

フレア型護岸の大水深域への適用 における護岸水理特性の検討

STUDY ON HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF FLARING SHAPED SEAWALL IN DEEPWATER

村上 啓介¹・片岡 保人²・竹鼻 直人³・小長野 宰⁴・上久保 祐志⁵

Keisuke MURAKAMI, Yasuto KATAOKA, Naoto TAKEHANA, Hiroshi KONAGANO and Yuji KAMIKUBO

¹ 正会員 博士(工学) 宮崎大学助教授 土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

² 正会員 (株) 神戸製鋼所 機械研究所 構造強度研究室

³ 正会員 (株) 神戸製鋼所 都市環境事業部 構造技術部

⁴ 正会員 (株) 大日本コンサルタント

⁵ 学生会員 工修 九州大学大学院工学研究科

Hydraulic Characteristics of Flaring Shaped Seawall (FSS) in deepwater were investigated experimentally. A minimum crest height on which no wave overtopping is allowed, a reflection coefficient and a wave overtopping rate were measured for two types of FSS with a quadrant circular cross section and a semicircular one. Above three factors of FSS were compared with those of a conventional vertical seawall to clarify efficiency of the proposed seawall in deepwater. The minimum crest height of FSS is smaller than that of the vertical seawall and this effectiveness becomes large with increase of offshore wave steepness. The same results were obtained for the wave overtopping. The reflection coefficient of FSS with a semicircular cross section becomes smaller than that with a quadrant circular cross section and the vertical seawall.

Key Words : Flaring shaped seawall, crest height, reflection coefficient,
wave overtopping rate

1. はじめに

大水深域に沖合人工島を建設して洋上空港として利用する構想がある。新たに創出される陸地や背後施設を波浪から確実に防護するためには越波量を極力低減する必要がある。越波量を低減する方法としては、護岸の天端を十分高くして前面に消波工を設置するのが一般的であるが、大水深域を対象とする場合には、その断面は巨大なものとなり従来の手法をそのまま踏襲することは合理的とは言えない。また、天端が高いことは水際線を親水空間として利用することや景観に対しても障害となる。越波量の低減を目的とした護岸断面はいくつか提案されては

いるが(例えば、参考文献 1)～4)), いずれも低天端でなおかつ高い越波阻止機能を有する護岸断面と成り得ているとは言えない。

著者らは、低天端で、かつ高い越波阻止機能を有する護岸の開発を目的として、深い円弧状のパラペット断面を有するフレア型護岸(図-1 参照)を提案し、その越波阻止機能や作用波力の特性を検討してきた。その結果、深いパラペット部での波返しの効果により、フレア型護岸が従来の直立消波護岸に比べて極めて越波し難いことや、波の打ち上げ高さが非常に低いことなどを示した⁵⁾。また、凹形状のパラペット部で強制的に波を返すために生じる衝撃砕波圧を低減するための前面消波工の諸元につい

ても明らかにした⁶⁾⁷⁾。これらの検討結果は、護岸の設置位置が砕波点近傍あるいは砕波帯内の場合についてのものであるが、重複波領域となる大水深波浪場においてもフレア型護岸が有効に機能することが予想される。

本研究では、フレア型護岸を大水深域へ適用した場合の越波阻止機能を限界天端高さ（越波量ゼロを満足する最小の護岸天端高さ）により評価する。つぎに、越波を許容した場合のフレア型護岸の越波量特性と直立消波護岸に対する越波量の低減効果について検討する。最後に、フレア型護岸の波の反射特性について検討する。

2. 限界天端高さの特性

重複波領域におけるフレア型護岸の越波阻止機能を評価することを目的に、2次元反射吸収式造波水槽（長さ15m、幅60cm、高さ60cm）を用いて、図-2に示すModel-A（1/4円弧断面）、Model-B（1/2円弧断面）およびModel-C（直立断面）の限

