

非越波型護岸の防災特性に関する研究

上久保祐志* ・村上啓介**・入江 功***
神田 一紀****・鮎川慶一郎*****

1. はじめに

沿岸域での様々なウォーターフロント開発に伴い、海岸におけるアメニティ向上の要請から、護岸天端を低くして景観を妨げないこと、および、護岸上を散策・魚釣りといったレクリエーションのために親水空間として開放することが社会的ニーズとして高まりつつある。このようなニーズに応えるべく、著者らは、根本的に越波量をゼロとし、護岸上を安全に開放できる非越波型防波護岸の一つとして円弧状の護岸断面を有したフレア型護岸を提案した(村上ら, 1997)。これまでの研究より、断面形状を改良することで、フレア型護岸は、越波を阻止する機能が極めて高く、施工に十分な安定性も有することが明らかにされた。しかし、この断面形状が最適であることを確認するために、数種類の形状と比較してその断面の最適性を検討する必要がある。特に、前傾した形状であるために鉛直上向き波力の増大が問題であり、この鉛直上向き波力を十分抑えることができる形状が望ましい。

フレア型護岸は、作用する波圧波形が衝撃砕波圧の様相を示す場合が多く、前面に設置する消波工の設置は必至であると考えられる。しかし、消波工の天端を護岸と同程度にした場合には消波工上を波が遡上して越波を誘発するため、前面の消波工の天端高さはなるべく低いほうが望ましい。一方、消波工の天端高さを水面と同程度にすると、護岸に作用する波圧を低減させる効果が小さくなる問題もあるため(佐伯ら, 1980)、越波の阻止と波圧の低減との両立が可能な消波工の諸元を求めることが要求される。ここでの消波工の諸元としては、消波工の天端幅、天端高さなどがパラメータとしてあげられる。同時に、護岸に波が作用した際に発生する衝撃音は、現地に施工した際には騒音として護岸背後に悪影響を及ぼすことも考えられ、消波工を設置することにより変化する音環境特性を確認する必要がある。

本研究では、水理模型実験を行い、現地施工に際して

防災機能上重要な要素である越波阻止機能および鉛直上向き波力の低減、衝撃砕波圧の抑制、音環境特性に関して検討するとともに数値計算(SOLA-VOF法)によって護岸近傍波動場の様子を確認することを目的としている。

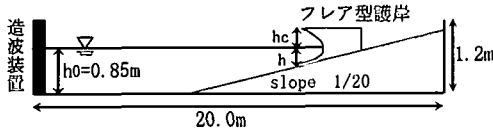
2. 水槽実験の方法と入射波条件

2.1 フレア型護岸の限界天端高さを求める実験

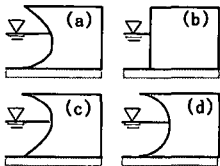
実験は、図一1に示す2次元造波水槽(長さ20.0m、高さ1.2m、奥行き0.6m、沖水深 $h_0=0.85$ m)内に1/20の不透過傾斜海浜を設置し、図一2に示す各護岸断面(護岸高さ $B=22.5$ cm)について、規則波を作用させて行った。ここで、(a)はフレア型護岸、(b)は直立護岸であり、(c)はフレア型護岸の断面の曲率を上下逆にした断面、(d)は半円形の断面をそれぞれ有する護岸である。実験では沖波波形勾配 $H_0/L_0=0.036$ のもとで入射波の波高を $H_0=6.0$ cm~ 14.0 cmの範囲で変化させ、設置水深 h を種々変えた場合に越波が生じない最小の天端高さ h_c (限界天端高さ)を求めた。護岸前面に消波工を設置せず、フレア型護岸の相対奥行き深さ D/B は、施工可能な範囲と考えられる値として本研究では $D/B=0.5$ を選んだ。なお、越波の有無は目視にて確認した。

2.2 フレア型護岸の波圧特性を求める実験

図一1に示す実験水槽に、護岸の設置水深を $h=15.0$ cm、護岸天端高さを $h_c=7.5$ cmとして波圧を測定した。前面には消波工を設置せず、フレア型護岸(a)と直立護



