

# 非越波型護岸の高波浪域への適用における 消波工形式の基礎的検討

EXPERIMENTAL STUDY ON WAVE DISSIPATING STRUCTURE  
FOR FLARE SHAPED SEAWALL IN ROUGH SEAS

片岡保人<sup>1</sup>・市川靖生<sup>2</sup>・大谷修<sup>3</sup>・上久保祐志<sup>4</sup>・村上啓介<sup>5</sup>・入江功<sup>6</sup>

Yasuto KATAOKA, Yasuo ICHIKAWA, Osamu OTANI, Yuji KAMIKUBO,  
Keisuke MURAKAMI and Isao IRIE

<sup>1</sup> 工修 (株)神戸製鋼所技術開発本部機械研究所 (〒651-2271 神戸市西区高塚台1-5-5)

<sup>2</sup> 正会員 工修 (株)神戸製鋼所都市環境事業部構造技術部 (〒657-0845 神戸市灘区岩屋中町4-2-15)

<sup>3</sup> 正会員 (株)神戸製鋼所技術開発本部機械研究所

<sup>4</sup> 学生会員 工修 九州大学工学部建設都市工学科 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

<sup>5</sup> 正会員 工博 宮崎大学工学部助教授 土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

<sup>6</sup> 正会員 工博 九州大学工学部教授 建設都市工学科

A Flare Shaped Seawall (FSS), the shape of which is an overhanging circular arc, can drastically reduce the crest elevation and wave overtopping amount in comparison with a conventional vertical one. However, it is thought that impulsive wave pressures are more likely to act on the surface of the FSS in rough seas. In this paper, a wave dissipating structure which reduces wave pressures and maintains the ability to prevent wave overtopping is investigated experimentally using a water channel. It is found that a combination of slit type columns in the FSS and wave dissipating blocks, located a little away from the FSS and the height of which coincides with the water surface, is suitable.

**Key Words:** Wave dissipating structure, impulsive wave pressure, wave overtopping, low crested seawall

## 1. はじめに

空港や発電プラントなどの重要構造物を外洋に面した沿岸域に建設する際には、越波量を極力低減する必要がある。従来の直立型護岸で、越波量を低減しようとすると、護岸の天端高さが高くなり、それにもともない断面が巨大化する恐れがある。そこで、非越波と低天端の相反する課題を解決する護岸として、護岸前面が沖側に張り出した円弧形状のフレア型護岸が提案され、限界天端高さ（越波量がゼロとなるために必要な最小の護岸天端高さ）が従来の直立消波護岸に比べて極めて低く、沖波波高以下となることが明らかにされている<sup>1),2)</sup>。一方、本護岸を、設計最大波高が10mを超えるような高波浪域に適用する場合、断面形状が凹形状であることから

護岸前面での衝撃的な波圧の増大が考えられ、実構造物設計のためにはこの衝撃波圧の低減が課題となる。

そこで、本研究では、フレア型護岸を高波浪、急海底勾配域に適用する際に、本護岸の特長である越波阻止性能を確保しつつ、護岸前面に作用する波圧を低減できる消波工形式を明らかにすることを目的としている。

