

浅海域を対象とした 非越波防波護岸断面の基礎的特性

STUDY ON BASIC CHARACTERISTICS OF NON-WAVE-OVERTOPPING TYPE SEAWALL IN SHALLOW WATER

上久保祐志¹・入江功²・村上啓介³・神田一紀⁴・片岡保人⁵・濱崎義弘⁶
Yuji KAMIKUBO, Isao IRIE, Keisuke MURAKAMI, Kazunori KANDA, Yasuto KATAOKA
and Yoshihiro HAMAZAKI

¹学生会員 工修 九州大学大学院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²正会員 工博 九州大学教授

³正会員 工博 宮崎大学助教授

⁴学生会員 九州大学大学院

⁵正会員 (株) 神戸製鋼所 機械研究所 構造強度研究室

⁶正会員 (株) 神戸製鋼所 都市環境事業部 構造技術部

The basic characteristics of a non-wave-overtopping type seawall in shallow water were investigated through a wave tank experiment and a numerical simulation. The minimum crest height which satisfies non-wave-overtopping condition, a wave pressure, a wave reflection and a water spray transported behind the seawall were measured in the experiment. The fluid motion near the seawall was obtained by numerical simulation based on SOLA-VOF method. These hydraulic factors of non-wave overtopping type seawall were compared with a conventional upright seawall and advantages of non-wave overtopping type seawall in control of wave overtopping were discussed.

Key Words : Non-wave-overtopping type seawall, overtopping, wave pressure, reflection coefficient, transport of spray, SOLA-VOF method

1. はじめに

護岸天端を低くして景観を妨げず、かつ護岸上を散策・遊漁といった親水空間として開放するためには、越波の阻止（越波量を限りなくゼロにすること）が重要な課題となるが、従来の直立消波護岸では十分な越波阻止機能は望めない。越波量の低減を目的として種々の護岸構造物が提案され、それらの水理特性について研究が進められているが¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾、基本的に越波量をゼロとすることはできない。著者らは十分な越波阻止機能を有し、かつ低天端となりうる護岸の一つとしてフレア型護岸（図-1）を提案した。初期は円弧の一部を断面として設定していたが、構造的および越波阻止機能を考慮した最適な断面形状を求めるためにその水理特性を実験的に検討した結果⁶⁾⁷⁾、図-2上段に示すフーチングを設けた断面形状に至った。本研究では、この最終断面（以下、新フレア型護岸と呼ぶ）に関して、その越波阻止機能、作用波圧特性、反射率、飛沫輸送量等