図一1 実験水槽



図二 本研究で用いた護岸断面

* 正 会 員 工 博 八代工業高等専門学校助手 土木建築工学科
** 正 会 員 工 博 宮崎大学工学部助教授 土木環境工学科
*** 正 会 員 工 博 九州大学大学院教授 工学研究院
**** 正 会 員 工 修 中国電力(株)
***** 学生会員 九州大学工学部地球環境工学科

岸 (b), 護岸 (c) および護岸 (d) について実験を行った。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 8 mm) を等間隔に埋め込み、出力信号をサンプリング周波数 1 kHz 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。

2.3 消波工の最適諸元を求める実験

実験は、図-1 に示す実験水槽にフレア型護岸 (a) 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 $h_c=7.5\text{ cm}$ とした。護岸前面には、塩ビパイプ (外径 22 mm) を格子状に組み合わせて作成した消波工 (空隙率 $\varepsilon=43.1\%$) を設置して実験を行った。消波工の形状としては、図-3 に示すように、天端高さと天端幅が異なる 6 種類の消波工を用いた。消波工 (A) (B) (C) は、天端幅が 41.8 cm で、それぞれの消波工高さが (A) は護岸天端高さと同様 23.5 cm 、(C) は静水面と等しい 15.0 cm 、(B) は (A) と (C) のちょうど中間に設定した。消波工 (D) (E) (F) は、それぞれ消波工 (A) (B) (C) の天端幅をほぼ半分 (19.8 cm) にしたものである。越波阻止機能を検討する実験として、固定された水深 ($h=15.0\text{ cm}$) に対して入射波高を変化させ、越波が生じない最大の波高を求めて行った。また、作用波圧を求める実験では、入射波条件は波形勾配 $H_0/L_0=0.036$ のもとで波高を $H_0=4.0\text{ cm}\sim 10.0\text{ cm}$ 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 8 mm) を等間隔に埋め込み、2.2 の実験と同じ手順に沿って護岸に作用する波圧値を測定した。

2.4 フレア型護岸の音環境特性を求める実験

フレア型護岸に波が作用した際に発生する音を実験室レベルで測定し、音環境特性を検討する。実験は、図-1 に示す実験水槽内にフレア型護岸および、直立護岸 ($B=22.5\text{ cm}$) を設置して行った。また、前面に図-3 (E) に示す消波工 (空隙率 43.1%) を設置した場合についても実験を行った。設置水深は $h=9\text{ cm}$ 、沖水深は $h_0=79\text{ cm}$ 、入射波は、波形勾配 $H_0/L_0=0.036$ のもと、 $H_0=6.0\text{ cm}\sim 12.0\text{ cm}$ の規則波を用いた。測定は、リオン (株) 製の精密騒音計 (NA-27) を A 特性として接続し、 $1/3$ オクターブ分析機能を用いて、 0.02 秒間隔の瞬時値を連続 1000 画面 (20 秒間) 計測した。騒音計は、護岸天端先端より高さ 50 cm 、岸方向に 35 cm の位置に設置した。