## 2. 実験装置と試験条件

### (1) 基本的な試験条件

実験は、図-1に示すように、2次元造波水槽（長さ30m、高さ1.2m、幅0.6m）中に急海底勾

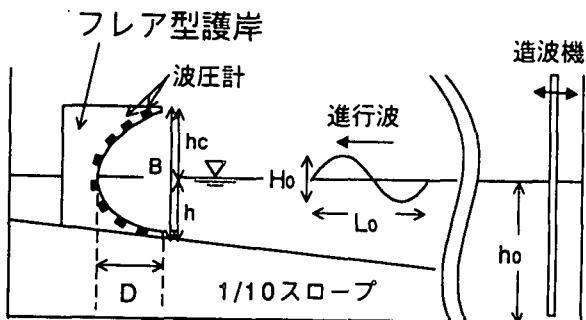


図-1 実験状況の概要

配を模擬した勾配 1/10 の斜面を設置し、斜面上に護岸モデルおよび消波工モデルを置き、沖側水平床部の水深を  $h_0=85\text{cm}$  として行った。フレア型護岸モデルは、図-1 に示すようなフーチング（下部の迫り出し）を設けた形状で<sup>3)</sup>、護岸高さ  $B=22.5\text{cm}$ 、護岸奥行き深さ  $D$  と高さ  $B$  の比は  $D/B=0.5$  で、護岸設置水深  $h=11\text{cm}$ 、天端高さ  $hc=11.5\text{cm}$  とした。入射波は、高波浪域を再現するために沖波波高  $Ho=7\sim 15\text{cm}$ 、沖波波形勾配  $Ho/Lo=0.036$  ( $Lo$  は沖波波長) の規則波とした。

護岸の越波阻止性能を表す非越波限界波高  $Homax$ （越波が生じない最大沖波波高）は、入射させる規則波の沖波波高  $Ho$  を種々変えて越波の有無を逐次観察しながら求めた。越波有りとは、護岸法線前縁より背後側に少しでも水が浸入した場合とし、越波の有無は、ビデオに録画した映像と目視により判断した。

また、入射波高  $Ho$  を種々変えて、護岸前面に作用する波圧を測定した。波圧測定には、受圧面直径が 8mm の小型圧力計を用い、8 個（モデルによっては 7 個）の圧力計を図-1 に示すように、護岸前面の中心線上に沿ってほぼ等間隔になるように埋め込み、出力信号をサンプリング周波数 1kHz でデジタル収録した。造波開始後 60 秒経過し、入射波と反射波が十分に重なり合い、波圧波形がほぼ定常となってから 60 秒間波圧を測定し、各波形の最大波圧値の平均値を作用波圧値とした。

## (2) 試験手順

越波阻止性能および作用波圧測定試験は、つきの順序で実施した。

### a) 護岸単体の場合

最初に、図-2 に示すように、消波工を設置しないフレア型護岸単体での越波阻止性能すなわち非越波限界波高、および護岸前面への作用波圧を測定

した。

### b) スリット柱のみを設けた場合

消波構造として、図-3 に示すような、護岸のふところにスリット状の柱を設けた場合の越波阻止性能、波圧低減効果を調べた。スリット状の柱は外径 22mm の塩化ビニル製円断面パイプで構成し、柱間の隙間は 8.4mm（柱の直径部分における開口率 28%）とした。

### c) パイプ消波工のみを設けた場合

最も一般的な消波工であるテトラポッドを意識し、越波を誘発しない、フレア型護岸に適したテトラポッドの積層高さ、幅、護岸との間隔を検討するために、パイプ消波工を用いた越波阻止性能試験を行った。ここで、パイプ消波工としては、図-4 に示すような直径 22mm の塩化ビニル製パイプを各方向に等しい間隔で格子状に組み合わせた構造とし、表-1 に示すように、その高さ  $hp$ 、幅  $lp$ 、護岸前縁との間隔  $b$  を種々変化させた。パイプ消波工の空隙率は 43% とした。そして、越波阻止性能試験から最も効率の良いパイプ消波工寸法と位置を選択し、波圧測定試験を行った。

### d) スリット柱とパイプ消波工の両方を設けた場合

護岸のふところにスリット状の柱を設け、かつ護岸沖側前面にパイプ消波工を設置した場合の越波阻止性能、作用波圧を測定した。さらに、現実的な適用を考慮し、パイプ消波工をテトラポッド模型（高さ 6.6cm）を積層したものに置き換えた場合の試験も実施した。