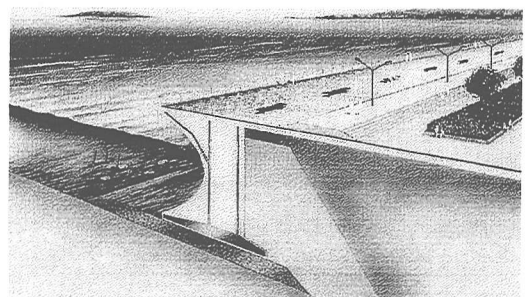


図-1 フレア型護岸の概念図

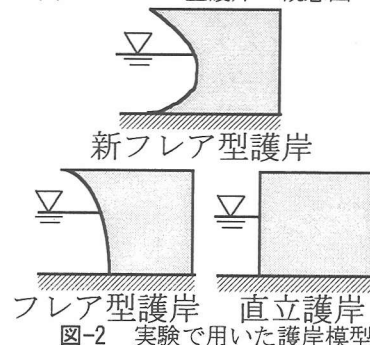


図-2 実験で用いた護岸模型

の水利特性を実験と数値計算により明らかにし、フーチングがない場合のフレア型護岸および直立護岸（図-2下段参照）と比較・検討する。

2. 水槽実験の方法と入射波条件

(1) 限界天端高さの実験

実験は、図-3に示す2次元造波水槽（長さ20.0m、高さ1.2m、奥行き0.6m、沖水深 $h_0=0.85\text{m}$ ）内に1/20の不透過傾斜海浜を設置し、図-2に示す各護岸断面（護岸高さ $B=22.5\text{cm}$ ）について、規則波および不規則波を作用させて行った。規則波の実験では沖波波高 $H_0/L_0=0.036$ のもとで入射波の波高を $H_0=6.0\text{cm}\sim 14.0\text{cm}$ の範囲で変化させ、設置水深 h を種々変えた場合に越波が生じない最小の天端高さ hc （限界天端高さ）を求めた。不規則波の実験では、沖波有義波高を $H_{1/3}=3.5\text{cm}\sim 9.0\text{cm}$ 、有義波周期を $T_{1/3}=0.79\text{s}\sim 1.30\text{s}$ の範囲で変化させ、新フレア型護岸の限界天端高さ hc を求めた。なお有義波周期は、沖波の有義波高と有義波の波長の比が0.036となるように求めた。両実験とも護岸前面に消波工を設置せずに行った。また、新フレア型護岸のフーチング部は、流体運動への影響を極力小さくする目的で常に水表面下に没するように設けるものとした。

(2) 作用波圧分布の測定

作用波圧に関する実験は図-3に示す2次元造波水槽内に、図-2に示す3種類の護岸模型を設置して行った。護岸の設置水深を $h=15.0\text{cm}$ 、護岸天端高さを $hc=7.5\text{cm}$ として波圧を測定した。まず、新フレア型護岸と直立護岸の作用波圧分布の相違を確認した。護岸前面には塩ビパイプ（外径22mm）を格子状に組み合わせて作成した消波工（空隙率 $\varepsilon=43.1\%$ ）を設置したが、天端高さは静水面と同等とした場合、護岸天端と静水面の中間に設定した場合について実験を行った。また、フーチングの設置による鉛直波力の低減効果を比較するために、新フレア型護岸とフレア型護岸の作用波圧を測定し、鉛直波力を比較した。護岸前面に設置した消波工の天端高さは、護岸天端と同じ高さとした。実験に用いた入射波条件は波形勾配 $H_0/L_0=0.036$ のもとで波高を $H_0=6.0\text{cm}\sim 14.0\text{cm}$ とした。波圧の測定には護岸前面に波圧センサー（受圧面直径8mm）を等間隔に埋め込み、出力信号をサンプリング周波数1KHzでデジタルデータレコーダに記録した。また、波圧波形が定常になった後から10波程度の波圧ピーク値の平均値を波圧値とした。

(3) 反射率の測定

実験は、図-3に示す2次元造波水槽内に勾配1/20のスロープを設置し、スロープ上に図-2に示す新フレア型護岸および直立護岸を設置して行った。

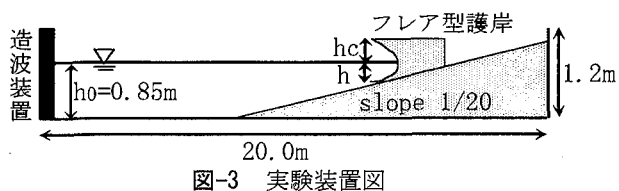


図-3 実験装置図

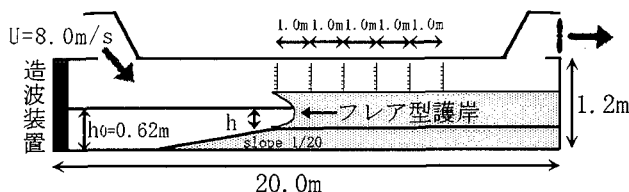


図-4 風洞実験装置図

護岸の沖約2m程度離れた位置に容量式波高計を2本設置して波高を測定し、分離推定法を用いて護岸の反射率を求めた。護岸前面に設置した消波工の天端高さは、護岸天端と静水面の中間に設定した。入射波は規則波を用い、 $H_0/L_0=0.036$ のもとで沖波波高を $H_0=4.0\text{cm}\sim 14.0\text{cm}$ 、護岸の設置水深 h は $h=9.0\text{cm}\sim 12.0\text{cm}$ とした。

