

新型防波護岸の越波阻止性能と波圧低減のための消波工形式

片岡保人*・大谷 修*・中岡威博*・濱崎義弘**・竹鼻直人**・市川靖生**

*技術開発本部・機械研究所 **都市環境カンパニー・構造技術部

Wave Overtopping and Dissipation for a New Type of Shore Protection

Yasuto Kataoka・Osamu Otani・Takehiro Nakaoka・Yoshihiro Hamazaki・Naoto Takehana・Yasuo Ichikawa

A new type of shore protection with an overhanging shape, where critical crest elevation is about 1/3 lower than conventional vertical structures, was developed. Wave overtopping prevention was found to depend mainly on the specific volume between the front of the shore protection and the water surface. A combination of tall vertical slits in the shore protection, and wave dissipating blocks located a little away from the shore protection at the same height as the water surface, was found to be effective to reduce wave pressure and consistently prevent wave overtopping .

まえがき = 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、越波を極力低減する必要がある。従来の直立消波護岸で越波を低減しようとすると、護岸の天端高さ（静水面上の護岸高さ）が高くなり、それにともない断面が巨大化する恐れがある。

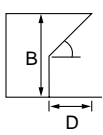
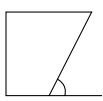
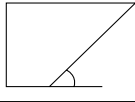
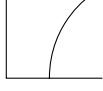
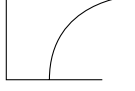
そこで、非越波と低天端の相反する課題を解決する護岸として、写真 1b)および第 1 表 に示すような、護岸前面が沖側に張り出した円弧形状のフレア型護岸が提案されている。写真 1 では同じ波高を与えた場合の水理試験状況を示しているが、従来の直立型護岸では越波しているのに対し、フレア型護岸では越波していない。このようにフレア型護岸では、限界天端高さ（越波量がゼロとなるために必要な最小の護岸天端高さ）が従来の直立消波護岸にくらべてきわめて低く、沖波波高（第 1

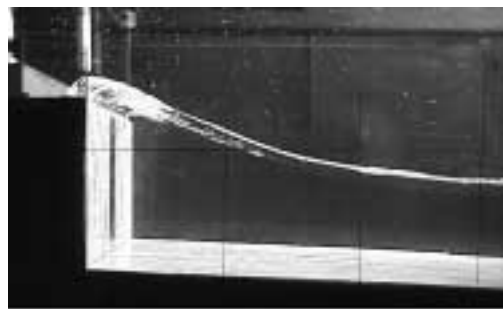
章参照）以下となることが明らかにされている¹⁾。

本報では、まず、第 1 表に示すようなフレア型護岸と当社が新たに提案した逆三角形型護岸（第 1 表 ~ 参照、以下ナブラ型護岸という）の限界天端高さを水理実験により求め、その越波阻止性能とそれを支配する因子²⁾について述べる。

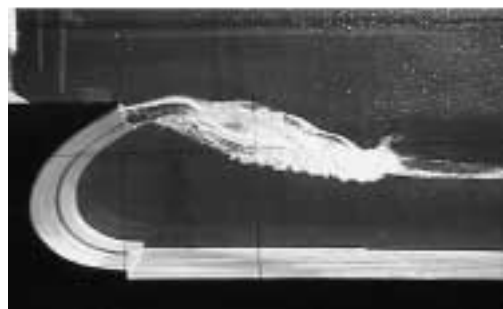
ナブラ型護岸は、フレア型護岸の越波阻止性能を活かしつつ、製作性、施工性を容易にする目的で前面形状を曲面から平面に簡素化したものである。しかし、これらフレア型やナブラ型護岸を高波浪域に適用する場合には、護岸前面形状が凹型形状であるために衝撃的な波圧の増大という問題が生じてくる。そこで、高波浪域への適用の際に、本護岸の特長である越波阻止性能を確保しつつ、護岸前面に作用する波圧を低減できる消波工形式

第 1 表 護岸モデルの形状と寸法
Table 1 Shape and dimension of shore protection model

| No. | Type of Shape | B cm | D / B | deg |
|-----|---|---------|-------|-----|
| | Nabla  | 36.2 | 0.5 | 45 |
| | Nabla  | 36.2 | 0.5 | 63 |
| | Nabla  | 36.2 | 1 | 45 |
| | Flare  | 36.2 | 0.5 | - |
| | Flare  | 36.2 | 1 | - |