## 3. 実験結果と考察

### (1) 護岸単体の場合

水槽実験の結果、消波工を設置しないフレア型護岸単体での非越波限界波高は  $Homax=14\text{cm}$  であった。これより、本実験条件におけるフレア型護岸の限界天端高さ（ $hc=11.5\text{cm}$ ）は最大沖波波高  $Homax$  の約 80% となる。これに対して、合田による越波流量推定図<sup>4)</sup>から直立消波護岸の天端高さを推定すると、最大沖波波高を大幅に越える高さになると考えられ、このことからもフレア型護岸の越波阻止性能が非常に優れていることがわかる。

一方、図-2 に護岸単体の場合の作用波圧の分布を示す。図の縦軸は、静水面を原点とし鉛直上向きを正にとった座標で波圧計測位置を表しており、護岸高さ  $B$  で無次元化している。横軸は、護岸面

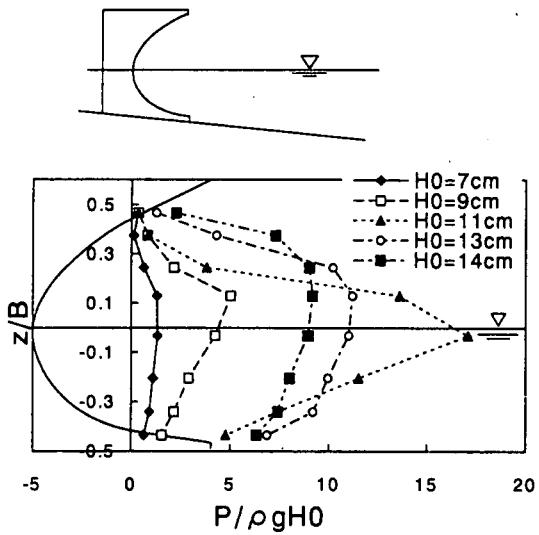


図-2 護岸単体の波圧分布

表-1 各種パイプ消波工寸法、位置における  
非越波限界波高 Homax (単位 cm)

hp	lp	b				
		0	10	20	30	40
23.5	40.8	Homax =12	12	13	14	15
	19.0	10	—	11	12	13
17.4	40.8	12	13	14	15	15
	19.0	10	10	12	11	12
11.3	40.8	14	15	13	14	—
	19.0	11	13	14	12	—

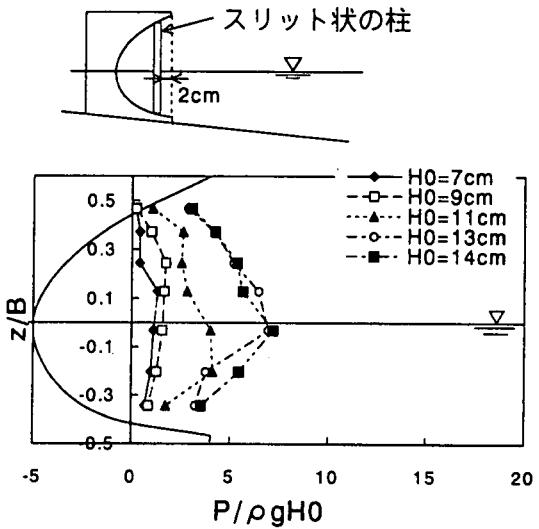


図-3 スリット柱を設けた場合の波圧分布

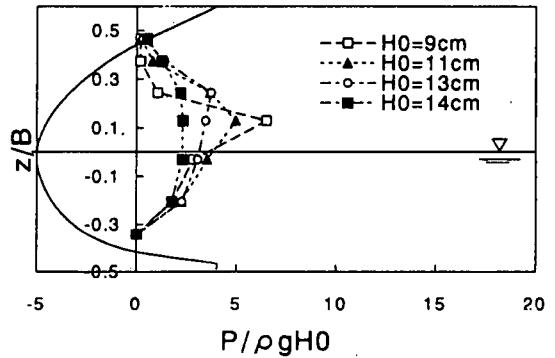
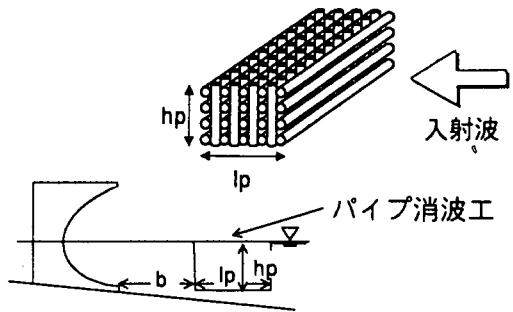