(4) 飛沫輸送量の測定

実験は、図-4に示すように2次元造波水槽に風洞装置を取り付けて行った。内部に勾配1/20の不透過傾斜海浜を設置し、その上に新フレア型護岸および直立護岸を設け、規則波を造波させると同時に平均断面風速 $U=8.0\text{m/s}$ で風を吹かせて発生する飛沫量を測定した。護岸を沖浜帯に設置した場合は、護岸高さ $B=40.0\text{cm}$ で天端高さ $hc=10.0\text{cm}$ 、波高 $H_0=11.0\text{cm}$ 、砕波帯内に設置した場合は、護岸高さ $B=22.5\text{cm}$ で天端高さ $hc=11.0\text{cm}$ 、波高 $H_0=14.0\text{cm}$ の条件で実験を行った。飛沫量の測定位置は、護岸先端から岸側方向に対して1m毎に4～6断面を取り、飛沫採取ケースを鉛直方向に10cm毎に6個設置し、単位時間・単位面積当たりに輸送される飛沫量 $Q(\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{s})$ の鉛直分布を求めた。また、護岸前面に消波工を設置した場合についても同様の実験を行った。

3. 実験の結果と検討

(1) 新フレア型護岸の限界天端高さ特性

図-5は、相対水深 h/H_0 に対する限界天端高さ hc/H_0 の変化を示したものである。図中の●は規則波に対する新フレア型護岸の結果を示しており、◆はフレア型護岸、■は直立護岸の限界天端高さを示している。また、図中の▲は新フレア型護岸の不規則波に対する結果を示したものであるが、不規則波を作用させた場合の限界天端高さは波群中の最大波高に依存するものと考えられる。一般に構造物の設計における最大波高 H_{max} と有義波高 $H_{1/3}$ の関係は、混成防波堤では $H_{\text{max}}=1.8\times H_{1/3}$ が用いられる⁸⁾。そこで、図-4では沖波波高 H_0 を有義波高の1.8倍に取った場合について整理している。図より、新フレ

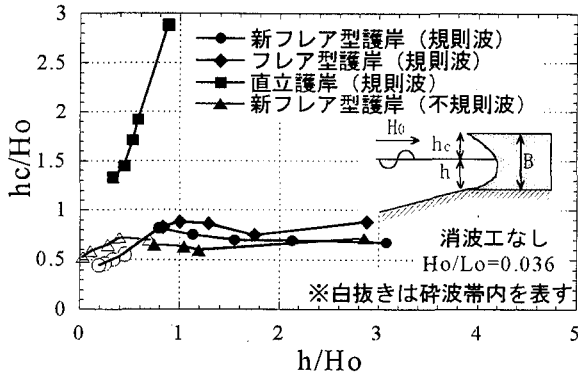


図-5 限界天端高さの相違

ア型護岸の限界天端高さ h_c は直立護岸に比べて小さく、格段に高い越波阻止機能を持っていることがわかる。また、フレア型護岸と比べてほぼ同等の越波阻止機能を持っており、フーチング部が常に水表面下にある条件であればフーチングは越波阻止機能にほとんど影響を与えないことがわかる。不規則波と規則波の実験結果を比較してみると、沖波帯においては護岸設置水深 h と限界天端高さ h_c を沖波最大波高 H_0 で整理すると規則波実験とほぼ同程度の結果が得られる。しかし、極浅海域においては、不規則波のほうが規則波に比べて h_c/H_0 は大きくなっている。これは、規則波においては砕波後に波高が大きく減衰するが、不規則波においては波群中の波高が大きい波が砕波しても砕波限界に達していない波は砕波による波高の減衰が生じず、結果として越波が生じやすくなるためと考えられる。

(2) 作用波圧分布の特性

図-6 は、図-2 の新フレア型護岸と直立護岸について、波高を $H_0=10.0\text{cm}$ とした場合にそれぞれの護岸に作用する波圧分布を示したものである。横軸は波圧を沖波波高相当の静水圧で無次元化したものを、縦軸は波圧計の設置位置（静水面がゼロ）をあらわしている。護岸前面には図中に示すように天端高さの異なる消波工を設置した。消波工(A)は天端高さを静水面と同等に設定し、消波工(B)は護岸天端と静水面の中間に設定したものである。グラフより、消波工(A)を設置した場合には、フレア型護岸は直立護岸に比べて大きな波圧が作用している。しかし消波工を(B)のように静水面からある程度出すと、フレア型護岸に作用する波圧は直立護岸程度に抑える事が可能となる。ただし、消波工の天端高さを護岸天端と同じ高さに設定すると、消波工上を水塊が遡上して越波が生じやすくなるデメリットがあるため、天端高さは静水面と護岸天端の中間程度が最適と考えられる。