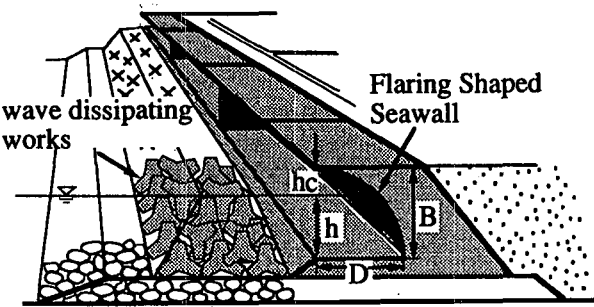


図-1 フレア型護岸の概念図

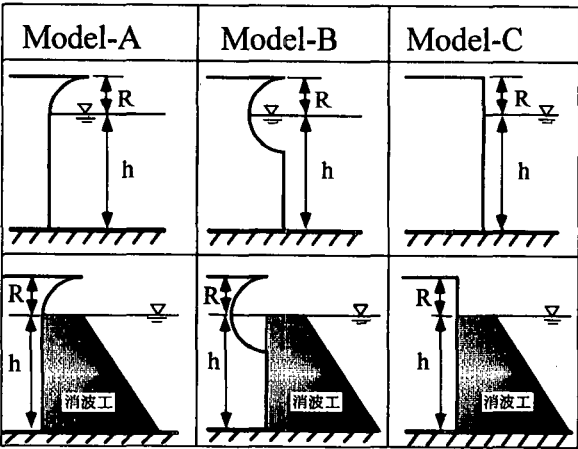


図-2 実験に用いた護岸模型

界天端高さの測定をおこなった。模型の天端高さ R は、3cm、6cm、10cm の3種類とし、模型を一定水深 $h=40\text{cm}$ の水平床上に設置して実験をおこなった。入射波の周期は $T=0.6\sim 2.0$ 秒の間で0.2秒毎に設定し、各周期について入射波の波高 H_0 を徐々に変化させ、越波が生じない最大波高を求めて R/H_0 を相対限界天端高さとして定義した。

図-3は、入射波の波形勾配 H_0/L_0 に対する相対限界天端高さ R/H_0 を示したものである。護岸の前面には6.2t型の消波ブロックを乱積み状態で作成（天端2個並び）した消波工を設置している。消波工の天端は、円弧部での波返し効果を妨げない目的で、静水面と一致する高さにとった（図-2下段）。フレア型護岸（Model-A,B）の限界天端高さは波形

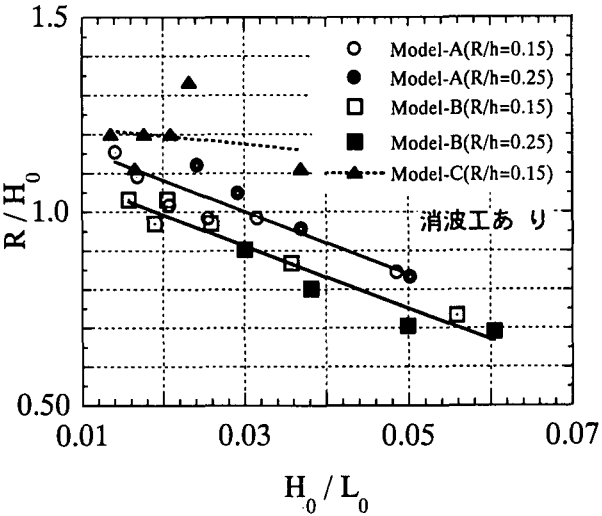


図-3 波形勾配に対する相対限界天端高さの特性（消波工あり）

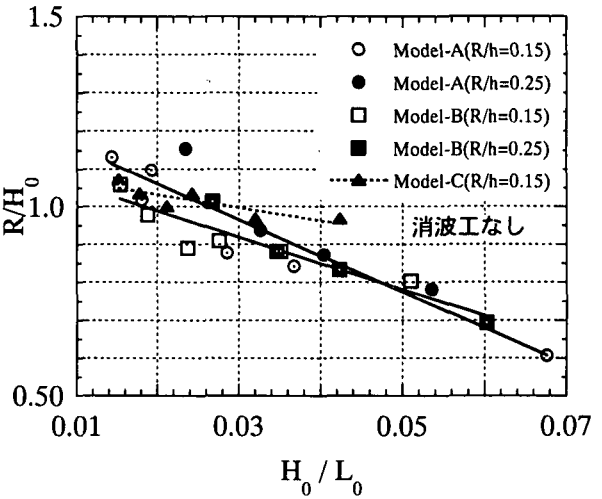


図-4 波形勾配に対する相対限界天端高さの特性（消波工なし）

勾配の増加に伴い減少する傾向があり、Model-B では沖波波高と同程度かそれ以下の天端高さで越波量ゼロを満足することが可能であることがわかる。フレア型護岸 (Model-A, B) と直立護岸 (Model-C) の相対限界天端高さを比較すると、波形勾配が小さい場合 (例えば, $H_0/L_0 < 0.02$) は両者の差は小さいが、波形勾配が大きくなるにしたがって両者の差は大きくなる。このことから、重複波領域におけるフレア型護岸は、波形勾配の大きい波に対してより高い越波阻止機能を有することがわかる。フレア型護岸の Model-A と B を比較すると、Model-B の限界天端高さのほうが僅かではあるが小さくなっている。

