット壁よりも遊水室後壁の方が高い(図 1 参照)直立消波ケーソンの適用が計画されていた。実験ではスリットの開口率、スリット壁の高さ、隔壁のあり・なし、パラペットの設置位置などを変更し、反射率を0.5未満に抑制し、かつ、部材に作用する波力が大きくならないケーソン断面を検討した。図 1においてパラペットを遊水室後壁の位置に設置するのは防波堤の天端を高くして越波を抑制する目的である。比較案として実施したパラペット後退型は、遊水室後壁とパラペットに作用する波力の位相をずらして合成波力を小さくすることと、天端高を抑制することを考慮したものである。

実験では、まず越波実験と反射率実験を実施し、遊水室幅や天端高などのケーソン諸元を概略決定した。この時点では対象防波堤の断面は決定していなかったため、図 1とは異なる断面で模型実験を実施した。越波実験と反射率実験の結果を適用して図 1の防波堤断面を仮決定し、この断面に対して波圧実験を実施して、各部材に作用する波力が小さくなるケーソン形状を検討した。

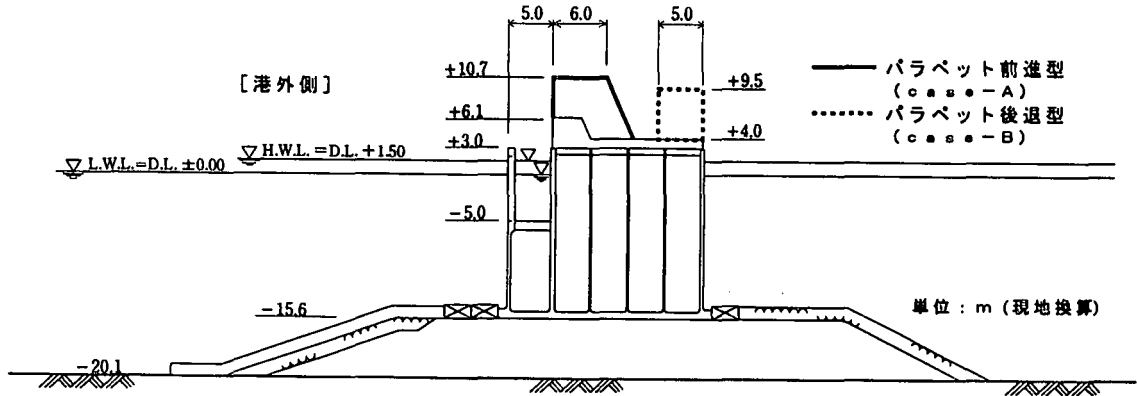


図 1 波圧実験の防波堤断面(ケーソン模型本体はアクリル製、ケーソン底面はモルタル製、マウンドは碎石で整形)

4. 実験の条件と結果

4.1 越波実験の条件

越波実験実施時には対象防波堤の断面形状は決定していなかったため、図 2に示すような防波堤断面を適用し、スリット壁の高さや遊水室後壁の高さを変更して越波流量を比較した。遊水室床版の高さは -5.0m 、遊水室幅は 5.0m で、スリットの開口率は20%である。なお、スリット壁を支えるためにスリット壁上部には図中右下のように梁をつけた。

波浪条件は有義波の諸元で $6\text{s}-2.1\text{m}$ 、 $8\text{s}-3.5\text{m}$ 、 $10\text{s}-5.3\text{m}$ 、 $13\text{s}-9.0\text{m}$ の4波浪について実施した。ただし、越波流量には波の不規則性が大きく影響するので、各波浪の初期位相を3種類に変えて造波信号を作成し、合計12波浪についての実験を実施した。各ケースでの波作用数は200波である。