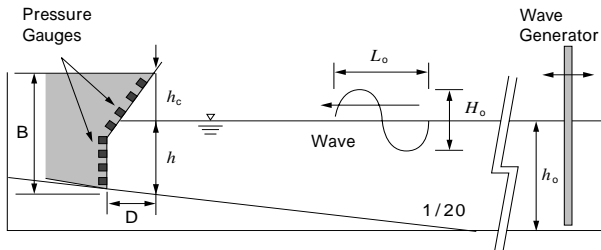
a) Conventional shore protection



b) Flare type shore protection

写真 1 越波阻止性能試験

Photo 1 Testing of ability to prevent wave overtopping



第1図 実験水槽の概要
Fig. 1 Schematic representation of water channel

の基礎的検討結果³⁾についても述べる。

1. 越波阻止性能

1.1 実験装置と測定条件

ナブラ型護岸の越波阻止性能と、フレア型護岸のそれとの比較をおこなうために、両護岸の限界天端高さを水理実験により求めた。実験は、第1図に示す二次元造波水槽（長さ30m、高さ1.2m、幅0.6m）の中に海底勾配を模擬した勾配1/20の不透過斜面を設置し、沖側水平床部の水深を $h_0 = 85\text{cm}$ としておこなった。実験にもちいたナブラ型およびフレア型護岸モデルの形状、寸法を第1表に示す。

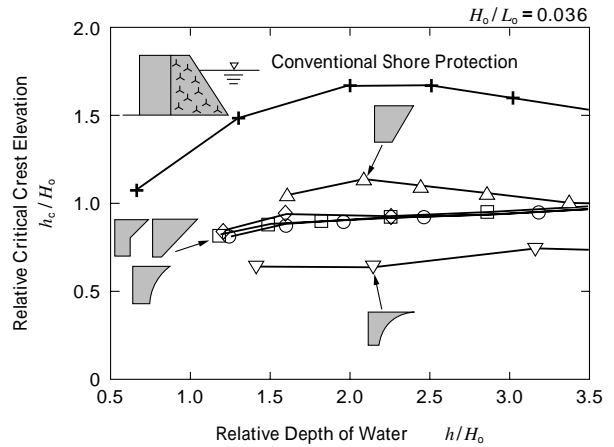
護岸高さはすべて $B = 36.2\text{cm}$ とし、護岸奥行き深さ D と護岸高さ B の比は $D/B = 0.5$ 、1の2種類とし、 $D/B = 0.5$ のナブラ型護岸については護岸前面角度を $= 45^\circ, 63^\circ$ の2種類とした。なお、フレア型 $D/B = 1$ の形状は半径36.2cmの1/4円で、フレア型 $D/B = 0.5$ の形状は底面に対して垂直な半径45.25cm ($= 1.25 \times 36.2\text{cm}$) の円弧の一部になっている。

護岸の限界天端高さ h_c は、護岸の設置水深 h に対して入射させる規則波の沖波波高 H_0 を種々変えて越波の有無を逐次確認しながら求めた。水深 h は22.5~31.5cmの範囲とした。越波ありとは、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。波形勾配は $H_0/L_0 = 0.036$ (H_0 : 沖波波高, L_0 : 沖波波長) とし、護岸前面には消波工は置かず、護岸単体での特性を調べることにした。

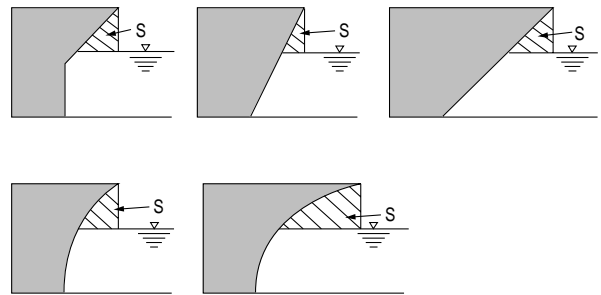
1.2 実験結果と考察

第2図は、ナブラ型およびフレア型護岸の相対設置水深 h/H_0 に対する沖波波高で無次元化した限界天端高さ h_c/H_0 (以下、相対限界天端高さという) を示したものである。また、図中には、+印で直立消波護岸の港湾の施設の基準・同解説⁴⁾から読みとった相対天端高さも図示している。ここでの直立消波護岸とは、図中に示す直立型護岸前面にテトラポッドを台形状に積層した従来型護岸である。

第2図より、ナブラ型護岸はフレア型とともに、直立消波護岸にくらべて相対限界天端高さが小さく、つまり非常に越波が生じにくい形状であることがわかる。これら護岸は、直立型護岸の2/3以下、形状、波浪条件によっては1/2以下の天端高さで越波なしを実現可能であると考えられる。また、今回実験した範囲で、ナブラ



第2図 各護岸の限界天端高さの比較
Fig. 2 Comparison of critical crest elevation



第3図 各護岸下面の静水面上の面積
Fig. 3 Specific volume between front of shore protection and water surface