図-4 は、護岸前面に消波工がない場合 (図-2 上段) の相対限界天端高さ R/H_0 の特性を示したものである。図-3 の結果と比較すると、消波工の有無によるフレア型護岸の限界天端高さには大きな違いは見られな。一方、直立護岸の場合は、消波工がある場合のように消波工のり面を波が遡上することはなく、完全重複波に近い状態になっているため、限界天端高さは消波工がある場合に比べて低くなり、フレア型護岸との差は相対的に小さくなっている。

3. フレア型護岸の越波量特性と低減効果

フレア型護岸は、低天端で越波量をゼロ (非越波) とすることが可能であるところにその特徴があるが、設計波は統計的に決められるため、実際には非越波が完全に満足されとは限らない。また、非越波を絶対条件とはせずに、ある程度の越波量を許

容するほうが設計上は合理的な場合もある。そこで、フレア型護岸の越波量の特性と、直立消波護岸に対する越波量の低減効果について検討した。

実験に用いた護岸断面は、図-2 に示す Model-A (1/4 円弧断面)、Model-B (1/2 円弧断面) および Model-C (直立断面) で、天端が静水面と等しい消波工を護岸前面に設置している。模型の天端高さは $R=6\text{cm}$ とし、模型を一定水深 $h=40\text{cm}$ の水平床上に設置して実験をおこなった。入射波の波形勾配は $H_0/L_0=0.04, 0.036, 0.03$ の 3 通りとし、各波形勾配について、越波が生じない最大波高からその 2 倍程度まで徐々に波高を大きくして越波量を測定した。

図-5~図-7 は、フレア型護岸の越波量特性を、

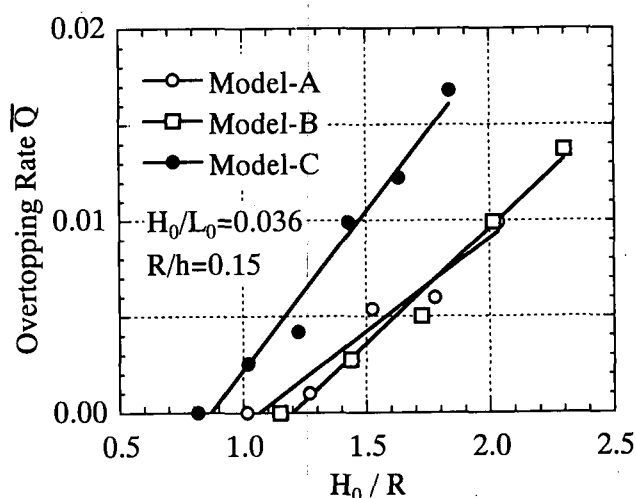


図-6 フレア型護岸の越波量特性
($H_0/L_0=0.036$)

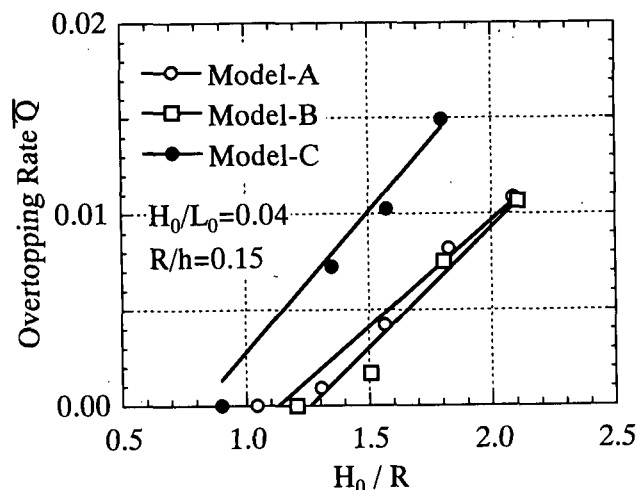


図-5 フレア型護岸の越波量特性
($H_0/L_0=0.04$)