3. 実験の結果と検討

3.1 フレア型護岸の限界天端高さを求める実験

図-4 は、規則波を作用させた場合の、相対水深 h/H_0 に対する限界天端高さ h_c/H_0 の変化を示したものであ

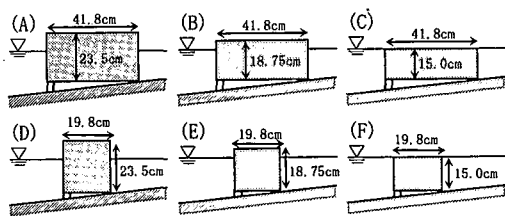


図-3 実験で用いた消波工

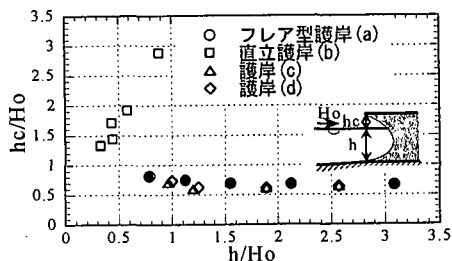


図-4 限界天端高さの相違

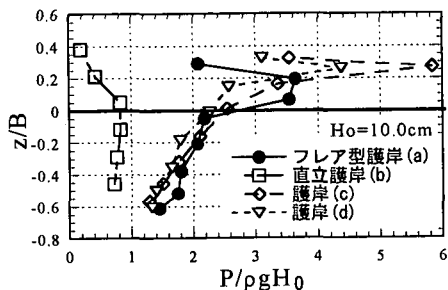


図-5 作用波圧分布

る。図中の○はフレア型護岸 (a) の結果を示しており、□は直立護岸 (b)、△は護岸 (c)、◇は護岸 (d) の限界天端高さをそれぞれ示している。図より、フレ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。一方、フレア型護岸 (a) と護岸 (c) および護岸 (d) を比較すると、フレア型護岸よりも護岸 (c) および護岸 (d) の方が限界天端高さは多少小さくなっているが、ほとんど変わらないといえる。これは、限界天端高さが静水面より上の容積の違い影響されたためであると考えられ、静水面より上の容積が弱冠大きい護岸 (c) および護岸 (d) の方が、フレア型護岸 (a) よりも限界天端高さが少し小さくなり、越波阻止機能が微小ながらも優れているものと考えられる。

3.2 フレア型護岸の波圧特性を求める実験

図-5 は、消波工を設置しない場合の護岸に作用する波圧分布を波高 $H_0=10.0\text{ cm}$ について示したものである。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 (水面がゼロ) をあら

わしている。グラフより、いずれの護岸の波圧も、直立護岸に比べて大きな波圧が作用しており、衝撃砕波圧が発生していた。この結果からも、消波工の設置は必要であることがわかる。(a) (c) (d) 3種類の護岸を比較すると、フレア型護岸(a)に比べて、他の二つの護岸では波圧値が最大となる静水面付近の波圧が大きい値を示しており、鉛直上向き波力が増大することが予想される。そこで、この3種類の護岸(a) (c) (d)について、求めた波圧分布から鉛直波力 F_z を求めた。その結果を図-6に示す。このグラフより、鉛直波力に関してはフレア型護岸(a)が他の二つの護岸に比べて小さい値を示している。鉛直上向き波力を最も低減できる形状としては、越波阻止機能は他の二つの護岸よりもわずかに劣るが、フレア型護岸(a)が最適であると考えられる。

3.3 消波工の最適諸元を求める実験

作用波圧を測定した実験結果を $H_0=8.0$ cmについて図-7に示す。それぞれのプロットは消波工の形状の違い(図-3参照)を示したものである。図より、消波工(C) (F)では大きな波圧が護岸に作用しているが、他の(A) (B) (D) (E)の消波工ではそれほど大きな波圧は作用していない。このように、消波工の天端を静水面と一致させてしまうと、消波工でのエネルギーロスが少なく、また砕波を誘発させてしまうために、大きな波圧が作用してしまうものと考えられる。

次に、消波工の天端高さおよび天端幅を変化させた場合の、フレア型護岸に越波が生じない最大波高を表-1にまとめている。この最大波高が高いほど、越波が生じにくいことを示す。消波工天端を静水面と等しくした(C) (F)では、他の消波工よりも越波が生じにくい、護岸天端とほぼ等しくさせた(A) (D)では越波が生じやすくなっている。これは、消波工に作用した波が消波工上を遡上してしまうためである。また、消波工天端幅が広い(A) (B) (C)の方が、天端幅が狭い(D) (E) (F)に比べて越波が生じにくい。

以上より、それぞれの消波工の欠点を表-1にまとめた。越波阻止と作用波圧の低減との両立を考えると、まず越波が生じやすくなる点で消波工(A)と(D)は不適当である。また、作用波圧の低減に関しては消波工(C)と(F)が不適当となる。残った(B) (E)を比較すると、どちらも同程度の越波阻止と作用波圧低減が可能である。以上のように、消波工にある程度天端幅を持たせ、天端高さを護岸天端と静水面の中間程度に取れば、越波阻止機能を損わず、施工可能な範囲まで波圧の低減が可能となる。