図-4 パイプ消波工を設けた場合の波圧分布

に対して法線方向の波圧を沖波波高相当の静水圧で無次元化している。また図中には、護岸形状もあわせて示している。波圧の分布形状は入射波高によって異なるが、最大波圧値は静水面近傍から護岸高さ B の 10~20% の間に生じており、護岸単体の場合、最大で沖波波高相当静水圧の 10 倍以上の非常に大きな波圧が作用している。波圧値は、最初沖波波高が大きくなるにしたがって大きくなり、 $H_0=11\text{cm}$  のときに最大値を示し、その後、さらに沖波波高が大きくなるにもかかわらず減少している。これは、水槽実験におけるビデオ観察結果より、直立護岸の衝撃碎波圧発生時と同様の現象が<sup>5,6)</sup>、フレア型護岸の場合にも生じているためと考えられる。すなわち、沖波波高が  $H_0=11\text{cm}$  の場合、護

岸前面において、変形した波の形状が護岸前面形状とほぼ一致し、波面が空気をほとんど巻き込まずに衝突するために最も波圧が大きくなり、沖波波高がさらに大きくなった場合、波は護岸前面手前で碎波し、空気を巻き込んだ状態で衝突するために、波圧が減少すると考えられる。

以下の消波工形式の検討においては、フレア型護

岸の特長である越波阻止性能, すなわち上記非越波限界波高  $H_{max}=14\text{cm}$  を確保することを第一に考え, その上で護岸前面に作用する波圧の減少を試みた.

## (2)スリット柱のみを設けた場合

従来の上床版付き直立消波ケーソンにおけるスリット壁と同様に<sup>7)</sup>, スリット柱をその沖側前端がフレア型護岸前縁と一致するように取り付けた場合, スリット柱の沖側前面で波が跳ね上がり, 沖波波高  $H_o=14\text{cm}$  未満で越波を生じた. このため, 非越波限界波高  $H_{max}=14\text{cm}$  を確保するため, スリット柱をフレア型護岸のふところ内に入れることを考えた. その結果, 図-3に示すように, スリット柱を護岸前縁より 2cm 入ったところに設置すれば  $H_{max}=14\text{cm}$  が確保できることがわかった. 図-3に, このようにスリット柱を設置した場合の護岸前面に作用する波圧分布を示す. スリット柱を設けることにより, 最大波圧値は護岸単体の場合に比較して約 1/2 になるものの, 波高相当静水圧の 7~8 倍とまだかなり大きい値を示している.

## (3)パイプ消波工のみを設けた場合

表-1に各種パイプ消波工の高さ  $h_p$ , 幅  $l_p$ , 護岸前縁との間隔  $b$  を種々変化させた場合の非越波限界波高試験結果を示す. 本試験結果より, 以下のことことが明らかとなった.

- ①消波工が護岸直前にある場合 ( $b=0$ ), 消波工高さが静水面よりも高いと越波を誘発し, 非越波限界波高は護岸単体の場合よりも小さくなる. これは, 波が消波工沖側前面に衝突して跳ね上がり, 水塊が消波工を飛び越えて護岸上まで達するからである.
- ②消波工高さとしては, 越波を誘発しない静水面高さ程度(本実験では  $h_p \approx 11\text{cm}$ )が適している.
- ③一部に例外もあるが, おおむね護岸前縁と消波工を離した方が ( $b$  を大きくした方が) 越波を誘発せず, 非越波限界波高は大きくなる.