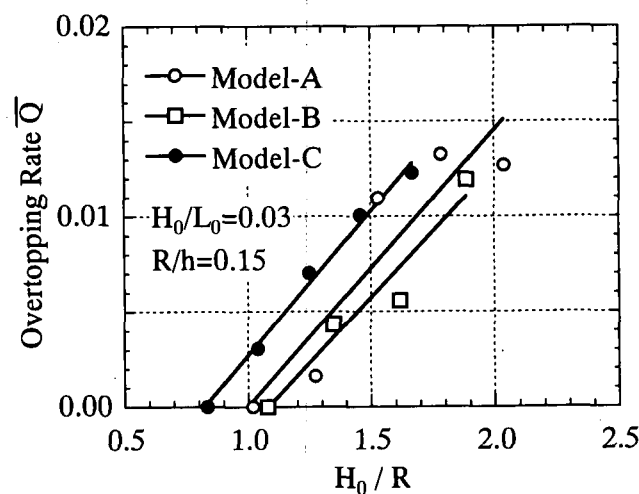


図-7 フレア型護岸の越波量特性
($H_0/L_0=0.03$)

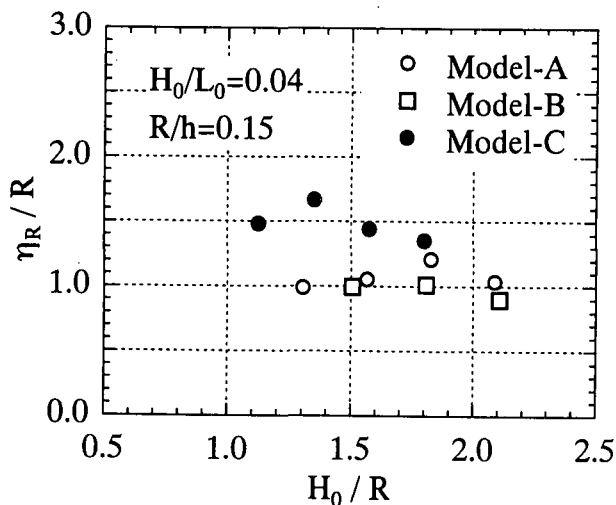


図-8 護岸前面での波の最大打ち上げ高さ
($H_0/L_0=0.04$)

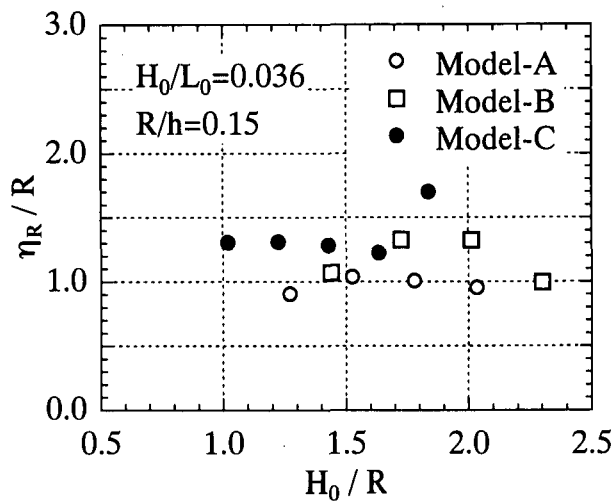


図-9 護岸前面での波の最大打ち上げ高さ
($H_0/L_0=0.036$)

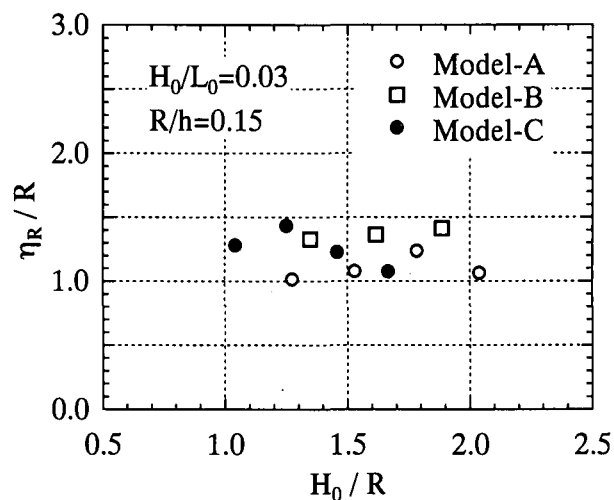


図-10 護岸前面での波の最大打ち上げ高さ
($H_0/L_0=0.03$)