型およびフレア型護岸の越波阻止性能を比較すると、護岸 Δ がもっとも相対限界天端高さ h_c/H_0 が低く性能が良いことがわかり、護岸 ∇ がもっとも悪くなっている。また、護岸 \square , \circ は、これらの中間でほぼ同等の性能を示している。

これらの結果より、越波阻止性能は、単に護岸奥行き深さ D と護岸高さ B の比 D/B に依存するのではなく、第3図に示す護岸下面の静水面上の面積（静水面上の護岸のふところの面積） S に大きく依存するものと考えられる。第3図に見られるように、同じ水深において、護岸 Δ の護岸下面の静水面上の面積 (S) がもっとも大きく、護岸 ∇ のそれ (S) がもっとも小さく、護岸 \square , \circ の場合は、それらの中間でほぼ同じ大きさになっている。すなわち、

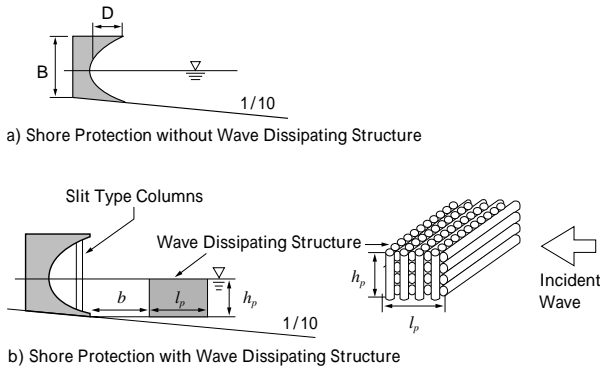
$$S_{\Delta} > S_{\square} \quad S_{\circ} \quad S_{\nabla} > S_{\triangle} \dots\dots\dots (1)$$

となっている。このことより、越波阻止性能は、護岸下面の静水面上の面積 S が同じであればほぼ同等となり、また S を大きくするほど向上するものと考えられる。

2. 波圧低減のための消波工形式の検討

2.1 実験装置と測定条件

実験は、1.1節と同じ二次元造波水槽中に海底勾配が急な海域を模擬した勾配1/10の斜面を設置し（海底勾配が急なほど、護岸前面における波高が高くなり、設計条件が厳しくなる）、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



第4図 実験にもちいたフレア護岸モデル
Fig. 4 Experimental models of flare type shore protection

おこなった。

フレア型護岸モデルは、第4図に示すようなフーチング(下部のせり出し)を設けた形状で⁵⁾、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 $h_c = 11.5\text{cm}$ とした。

入射波は、高波浪域を再現するために沖波波高 $H_0 = 7 \sim 15\text{cm}$ 、沖波波形勾配 $H_0/L_0 = 0.036$ 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 $H_{0,max}$ (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 H_0 を種々変えて越波の有無を逐次観察しながら求めた。

また、各入射波高 H_0 に対して、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 の小型圧力計をもちい、8個の圧力計を、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。

消波構造としては、第4図(b)に示すように護岸のふところに設置するスリット状の柱(以下スリット柱という)と、護岸沖側前面に設置するパイプ消波工を検討対象とした。スリット柱は外径 22mm の塩化ビニル製パイプをすきま間隔 8.4mm で設置した(柱の直径部分における開口率 28%)。なお、パイプ消波工はもっとも一般的な消波工であるテトラポッドを模擬したもので、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、護岸との間隔を容易に検討するためにもちいたものである。

パイプ消波工としては、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合せた構造とし、空隙率は 43% とした。ここではまず消波工を設置しない護岸単体で限界天端高さとして護岸に作用する波圧の計測をおこなった。次に第2表に示すように、パイプ消波工の高さ h_p 、幅 l_p 、護岸前縁との間隔 b を種々変化させた越波阻止性能試験からもっとも効率の良いパイプ消波工寸法と位置を選択した。最後に、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。

2.2 実験結果と考察

2.2.1 護岸単体の場合

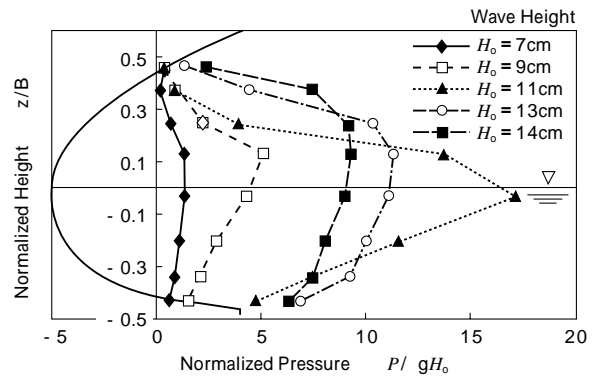
水槽実験の結果、消波工を設置しないフレア型護岸単

第2表 各種パイプ消波工寸法、位置における非越波限界波高 $H_{0,max}$

Table 2 Critical wave height $H_{0,max}$ for each wave dissipating structure

| Height h_p | Width l_p | Distance from Shore Protection b | | | | |
|--------------|-------------|------------------------------------|----|----|----|----|
| | | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 |
| 23.5 | 40.8 | 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 | - |