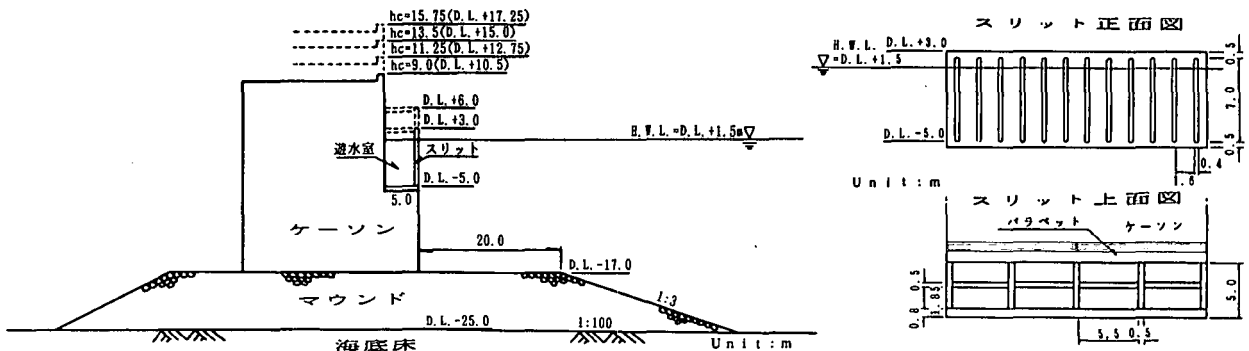


図 2 越波実験と反射率実験の防波堤断面(ケーソン本体は木製、スリット壁はアクリル製)

4.2 越波実験結果

図 3は越波実験の結果である。この結果から次のことが言える。

- ①周期 6.0s のケースでは越波を生じなかった(越波がないので図中に Δ や ∇ のプロットはされていない)。
- ②周期 8.0s のケースでは静止水面上の天端高 hc が大きい場合には越波を生じない。
- ③周期 10.0s のケースでは hc が大きいほど越波流量が少なく、 $hc=13.5\text{m}$ 以上では越波を生じないケースもあった。
- ④周期 13.0s のケースでは $hc=9.0\text{m}$ の場合に越波流量が $0.2\text{m}^3/\text{m/s}$ 程度で $hc=15.75\text{m}$ の場合には $0.015\text{m}^3/\text{m/s}$ 程度であった。
- ⑤今回の実験条件では、スリット壁天端高の違いによる越波流量の相違は認められなかった。

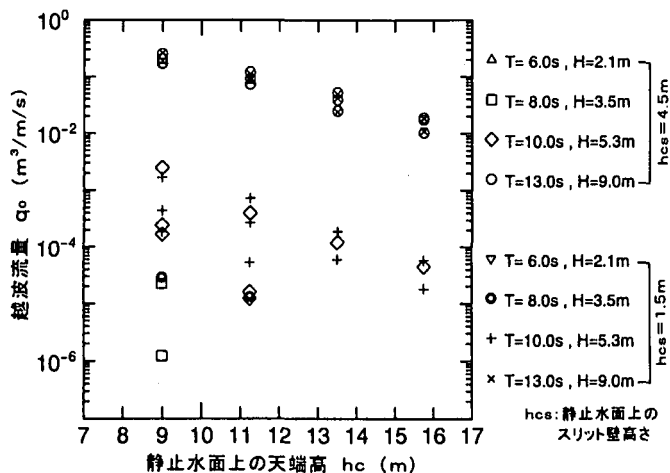


図 3 遊水室後壁の天端高と越波流量の関係

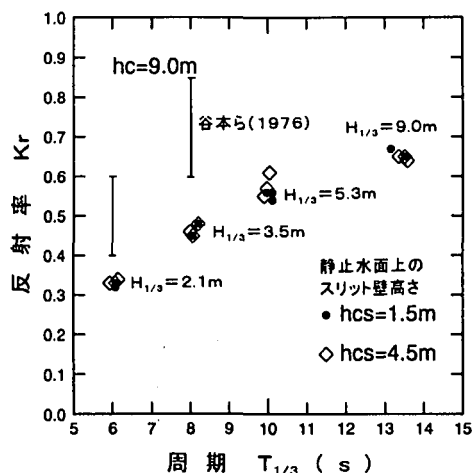


図 4 静止水面上のスリット壁高さと反射率の関係

4.3 反射率実験の条件

反射率実験は前出図 2 に示した越波実験と同一の模型及び波浪条件で実施した。ただし、遊水室後壁の高さは $hc = 9.0\text{m}$ とし、静止水面上のスリット壁高さ hcs の違いによる反射率の相違を比較した。波作用数は 200 波である。