3.4 フレア型護岸の音環境特性を求める実験

音の発生状況は、波面形状の位相によって異なっている。図-8は各位相(PHASE)において発生した音の騒

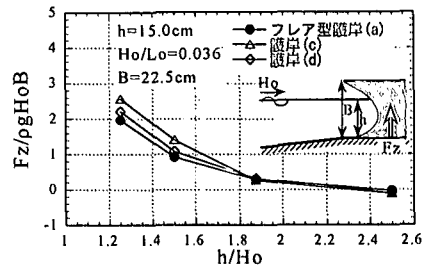


図-6 鉛直波力

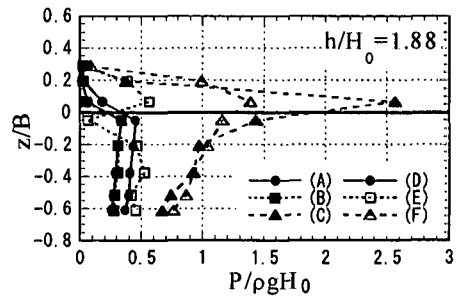


図-7 消波工を設置した場合の波圧分布

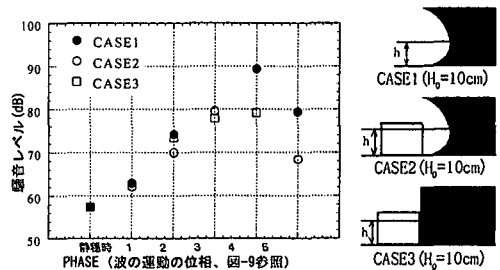


図-8 騒音レベル

PHASE	波の位相	波の位相の説明
PHASE 1		引き波時
PHASE 2		護岸前面で砕波した時
PHASE 3		消波工に波が作用して砕波した時
PHASE 4		護岸に波が衝突した時
PHASE 5		打ち上がった波が水面に落下した時

図-9 音が発生する位相

表-1 各消波工の越波阻止機能及び欠点

消波工	非越波最大波高	欠点
(A)	$H_0=11.0$ cm	消波工上が波が遡上して越波
(B)	$H_0=11.5$ cm	少量の飛沫が消波工に波が作用した際に発生し護岸上へ落下
(C)	$H_0=12.0$ cm	護岸の静水面付近に衝撃砕波圧が発生
(D)	$H_0=9.5$ cm	消波工上が波が遡上して越波
(E)	$H_0=11.0$ cm	少量の飛沫が消波工に波が作用した際に発生し護岸上へ落下
(F)	$H_0=11.0$ cm	護岸の静水面付近に衝撃砕波圧が発生

音レベルを示しており、横軸の PHASE は、図-9 に示す波面の形状を表している。つまり、護岸に波を作用させる際に、騒音レベルがピークを示す特徴的な現象を、PHASE 1 (引波時)、PHASE 2 (砕波時)、PHASE 3 (消波工作用時)、PHASE 4 (護岸作用時)、PHASE 5 (落水時) として示したものである。CASE 1 はフレア型護岸、CASE 2 は消波工を設置したフレア型護岸、CASE 3 は直立消波護岸を示している。図-8 より、護岸に波が衝突する PHASE 4 で最大の騒音レベルを示した。また、CASE 1 では、CASE 3 に比べ騒音レベルが大きくなるが、CASE 2 のように消波工を設置することで緩和することが可能であり、CASE 3 と同程度となる。これは、消波工を設置することで護岸に作用する際の波の形が崩れ、また、作用する水塊の速度や量を減少させることができるためであると考えられる。図-10 は、CASE 1 における音圧スペクトルを示している。図より、フレア型護岸に波が作用したときに発生する音は、100~250 kHz で特有のピークを示す傾向があり、衝撃砕波圧の発生と関連性が考えられる。しかし、護岸前面に消波工を設置することにより、このピークはなくなることが確認された(上久保ら, 2000)。したがって、フレア型護岸前面に消波工を設置すれば、直立消波護岸と比較しても、音環境的に問題はないと考えられる。

4. SOLA-VOF 法を用いた数値計算

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、フレア型護岸近傍の流体運動を確認する。また、水理模型実験の実験結果と比較し、数値計算の妥当性を確認する。ついで、水理模型実験では確認できなかった波圧分布の詳細を、数値計算によって確認する。