図-7 は、新フレア型護岸およびフレア型護岸についてそれぞれ波圧分布を測定し、鉛直波力 F_z を求めたものである。鉛直波力は上向き正として表して

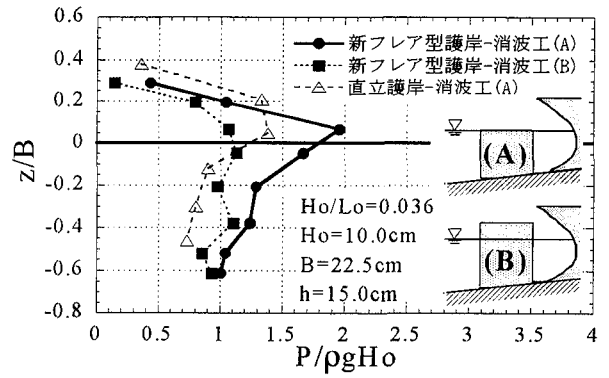


図-6 作用波圧分布

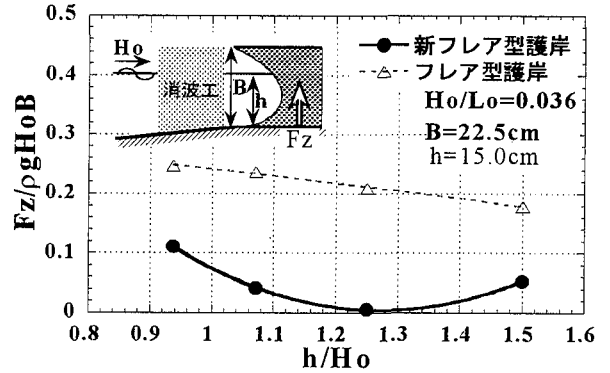


図-7 鉛直波力

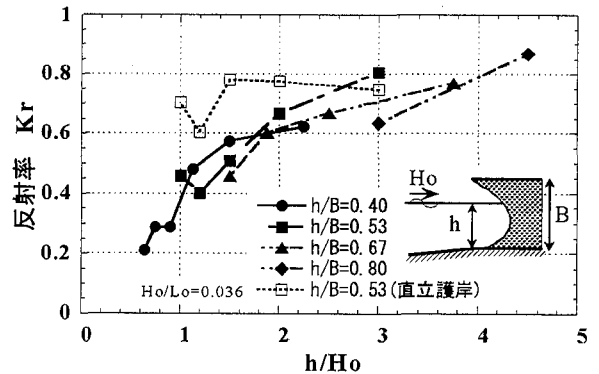


図-8 反射率（消波工なし）

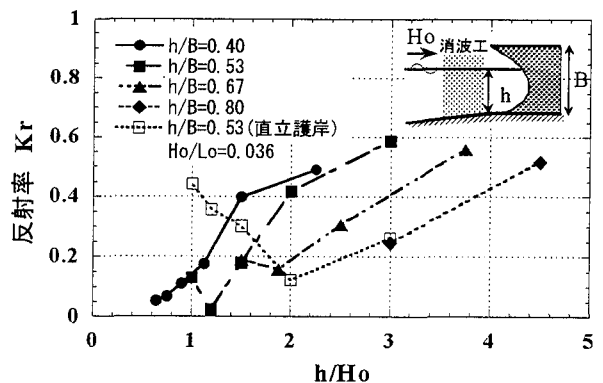


図-9 反射率（消波工あり）

いる。各波力は、波圧の鉛直成分を護岸面に沿って積分して求めた。今回は、単純に鉛直波力を比較するために、前面に設置した消波工の天端高さは護岸天端と同等にとってある。図-6に示すように、新フレア型護岸に作用する鉛直波力はフレア型護岸に比べてかなりの程度低減されている。これは、新フレア型護岸の下部に設置されているフーチング部に作用する波圧が護岸上部に作用する波圧と相殺されるためであり、フーチングが鉛直上向き波力低減に大きく寄与していることがわかる。