4.4 反射率実験結果

反射率の実験結果は図 4 に示すとおりである。この結果から次のことがわかった。

- ① 周期が長く波高が大きいと、反射率が大きくなる。
- ② 今回の実験条件では、スリット壁高さの違いによる反射率の相違は認められなかった。
- ③ 周期 8.0s、波高 3.5m のケースで反射率が 50% 未満に抑制されており、船舶の航行が可能な条件下では、十分な反射率低減効果が得られる。

反射率実験では $hc = 9.0\text{m}$ としたので、実験中には図 3 に示したとおりの越波を生じていた。越波を生じると反射率が小さくなる可能性が考えられたが、確認のために実施した $hc = 15.75\text{m}$ の場合の反射率も図 4 と同等の結果であった。また、本実験条件の場合の反射率を谷本ら (1976) で算定すると、周期 6s の場合に $Kr = 0.4 \sim 0.6$ 、周期 8s の場合に $Kr = 0.6 \sim 0.85$ であるので、本実験結果は谷本ら (1976) よりやや小さな反射率を示したと言える。

4.5 波圧実験の条件

前述の越波と反射率の実験結果から、当該防波堤の断面が前出図 1 のとおり仮決定された。ところが、直立消波ケーソンはスリット壁が薄いので、大波浪海域において部材の強度が十分に確保されるか、あるいは、消波ブロックで被覆しなくても滑動に対して安定であるかなど、不明な点が多かった。そこで、波圧測定実験と滑動実験を実施した。

実験断面は前出図 1 のとおりである。実験波浪は規則波とし、設計波の $H_{\max}$ を造波することを試みたが、実験水槽では、砕波を生じて設計波の最大波高 $H_{\max} = 14.3\text{m}$ (H.W.L. 時) が発生し得なかったため、防波堤設置水深での砕波限界波高として H.W.L. 時に 12.4m、L.W.L. 時に 12.1m の波高を適用した。波の周期は設計波の 13.0s とした。

波圧実験では、反射波の影響を生じないように有効波 7 波を作用させ、波圧データの収集は 500Hz で行った。波圧測定点は図 5 のとおりである。

測定データは、各測点ごとに波圧のピーク値を解析した。また、位相差を考慮した合成波力を求め、これらの比較によって、適切なパラペット設置位置を決定した。

4.6 波圧実験結果

図 6 は測点別波圧測定結果である。この結果より以下が把握できた。

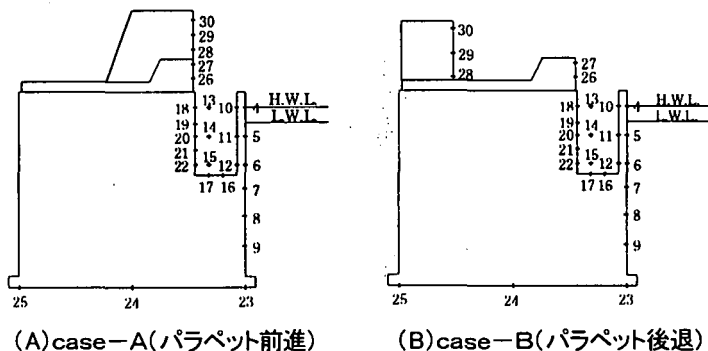


図 5 波圧実験における波圧測定点

- ① 測点4から25まではケーソン本体であり、case-A, Bとも概ね同等の波圧である。
- ② 遊水室後壁の上部(測点18~20)には比較的大きな波圧が作用し、その波圧はcase-Bのほうが若干大きい。
- ③ case-A, Bともパラペット(測点28~30)に大きな波圧が作用する。
- ④ パラペットに作用する波圧はcase-Bで非常に大きい。