のことより, 今回試験した範囲内で, 非越波限界波高  $H_{max}=14\text{cm}$  を確保し, かつパイプ消波工の体積をできるだけ小さくできる最適条件は, 高さ  $h_p=11.3\text{cm}$ , 幅  $l_p=19\text{cm}$ , 間隔  $b=20\text{cm}$  となる. そして, 図-4には, パイプ消波工をこの最適条件にしたときの護岸前面に作用する波圧分布を示す. この場合も, スリット柱の場合とほぼ同様に, 最大波圧値は護岸単体の場合に比較して約 1/2 になる

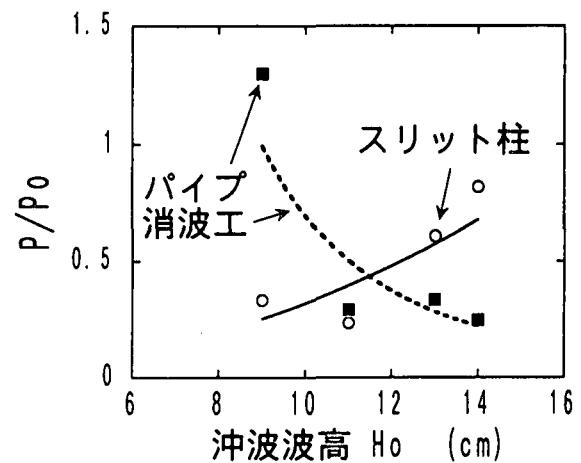


図-5 スリット柱とパイプ消波工の波圧低減効果の比較

ものの, 最大で波高相当静水圧の 7 倍程度とまだかなり大きな値を示している.

## (4)スリット柱とパイプ消波工の両方を設けた場合

図-5は, 図-2~4の結果をもとに, スリット柱とパイプ消波工の波圧低減効果をしたものである. 図-5の縦軸は, スリット柱のみの場合(図-3)およびパイプ消波工のみの場合(図-4)の各沖波波高における波圧分布の最大値  $P$  を, 護岸単体の場合(図-2)の同じ沖波波高における波圧分布の最大値  $P_o$  で除した値を示しており,  $P/P_o$  の値が小さい方が波圧低減効果が大きいことを表している. この結果より, スリット柱のみの場合, 本実験範囲内で比較的冲波波高が小さいとき( $H_o=9 \sim 11\text{cm}$ )の波圧を低減する傾向にあるのに対して, パイプ消波工のみの場合, これとは逆に冲波波高が比較的大きいとき( $H_o=11 \sim 14\text{cm}$ )の波圧を低減する傾向にあることがわかり, 両者を組み合わせることにより, 広範囲の波高に対して波圧を低減できることが予想される.

図-6は, スリット柱と上述の最適なパイプ消波工( $b=20\text{cm}$ ,  $h_p=11.3\text{cm}$ ,  $l_p=19\text{cm}$ )の両方を設けた場合の護岸前面に作用する波圧分布を示す. 両方を組み合わせたことにより, 波圧を冲波波高相当静水圧のほぼ 2 倍程度にまで低減でき, 実構造物設計も十分に可能な範囲と考えられる. また, 非越波限界波高  $H_{max}=14\text{cm}$  も確保されていた.