(3) 反射率の特性

護岸前面に消波工を設置しない場合と設置した場合の反射率をそれぞれ図-8と図-9に示す。図中の各プロットは、波形勾配 $H_0/L_0=0.036$ の波が護岸に作用した場合の相対設置水深 h/H_0 に対する反射率 K_r を示している。ただし、直立護岸では $h/B=0.53$ である。図-8において、直立護岸の反射率と比較すると、新フレア型護岸の反射率は波高の増大に従って大きく低減している。これは、波高の増加に伴い新フレア型護岸の断面に沿って返される水塊の量が大きくなり、前方の水面を乱す効果が大きくなるため反射率が低減するものと考えられる。

図-9に示す新フレア型護岸と直立護岸の結果を比較すると、波高が大きい場合には前述の理由で新フレア型護岸の反射率が小さくなるが、波高が小さい場合には直立護岸の反射率が小さくなっている。これは、直立護岸では護岸直前に消波工があり、護岸前面にできる重複波の腹の部分が消波工の影響でエネルギーを大きく損失するが、新フレア型護岸では護岸前面と消波工が離れており、エネルギー損失が少なくなるためであると考えられる。

(4) 飛沫輸送量

図-10は護岸を沖浜帯に設置した場合の最も沖側の測定位置における飛沫輸送量を示しており、縦軸は鉛直方向の測定位置、横軸は飛沫量 $Q(g/cm^2 \cdot s)$ を示している。グラフより、直立護岸に比べ新フレア型護岸の飛沫量が多いことがわかる。これは、直立護岸では護岸に作用した波が重複波となり、風によって飛沫が発生することはないが、新フレア型護岸では沖向きに返される水塊は薄い膜を形成し、風によって薄い膜は細粒化されて容易に岸側へ輸送されるためである。

図-11は護岸を砕波帯内に設置した場合の飛沫輸送量を示しており、沖浜帯での結果とは逆に、直立護岸に比べて新フレア型護岸の飛沫量は少ない。直立護岸では、砕波後の波が護岸作用時に上方高く打ち上げられ、打ち上げられた水塊は風によって岸側へ輸送される。一方、新フレア型護岸では、沖浜帯で見られた薄い膜が形成されず、水塊は沖側斜め上方に打ちあがるため、岸側への飛沫輸送量は大幅

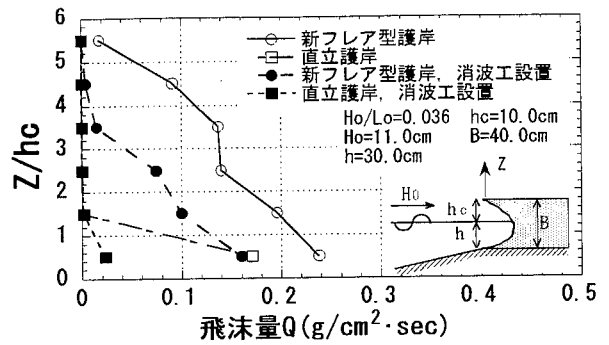


図-10 飛沫輸送量（沖浜帯）

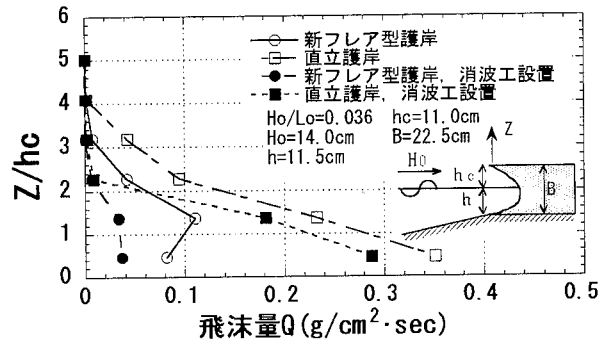


図-11 飛沫輸送量（砕波帯内）

に低減されていると考えられる。直立護岸では越波も生じており、砕波帯内においては、新フレア型護岸では越波量・飛沫量ともに大きく低減されるため、防災上特に有利であるといえる。

4. 数値解析

(1) 数値解析の概説

自由表面を持つ現象の解析に有効な数値計算手法の一つである SOLA-VOF 法を用い、新フレア型護岸近傍の流体運動を確認し、水理模型実験の再現として新フレア型護岸の限界天端高さを求めることを目的として数値解析を行った。