4.1 数値計算の基礎式

SOLA-VOF 法で用いる基礎方程式は、非圧縮粘性流体を対象とした連続の式 (1) と運動方程式である Navier-Stokes 方程式 (2) (3) である。また、流体の移動を決定するための VOF 関数 F を用いた方程式として、式 (4) が用いられる。

$$\frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z \nu)}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial u}{\partial x} + \gamma_z \nu \frac{\partial u}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2(\gamma_x u)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\gamma_z u)}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \nu}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial \nu}{\partial x} + \gamma_z \nu \frac{\partial \nu}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2(\gamma_x \nu)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\gamma_z \nu)}{\partial z^2} \right) - g \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

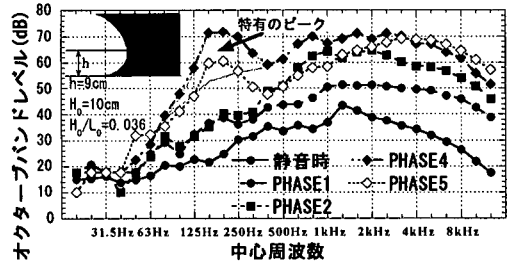


図-10 CASE 1 の音圧スペクトル

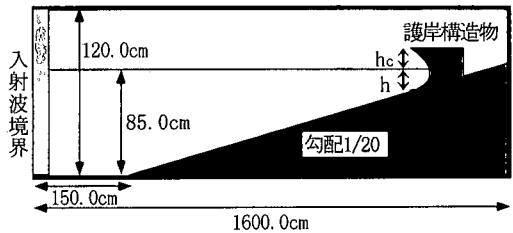


図-11 計算の初期条件

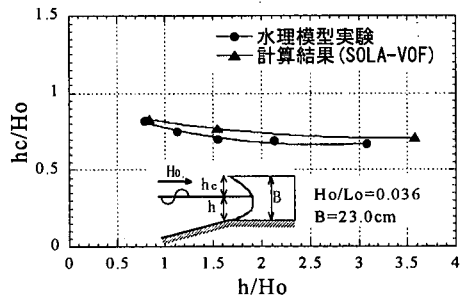


図-12 実験結果と計算結果との比較 (限界天端高さ)

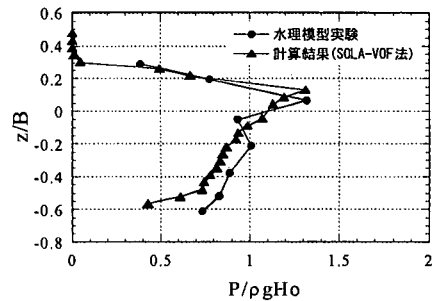


図-13 実験結果と計算結果との比較 (作用波圧分布)

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(uF)}{\partial x} + \frac{\partial(\nu F)}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 x, z : 水平、鉛直座標、 u, ν : x, z 方向の流速成分、 t : 時間、 p : 圧力、 g : 重力加速度、 ρ : 流体密度、 ν : 動粘性係数、 F : 流体の体積率をそれぞれ表している。また、式中の $\gamma_x \gamma_z$ は、榊山ら (1990) が提案している surface permeability である。

SOLA-VOF 法では、計算領域を格子状に区切り、その

計算格子 (CELL) の中央に圧力、格子上に流速、を置く staggered mesh を用いて、前述の基礎方程式を差分近似して数値計算を行う。式 (2) (3) で求めた流速が式 (1) を満たすように圧力と流速を調整しながら繰り返し計算を行って流速値を求める。その流速値から式 (4) によって VOF 関数 F を輸送させ、自由表面形状を決定する。以上述べた計算の流れを各時間ステップで繰り返すことにより時間発展計算が可能となる。

本研究では、初期条件として図-11 に示す領域を設定し、セルは、 1.0 cm (x 方向) $\times 1.0\text{ cm}$ (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 (磯部ら, 1978) を適用した。

4.2 数値計算結果の考察

図-12 は、越波阻止機能に関して計算結果と水理模型実験の結果を比較したものであり、相対設置水深 h/H_0 に対する限界天端高さ h_c/H_0 を示したものである。図-2 に示すフレア型護岸 (a) の限界天端高さに関して、図中の●は水理模型実験の結果を、▲は計算結果を示している。図より、両者は良い精度で一致しており、SOLA-VOF 法を用いた数値計算でも十分に限界天端高さを求めることができるといえる。