上記の②, ④を考慮して、case-Aのパラペット前進型を選定した。ただし、パラペット前進型とする場合にも遊水室後壁の上部やパラペットにはやや大きな波圧が作用するので、設計の際には鉄筋の配筋等に注意が必要であることがわかった。

合成波力は、遊水室後壁に作用する波力とパラペットに作用する波力の位相を分散できるcase-Bのほうが、同位相のcase-Aより小さかった。ただし、パラペット設置時には背後が埋め立てられて防波護岸となるので、ケーソンの滑動に対する危険性が小さくなることを考慮してパラペット前進型のcase-Aでも問題ないと判断した。

なお、背後が埋め立てられるまではパラペットを設置しない断面で防波堤としての機能が要求されるために、滑動安定性に対する検討が必要であった。そこで、直立消波ケーソンであることを考慮せずに、前出図1の直立消波ケーソンの重量を、同じ大きさの直立堤(混成堤)として合田式(合田, 1990)によって算定した堤体重量に調整して滑動実験を実施したところ、滑動を開始する波高は算定結果とよく一致していた。従って、今回の実験条件では、天端高が同一の通常の混成堤として堤体重量を算定することが可能であることがわかった。

4.7 ケーソン形状の変更に伴う反射率の相違

波圧測定実験を実施した堤体模型では、現地適用のための概略設計を実施した堤体形状を適用したので、スリット壁や遊水室内部の形状が前述の反射率実験の場合とは異なっていた。そこで、変更後の堤体模型を用いて反射率実験を実施したところ(図7)、前述の反射率実験よりも反射率が大きくなってしまった。前述の反射率実験とのケーソン形状の主な違いは以下のとおりである。なお、()内は変更の理由である。

- ① スリットの開口率を20%(図2右上)から25%(図8)に変更(斜め入射の場合の開口率確保)
- ② 細いスリットを多く配置する形状からやや広いスリットを少なく配置する形状に変更(ケーソン製作の施工性を考慮)
- ③ スリット壁の支えを梁から隔壁に変更(部材波力の低減を考慮)
- ④ スリット孔上部の水平部材高さの変更(部材強度確保のために0.5mから1.0mに変更)

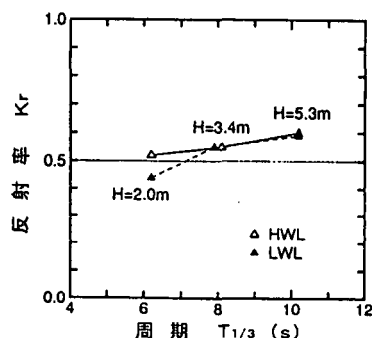


図7 波圧実験断面での反射率測定結果

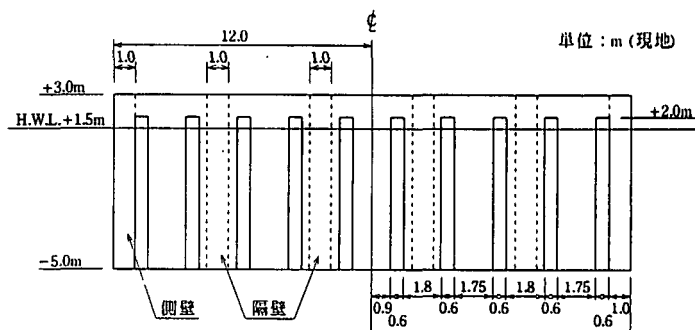


図8 波圧実験に用いたスリット壁の形状

図7によると、現地に即したケーソン形状における反射率は、周期6s、波高2mの場合に40%程度で、周期8s、波高3.4mでは50%を超えており、直立消波堤としてはもう少し反射率の低減を図りたかった。そこで、前述のケーソン形状の違いを1つずつ変更しながら反射率が大きくなった原因を追求した。

その結果、前述した条件の相違②~④の3点が反射率増大の原因であることが判明した。それぞれがどのように影響したかは正確にはわからないが、我々は以下のように解釈した。