SOLA-VOF法では、非圧縮粘性流体を対象とした2次元波動場を考え、以下に示す連続の式(1)とNavier-Stokes運動方程式(2)(3)を基礎方程式として用いる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial (uv)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial (uv)}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

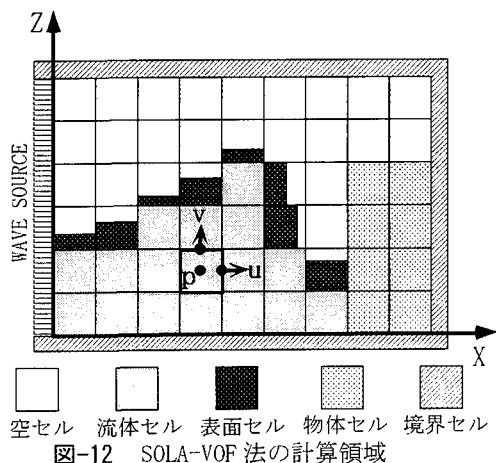


図-12 SOLA-VOF 法の計算領域

ここで、 x 、 y ：水平・鉛直座標、 u 、 v ：流速の水平・鉛直成分、 p ：圧力、 ρ ：流体密度、 ν ：動粘性係数、 g ：重力加速度、 t ：時間を表す。

本論では、図-12のように領域を格子状に区切り、その計算格子（セル）の中央に p 、格子上に流速 u 、 v を置く staggered grid を用いて、上述の基礎方程式を差分近似して数値計算を行った。

(2) 数値解析結果

計算の初期条件を図-13に示す。計算は、勾配1/20のスロープ上に新フレア型護岸を設置して行った。造波境界から種々の波を入射させ、護岸の設置水深を変化させて越波が生じないための最小の天端高さ h_c （限界天端高さ）を求めた。

SOLA-VOF 法の数値計算におけるセルは、1.0cm (x 方向) $\times$ 0.5cm (z 方向) とした。また、差分には2次の風上差分を用い、造波境界は波浪条件に応じてストークス波第5次近似解とクノイド波第3次近似解を適用した⁹⁾。入射波の条件は、波形勾配 $H_0/L_0=0.036$ のもとで波高を $H_0=3.0\text{cm}\sim 10.0\text{cm}$ として行い、3波目以降において護岸上に水塊が存在する場合を越波ありと定義した。

図-14は、越波が生じる条件（設置水深 $h=10.0\text{cm}$ 、入射波高 $H_0=7.0\text{cm}$ ）で、護岸近傍の水面形および速度ベクトルの時間的結果を示したものである。図中の t は造波開始からの経過時間を示す。時間経過とともに護岸前面の水位は上昇し、最大水位が生じる $t=8.2\text{s}$ あたりで越波が生じており、水理模型実験で観察された様子とほぼ同じ様子がよく再現できている。

図-15は、数値解析によって求められた限界天端高さを、水理模型実験によって求められた限界天端高さと比較した結果である。横軸は相対波高、縦軸は限界天端高さ h_c をあらわしている。グラフより、両者はほぼ一致しており、数値解析によっても高い精度で限界天端高さを求めることが可能であるといえる。