■ : $H_{0,max}$



第5図 護岸単体の波圧分布
Fig. 5 Wave pressure distribution in case of only shore protection

体での非越波限界波高は $H_{0,max} = 14\text{cm}$ 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 ($h_c = 11.5\text{cm}$)は最大沖波波高 $H_{0,max}$ の約 80% となる。これに対して、港湾の施設の基準・同解説⁴⁾から求められた直立消波護岸の必要天端高さは、最大沖波波高を大幅に越える高さになる。このことから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。

いっぽう、第5図に護岸単体の場合の作用波圧分布を示す。縦軸は、静水面を原点とし、波圧計測位置 (z) を護岸高さ (B) で無次元化して表している。横軸は、護岸面に対して法線方向の波圧 (P) を沖波波高相当の静水圧 (gH_0) で無次元化している。

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相対高さ (z/B) の $+0.1 \sim 0.2$ 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 (H_0) 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、直立護岸単体の衝撃砕波圧発生時と同様の現象⁶⁾⁷⁾が、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もっと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。

2.2.2 消波工を設置した場合

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 $H_o \text{max} = 14\text{cm}$ 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を減少するための消波工形式を検討した。

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 $H_o = 14\text{cm}$ 未満でも越波を生じた。このため、非越波限界波高 $H_o \text{max} = 14\text{cm}$ 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、第4図のように、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 $H_o \text{max} = 14\text{cm}$ が確保できることがわかった。

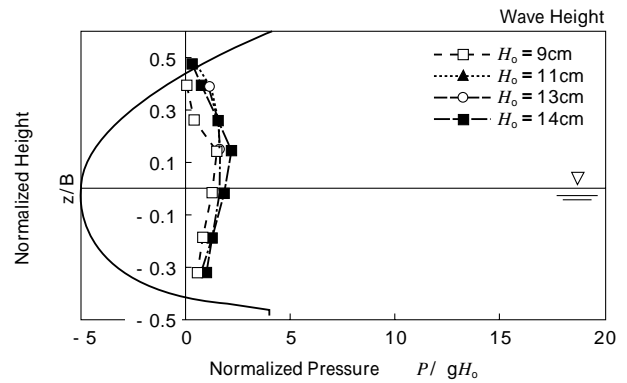
第2表に各種パイプ消波工の高さ h_p 、幅 l_p 、護岸前縁との間隔 b を種々変化させた場合の非越波限界波高 $H_o \text{max}$ の試験結果を示す。本試験結果より、以下のことが明らかとなった。

- 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高さ11cm 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 $h_p = 11\text{cm}$) 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れたほうが (b を大きくしたほうが) 越波を誘発せず、非越波限界波高は大きくなる。

このことより、今回試験した範囲内で、非越波限界波高 $H_o \text{max} = 14\text{cm}$ 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。

第6図は、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。両方を組合わせたことにより、波圧を沖波波高相当静水圧 (gH_o) 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 $H_o \text{max} = 14\text{cm}$ も確保されていた。

さらに、現実的な適用を考え、パイプ消波工部分をテ



第6図 消波工を設置した場合の波圧分布

Fig. 6 Wave pressure distribution in case of shore protection with wave dissipating structure

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も測定したが、第6図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 $H_o \text{max} = 14\text{cm}$ も同様に確保されていた。

むすび = 本報で述べたナブラ型護岸は、非越波、低天端護岸の一つであるフレア型護岸とほぼ同等の越波阻止性能を示した。従来の直立型護岸にくらべ天端高さは2/3以下となり、かつ形状も比較的簡素なことから、実用上有益な護岸形式であると考えられる。また、フレア型護岸を高波浪で、かつ海底勾配が急な海域に適用する場合、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など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。

最後に、共同研究先であり、非常に有益なご指導を賜りました九州大学入江功教授、宮崎大学村上啓介助教授に心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 村上啓介ほか：海岸工学論文集，第43巻 (1996)，p.776.
- 2) 片岡保人ほか：海洋開発論文集，Vol.14 (1998)，p.405.
- 3) 片岡保人ほか：海洋開発論文集，Vol.15 (1999)，p.725.
- 4) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上)，(1989)，p.113.
- 5) 上久保祐志ほか：テクノオーシャン 98 論文集 (1998) p.129.
- 6) 合田良実：港湾技術研究所報告，Vol.12，No.3，(1973)，p.3.
- 7) 高橋重雄ほか：港湾技術研究所報告，Vol.22，No.4，(1983)，p.3.