さらに, 現実的な適用を考え, 図-7にはパイプ消波工部分をテトラポッド模型を積層したものに置き換えた場合の護岸前面に作用する波圧分布を

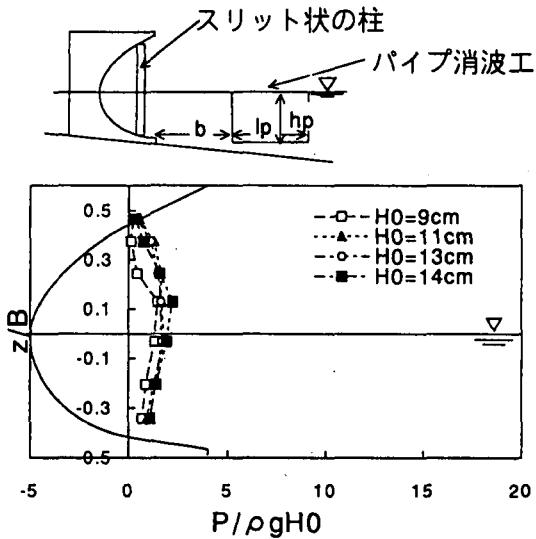


図-6 スリット柱とパイプ消波工の両方を設けた場合の波圧分布

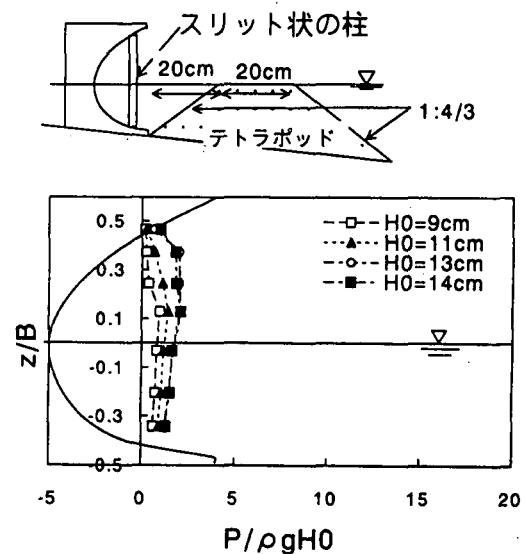


図-7 スリット柱とテトラポッドの両方を設けた場合の波圧分布

示す。パイプ消波工の試験結果より、テトラポッドは護岸前縁より20cm離して積層することとし、天端幅20cm、高さは静水面付近までとした。また、テトラポッドの安定性を確保するため、前後面両側に1:4/3の傾斜を設けている。図-7より、テトラポッド積層の場合も図-6とほぼ同等の波圧値(沖波波高相当静水圧の2倍程度)となり、非越波限界波高  $H_{omax}=14cm$  も同様に確保されていた。

#### 4. おわりに

フレア型護岸を高波浪、急海底勾配域に適用する場合、護岸のふところ内にスリット状の柱を設け、かつ護岸沖側の少し離れた位置に消波ブロック等を静水面高さまで積層するという消波工形式が適切であることが明らかになった。本消波工形式によれば、フレア型護岸の特長である越波阻止性能を確保しつつ、護岸前面に作用する波圧を、実構造物設計が可能と考えられる範囲にまで十分に低減することができる。

作用波圧の詳細把握と構造部材設計、各種消波工の消波特性の詳細検討などは今後の課題である。

#### 参考文献

- 1) 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。
- 2) 片岡保人、中岡威博、中川知和ら：越波低減型防波護岸の天端高さと作用波圧、海洋開発論文集、Vol.14、pp.405-409、1998。
- 3) 上久保祐志、入江功、村上啓介ら：護岸上の完全解放を目的としたフレア型護岸の特性について、テクノオーシャン98論文集、pp.129-132、1998。
- 4) 合田良実：港湾構造物の耐波設計、鹿島出版会、pp.122-123、1990。
- 5) 合田良実：衝撃碎波圧を受ける混成防波堤の挙動に関する考察、港湾技術研究所報告、第12巻、第3号、pp.3-29、1973。
- 6) 高橋重雄、谷本勝利、鈴村諭司：直立壁に作用する衝撃波圧の発生機構に関する一考察、港湾技術研究所報告、第22巻、第4号、pp.3-31、1983。
- 7) 谷本勝利、高橋重雄：直立消波ケーソンの上床版に働く空気圧縮揚圧力、第27回海岸工学講演会論文集、pp.315-319、1980。

(1999.4.19受付)