- ② 幅の広いスリット孔を広い間隔で設置すると、開口率が同一で幅の狭いスリット孔を細かく配置する場合よりも、直立壁の部分の幅が広くなり、反射率が増大する。
- ③ 隔壁を設置すると個々の遊水室の容積が小さくなり、反射率低減効果が減殺される。

④ スリット孔上部の水平部材を高くすると、特に今回の実験条件のようにスリット壁の天端が静止水面よりそれほど高くない場合には、反射面が広がって反射率が大きくなる。

そこで、最終的にはスリット孔等のケーソン形状を図 9 のように変更した。この場合の反射率は図 10 に示すとおりで、概ね満足できるレベルまで低減することが出来た。

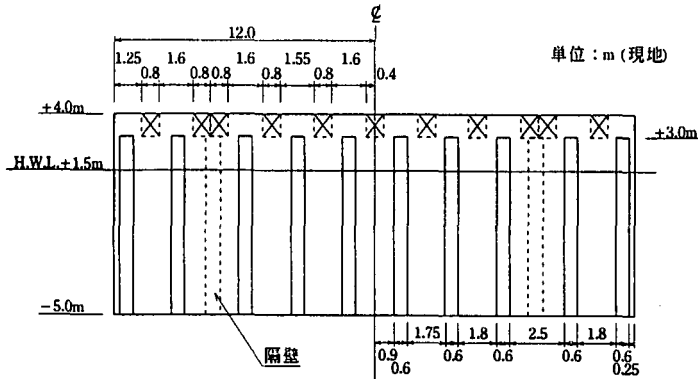


図 9 スリット壁形状の最終案

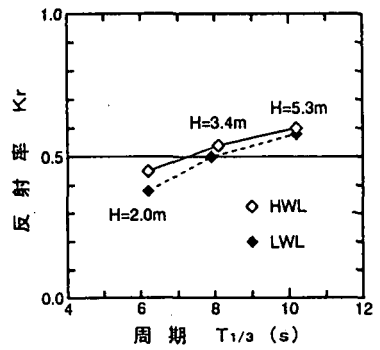


図 10 最終案の場合の反射率測定結果

4.8 既往の研究との比較

直立消波ケーソンの各部材に作用する波力については高橋ら(1991)に詳しい。そこで、本実験で得られた部材ごとの合成波力を高橋ら(1991)の結果と比較した。比較断面はパラペットなしの断面(防波堤断面)とcase-Aのパラペット前進型(防波護岸断面)で、スリットの形状は図 9 である。

なお、図 9 の断面においては、図 11 (この図面の数値は実験水槽の値で示した)に示すように衝撃的な波圧を生じていることがわかった。この衝撃的な波圧には①周期が長い(実験水槽で0.02s程度)、②全ての部材で同時に発生している、などの特徴があった。種々の検討の結果、この衝撃的な波圧の原因は、スリット壁を越波した波がパラペットにあたる瞬間に遊水室内に空気を閉じ込めて圧縮することによるものであることが判明した。同様の現象は谷本ら(1980)や高橋・谷本(1984)によっても報告されている。

今回の模型実験は二次元実験であり、構造物に対して波を直角に作用させているので、上述のように遊水室に空気を閉じ込めて衝撃的な圧力を生じた。しかし、多少でも波が斜めに入射すればこのような状況は起こりにくいことや、波が完全に揃って進行してくる可能性は少ないことを考えると、現地では空気圧縮圧力が本実験のように顕著に現れる可能性は少ないと判断した。そこで、高橋ら(1991)との比較には、波圧測定データから空気圧縮圧力の成分を除去した結果を適用した。

図 12(A)～(C)はスリット壁(図 5(A)の測点4～6及び10～12)、直立部(同7～9)、遊水室後壁(同18～22)の合成波力を高橋ら(1991)の結果と比較したものである。一般的な凡例は高橋ら(1991)が使用しているので、本実験結果は防波堤断面を“O”印で、防波護岸断面を“1”印で示した。なお、ケーソン形状の相違によって上部工(同26, 27)とパラペット(同28～30)は高橋ら(1991)との比較が出来なかったため、図 13のとおり、独自に図を作成した。なお、参考のために空気圧縮圧力を除去する前のデータについては“2”印で示した。