図-13 は、波圧特性に関しての計算結果と水理模型実験の結果を、図-2 に示すフレア型護岸 (a) について比較したものである。計算によって求められた波圧波形の多くの最大値は若干のばらつきが見られたため、波圧波形が定常となった数波の各最大波圧値の平均値を作用波圧値とした。図中の●は水理模型実験の結果を、▲は数値計算の結果をそれぞれ示している。図より、両者は良い精度で一致している。また、静水面付近から、上部と下部にいくほどに波圧は減衰している様子がわかる。以上より、SOLA-VOF 法を用いることにより水理模型実験と同等の精度で波圧分布を求めることができる。

図-14 は、図-2 に示す 3 種類の護岸 (a) (c) (d) に波が作用した瞬間の波動場の様子を示している。図より、波の打ち上げ高さに違いが見られるが、打ち上げ高さの違いは越波の生じやすさに関係しており、水理模型実験での結果に示したように、フレア型護岸 (a) が護岸 (c) および護岸 (d) に比べて越波が生じやすいことがこの計算結果からも推測できる。それぞれの図の横には、護岸に作用している波圧の最大値 $P_{\max}/\rho g H_0$ を記しているが、最も大きい波圧値を示したものは護岸 (c) であった。これは、護岸の形状に大きく関係しており、護岸 (c) のように静水面付近の断面曲率が小さい場合には、波圧を大きく受けると考えられる。この数値計算の結果からも、フレア型護岸 (a) は波圧の低減に関して、護岸 (c) および護岸 (d) に比べて優れていると考えられる。

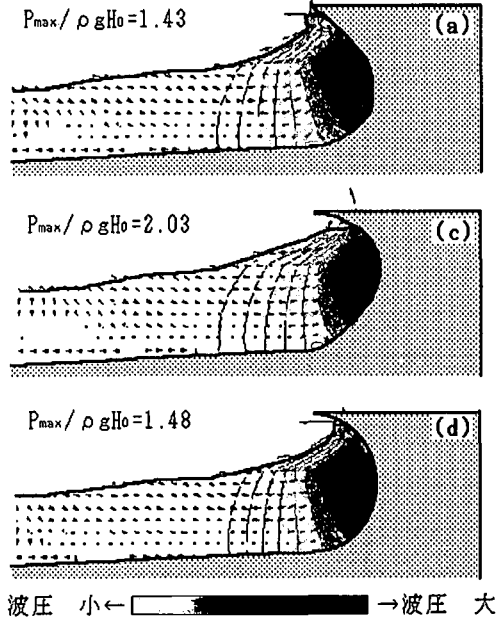


図-14 計算による護岸近傍波動場の様子

6. おわりに

本研究による主要な結論を以下に示す。

- (1) フレア型護岸断面を含む種々の護岸断面について、限界天端高さ、作用波圧分布、鉛直波力を調べた結果、何れについてもフレア護岸は優れた特性を示し、数値計算によって同様の結果が詳細に得られた。
- (2) 消波工の天端高さを護岸本体の天端と静水面の中間に選んだとき、衝撃砕波を防ぎ、かつ非越波の条件を十分に満足した。
- (3) 波がフレア型護岸に作用する際に発生する音の騒音レベルは、消波工を設置することで、直立消波護岸に比べても大きな値は示さない。フレア型護岸に波が作用したときに発生する音は、独特の周波数でピークを示し、衝撃砕波圧の発生と関連性があると考えられる。

参考文献

- 磯部雅彦・西村仁嗣・堀川清司 (1978): 保存波の振動解の波高による表示, 第 33 回年報概要集, II, pp. 760-761.
- 上久保祐志・入江 功・村上啓介・神田一紀・結川慶一朗・片岡保人 (2000): フレア型護岸の飛沫の発生および輸送特性と音環境について, 海洋開発論文集, 第 16 巻 (印刷中).
- 佐伯 浩・菊地秀明・京谷 修・松井弘夫・尾崎 晃 (1980): 分離式防波堤の水理機能と設計波圧について, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 335-338.
- 神山 勉・阿部宣行・鹿島遼一 (1990): ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 554-558.
- 村上啓介・入江 功・上久保祐志 (1997): 非越波型防波護岸の護岸天端高さとして作用波圧について, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 776-780.