入射波の波形勾配がそれぞれ異なる場合について示したものである。図の横軸は護岸天端高さ R に対する相対入射波高 H_0/R を表し、縦軸は無次元越波量 $\bar{Q}$ ($=Q/TB\sqrt{2gH_0^3}$) を表している。いずれの波形勾配の場合も、フレア型護岸 (Model-A, B) および直立護岸 (Model-C) の越波量は、 H_0/R に対してほぼ直線的に増加する傾向を示し、フレア型護岸の越波量は直立護岸に比べて低減されていることがわかる。直立護岸では、波形勾配が異なる図-5, 6, 7において、 H_0/R に対する越波量の変化特性に大きな違いは見られないが、フレア型護岸では、波形勾配が大きくなるにしたがって越波量は減少する傾向にある。そのため、波形勾配が大きくなるにしたがって、直立消波護岸に対するフレア型護岸の越波量低減効果が高くなる。

護岸断面形状の違いによるこのような越波量の差は、護岸前面における波の最大打ち上げ高さの違いに関係している。図-8～図-10 は、図-5～図-7 に示した越波量を測定したときの、護岸前面における波の最大打ち上げ高さ η_R を示している。実験値のパラツキはあるが、入射波の波形勾配が $H_0/L_0=0.04$ の場合は、フレア型護岸の最大打ち上げ高さは直立護岸に比べてかなり小さく、 $\eta_R/R=1.0$ 程度の値を取っている。入射波の波形勾配が $H_0/L_0=0.036$ になると打ち上げ高さの差は小さくなるが、フレア型護岸の打ち上げ高さは直立護岸に比べて若干低い値を取っている。実験によると、フレア型護岸の曲率半径に対して入射波の波長が短いほ

ど波返しが効果的におこなわれて波の打ち上げ高さが低く抑えられる傾向が見られた。このことが、フレア型断面の越波量の低減に大きく寄与している。一方、入射波の波形勾配が $H_0/L_0=0.03$ の場合は、各護岸の最大打ち上げ高さに大きな違いは見られず、結果として直立護岸に対するフレア型護岸の越波量の低減効果は僅かであったと考えられる。

4. フレア型護岸の反射率の特性

構造物からの波の反射は、その前面水域や伝播していった先の水域で著しい波の擾乱を招く場合があるため、構造物の反射特性を把握して波の反射を

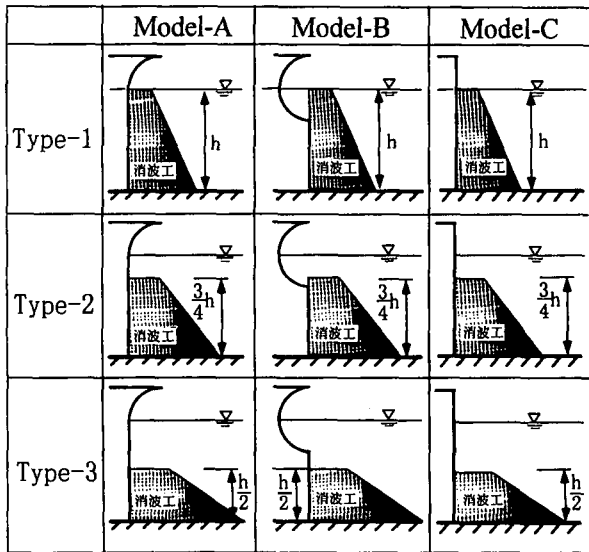


図-11 実験に用いた護岸断面

低減することは重要である。本節では、フレア型護岸の反射特性を実験により明らかにして、その特性を直立護岸と比較した結果を示す。

実験に用いた護岸断面は、図-11 に示す Model-A (1/4 円弧断面)、Model-B (1/2 円弧断面) および Model-C (直立断面) の 3 断面である。護岸の反射率は消波工の諸元 (消波工の天端高さや被覆厚) により大きく変化する。ここでは、フレア型護岸の波返し効果を損なわない目的で、消波工の天端は Type-1~Type-3 (Type-1 は天端 2 個並び。Type-1~Type-3 の各消波工断面積は同じ) のように静水面以下にとり、各断面における反射率の特性を比較した。実験模型の天端高さは $R=3, 6, 10\text{cm}$ の 3 通りとし、一定水深 $h=40\text{cm}$ の水平床上に設置して実験をおこなった。入射波の波高は、護岸断面形状と波浪条件で決まる越波が生じない最大波高とし、入射波の周期を $T=0.6\sim 2$ 秒の範囲で変化させ、護岸前面での水位変動を記録して分離推定法により反射率を求めた。なお、 $R=10\text{cm}$ ($R/h=0.25$) の場合は、入射波条件の一部が、実験水槽の造波限界を超えるため、他の天端高さについて実験した範囲と同じ範囲を全てカバーできていないところがある。