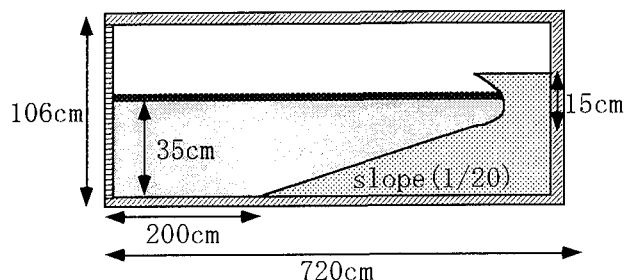


図-13 計算の初期条件

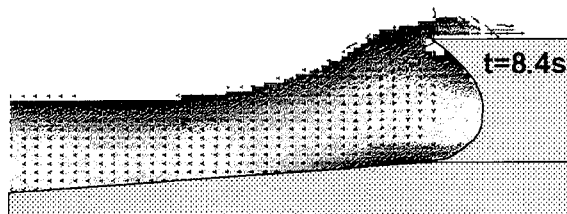
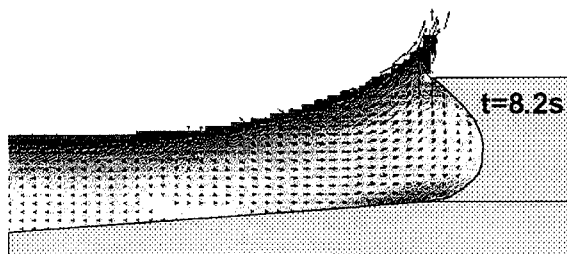
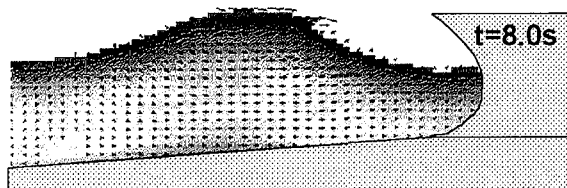
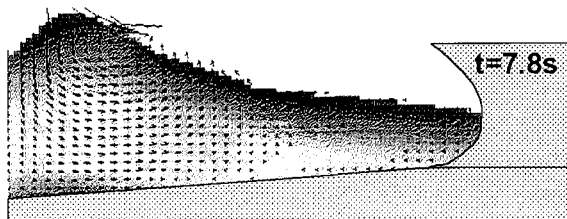


図-14 数値計算による護岸近傍の様子

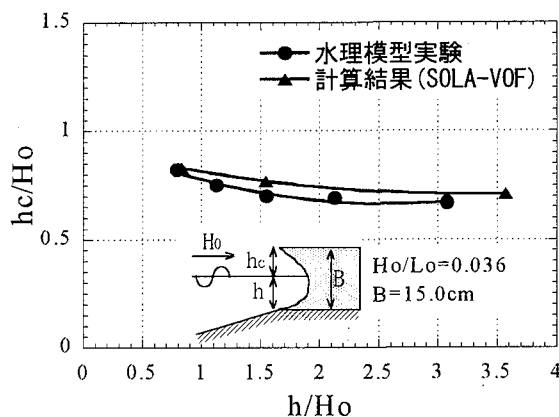


図-15 模型実験との比較（限界天端高さ実験）

4. 結論

本研究では、フレア型護岸の最終断面の基礎的特性を検討した。主要な結論を以下に記す。

(1) 新フレア型護岸は、直立護岸に比べて格段に越波阻止機能が高く、また、護岸下部にフーチングを設けた場合でも、設けない場合に比べて越波阻止機能に相違はない。不規則波の最大波高に対する限界天端高さは、規則波とほぼ同等の結果を与える。

(2) 新フレア型護岸に作用する波圧は、直前に設置する消波工の天端高さを静水面からある程度出すことで低減可能となる。フーチングを設けた新フレア型護岸は、フーチングを設けないフレア型護岸に比べて鉛直上向き波力を低減できる。

(3) 新フレア型護岸の反射率は、波高の増大に伴い減少する。

(4) フレア型護岸背後への飛沫輸送量は、砕波帯内においては直立護岸よりも少ない。

(5) SOLA-VOF 法を用いた数値解析により、護岸近傍の波動場の様子が確認され、解析により求められた限界天端高さは水理模型実験による結果とほぼ一致した。

参考文献

- 1) 井上雅夫(1974)：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.
- 2) 河野二夫ら(1992)：横スリット型曲面護岸の越波に関する基礎的研究、海岸工学論文集、第39巻、pp.576-580.
- 3) 河野二夫ら(1993)：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.
- 4) 高山知司ら(1988)：広天端幅潜堤の越波低減効果に関する不規則波実験、第35回海岸工学講演会論文集、pp.587-591.
- 5) 山本正昭ら(1984)：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.
- 6) 村上啓介ら(1996)：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.
- 7) Keisuke Murakami etc.(1996): Experiments on a non-wave overtopping type seawall, ICCE, Vol.25, pp.1840-1850
- 8) 合田良實：港湾構造物の耐波設計、鹿島出版会
- 9) 磯部雅彦ら(1978)：保存波の摂動解の波高による表示、第33回年講概要集、II、pp.760-761.

(1999. 4. 19 受付)