図 12, 図 13より、以下のことがわかった。なお、図中の縦軸は実験で得られた合成波力を、合田式(合田, 1990)で算定した波力で除して無次元化した値である。

- ① 本実験の条件は高橋ら(1991)の実験条件より波高が大きい。
- ② 押し波 I (高橋ら(1991)を参照されたい)でスリット壁に作用する波力は高橋ら(1991)の示す波力補正係数0.85より大きな値を示し、補正係数は1.0が適当である。
- ③ 引き波 I (同)でスリット壁に作用する波力は高橋らの結果より(絶対値が)小さく、高橋ら(1991)の提案する波力補正係数-0.35で算定が可能である。
- ④ 防波堤時の押し波 II b(同)の位相による遊水室後壁の合成波力は高橋ら(1991)の実験結果の傾向と一致する。ただし空気圧縮圧力を考慮すると、防波護岸での合成波力は高橋ら(1991)より明らかに大きい。

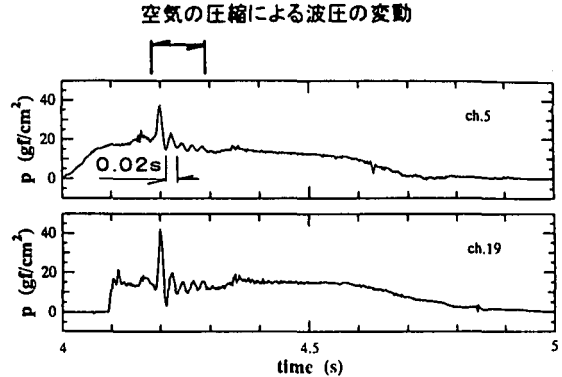


図 11 空気圧縮圧力による衝撃的な波圧の1例 (縮尺模型での値)

- ⑤ 上部工に作用する合成波力は遊水室後壁と同様の傾向である。
- ⑥ パラペットには合田式(合田, 1990)による算定結果の1.25～1.4倍の大きな波力が作用する。