図-12~図-14 は、護岸の天端高さ R がそれぞれ異なる場合の反射率の特性を比較したものである。図-12 に示す $R/h=0.075$ では、護岸の断面形状による反射特性の違いは小さく、フレア型護岸の反射率は直立消波護岸とほぼ同じである。 $R/h=0.075$ 場合は入射波の波高が比較的小さいため、いずれの護

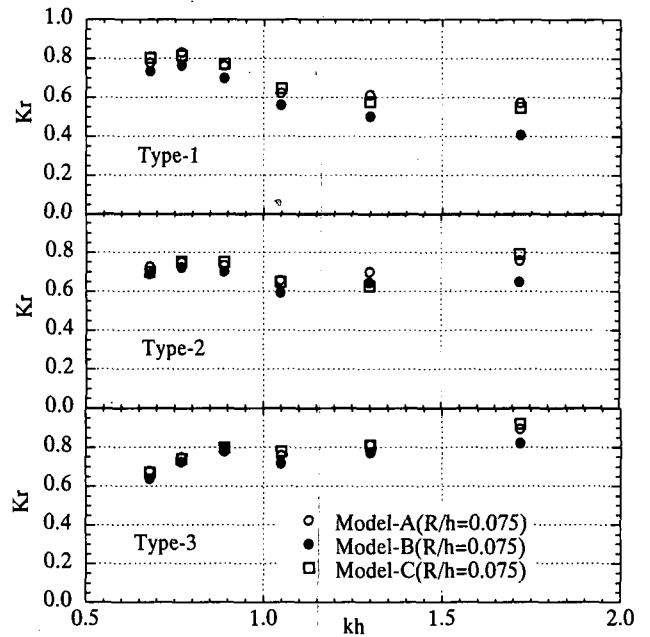


図-12 フレア型護岸の反射特性 ($R/h=0.075$)

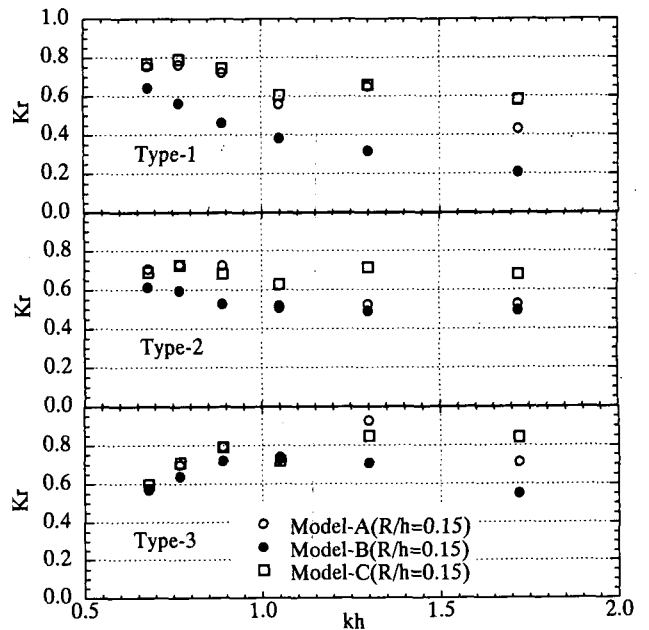


図-13 フレア型護岸の反射特性 ($R/h=0.15$)

岸断面もその前面は碎波を伴わない重複波となって類似した水面変動をしていたため、反射特性に違いがなかったと考えられる。

一方、図-13 と図-14 では、Model-A と Model-C の反射特性はほぼ同じであるが、Model-B のフレア型護岸の反射率は直立消波護岸に比べて小さくなる傾向が見られ、特に消波工の天端が高い Type-1 の

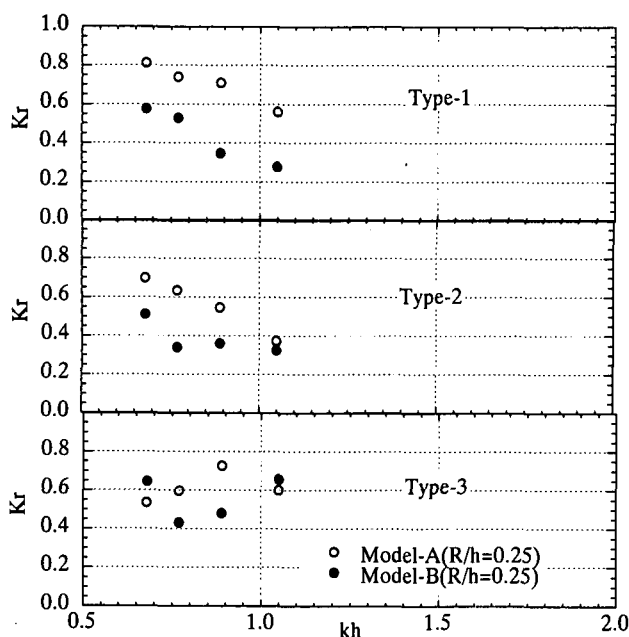


図-14 フレア型護岸の反射特性
($R/h=0.25$)

場合に顕著になる。フレア型護岸の場合は、波返しによりその前面で強い水面の擾乱が生じ、特に Model-B の場合は返した波の突っ込み点が消波工の天端付近になっているため、擾乱の程度はさらに強くなる。このような擾乱は直立消波護岸では見られず、水面の擾乱によるエネルギー損失が反射率の差として現れている。さらに、相対水深 kh が大きくなるにしたがって波返しの程度は強くなるので、Model-B の断面が直立護岸に比べてより低反射となる。なお、消波工の天端が低い Type-2, 3 では、消波工近傍での碎波の程度や波返しによる護岸前面での水面の擾乱は Type-1 に比べて小さくなり、Model-B と他の断面との反射率の差は Type-1 の場合ほど顕著に表れない。

5. おわりに

フレア型護岸を大水深域へ適用した場合の限界天端高さの特性と、越波を許容した場合の越波量の特性と直立消波護岸に対する越波量の低減効果、

およびフレア型護岸の断面形状が反射特性におよぼす効果について検討し、以下の結果を得た。

(1) 重複波領域におけるフレア型護岸の限界天端高さは沖波波高以下となる。また、入射波の波形勾配が大きくなるほど、フレア型護岸の越波阻止機能は直立消波護岸に比べて高くなる。

(2) フレア型護岸の越波量は直立消波護岸に比べて小さく、特に入射波の波形勾配が大きいほど直立消波護岸に対する越波量低減効果は高くなる。このことは、フレア型護岸の波の最大打ち上げ高さが直立消波護岸に比べて小さいことによる。

(3) フレア型護岸は、その前面の消波工の天端が高く、かつ入射波の波長が短い場合に直立消波護岸に比べて低反射の特性を示す。

参考文献

- 1) 井上雅夫：逆勾配のり面の水理特性について，第 21 回海岸工学講演会論文集，pp. 417-421, 1974
- 2) 高田彰，吉田吉治，藤川浩生：海岸堤防・護岸の断面形状と越波量との関係，第 26 回海岸工学講演会論文集，pp. 285-289, 1979
- 3) 山本正昭，西裕司：越波の少ない低天端堤の開発，第 31 回海岸工学講演会論文集，pp. 537-541, 1984
- 4) 河野二夫，高野重利，津田博規：曲面護岸と各種断面護岸による越波量の比較，海岸工学論文集，第 40 巻，pp. 681-685, 1993
- 5) 村上啓介，入江功，上久保祐志：非越波型防波護岸の護岸天端高さと作用波圧について，海岸工学論文集，第 43 巻，pp. 776-780, 1996
- 6) 村上啓介，上久保祐志，入江功，香月理，片岡保人，中岡威博：低天端消波工による非越波型防波護岸に作用する衝撃波圧の低減，海洋開発論文集，第 14 巻，pp. 375-380, 1998
- 7) 片岡保人，市川靖生，宇津野秀夫，竹鼻直人，濱崎義弘，村上啓介：非越波型護岸の高波浪域への適用における消波形式の基礎的検討，海洋開発論文集，第 15 巻（投稿中）

(1999. 4. 19 受付)