以上の模型実験結果から、合田式(合田, 1990)に対する当該防波堤の波力補正係数を表 1のとおりに決定した。

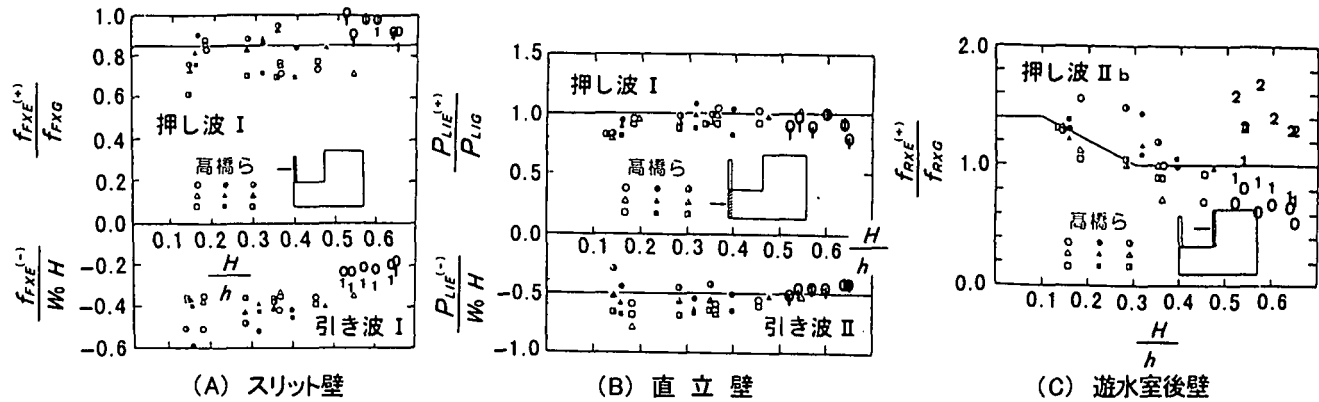


図 12 高橋ら(1991)との比較

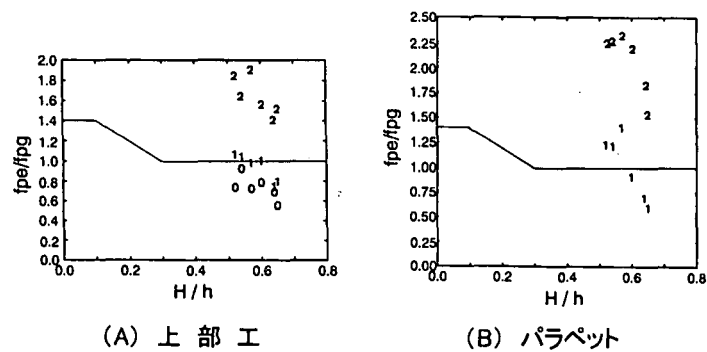


図 13 合田波力(合田, 1990)との比較

表 1 当該防波堤の波力補正係数と高橋ら(1991)の補正係数の比較

		波力補正係数	
		高橋ら(1991)	当該防波堤
スリット壁	押し波 I	0.85	1.00
	引き波 I	-0.35	-0.35
直立部	押し波 I	1.00	1.00
	引き波 II	0.50	0.50
遊水室後壁	押し波 II	1.00	1.00
上部工	—	—	1.10
パラペット	—	—	1.40

5. おわりに

模型実験によって、外洋に面する第一線の大水深・大波浪海域に対する、直立消波堤の適用性を検討した。主要な結論は、以下のとおりである。

- ① 今回の実験条件では、スリット壁を高くしても、設計波に対する越波流量の顕著な減少は見られなかった(図 3)。
- ② 設計波のような異常波浪時には船舶の航行が不可能なので、通常時化波浪(波高2～3m, 周期6～8s程度)を対象とすることにより反射率の目標値を満足した(図 4, 10)。
- ③ パラペットを後ろにずらすと、遊水室後壁との位相の分散が可能となり、合成波力を小さくできる。ただし、パラペットを後ろにずらすと、スリット壁や遊水室後壁を越波した波が衝撃的に作用し、パラペットに作用する波力が大きくなる。
- ④ スリット壁の天端が低く遊水室後壁の天端が高い断面では、砕波によって空気が閉じ込められることにより衝撃的に大きな波圧が作用することがある(図 11)。
- ⑤ 現地では空気圧縮圧力を生じないと仮定すれば、ケーソン本体に作用する押し波(高橋ら, 1991)の波力は合田式で評価できた。ただし今回の実験条件では、上部工やパラペットに作用する波力は合田式よりも大きかった(表 1)。
- ⑥ 1)反射率の対象波浪を通常の時化波浪とする、2)衝撃的な部材波圧生じないように受圧部分の断面形状を工夫する、などにより、外洋に面する第一線の防波堤に直立消波ケーソン堤を適用できる可能性が確認できた。

なお、本実験結果を受けて当該防波堤の詳細設計が実施され、既に現地での施工も開始されている。

参考文献

合田良貴(1990):[増補改訂]港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 88-109
 高橋重雄・谷本勝利(1984):直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力(第2報)ー現地観測波圧データの解析ー, 港湾技術研究所報告, 第23巻, 第2号
 高橋重雄・下迫健一郎・佐々木均(1991):直立消波ケーソンの部材波力特性と耐波設計法, 港湾技術研究所報告, 第30巻, 第4号
 谷本勝利・原中祐人・高橋重雄・小松和彦・轟 正彦・大里睦男(1976):各種ケーソン式混成堤の反射・越波および波力特性に関する模型実験, 港湾技研資料, No.246
 谷本勝利・高橋重雄・村永 努(1980):直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力ー空気圧縮モデルによる検討ー, 港湾技術研究所報告, 第19巻, 第1号