

越波低減型防波護岸の天端高さと作用波圧

Crest height and wave pressure of a new type of shore protection to reduce wave overtopping

片岡保人*、中岡威博*、中川知和**、浜崎義弘***、杉井謙一***、村上啓介****、入江功*****
Yasuto Kataoka, Takehiro Nakaoka, Tomokazu Nakagawa, Yoshihiro Hamazaki, Kenichi Sugii,
Keisuke Murakami and Isao Irie

Abstract

A new type of shore protection, the shape of which is an overhanging inverse triangle, called the "nabla" type, is proposed to reduce crest height and wave overtopping amount. Crest heights and wave pressures when using this shore protection are investigated by experiments using a water channel. The crest heights of the nabla type are almost as low as that of the "flare" type, the shape of which is an overhanging circular arc, and about 2/3 lower than that of the conventional vertical shore protection. It is shown that the crest height mainly depends on the specific volume between the front of the shore protection and the water surface. It is thought that the nabla type is useful due to its simple shape in comparison with the flare type, although wave pressures when using the nabla type become a little larger than that of the flare type as the depth of water decreases and transfers to the wave breaking region.

Keywords: Shore protection, Crest height, Wave pressure, Overtopping

1.はじめに

空港や発電プラントなどを、外洋に面した比較的大水深、高波浪の沿岸域に建設する際には、これらの施設を確実に保全するために、護岸での越波量を極力低減することが要求される。従来の直立型護岸の場合、護岸の天端高さを高くすることで、越波量を低減しているため、設計波高が大きくなるにしたがって護岸断面は巨大化する恐れがある。さらに、臨海公園用の親水性護岸や、航空機の離着陸のため高さ制限を考慮する必要がある空港用護岸などでは、非越波と低天端の相反する課題を両立させることが強く望まれている。この課題を解決する護岸のひとつとして、表1中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、越波量がゼロとなるために必要な最小の護岸天端高さ（以下、限界天端高さという）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。

本研究では、製作性、施工性を加味し、フレア型護岸の前面形状をより簡素化した逆三角形型護岸（表1参照、以下ナブラ型護岸という）を新たに提案し、これら護岸の越波阻止性能および護岸に作用する波圧特性を明らかにすることを目的としている。

2.実験装置と測定条件

(1)限界天端高さの測定

ナブラ型護岸の越波阻止性能を把握するために、また、フレア型護岸のそれとの比較を行うために、両護岸の限界天端高さを水理実験により求めた。実験は、図1に示す2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 $h_0=85\text{cm}$ として行った。実験に用いたナブラ型およびフレア型護岸モデルの形状、寸法を表1に示す。護岸高さは全て $B=36.2\text{cm}$ 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

* (株)神戸製鋼所機械研究所構造強度研究室 (〒651-2271 神戸市西区高塚台1丁目5-5)

** 正会員 (株)神戸製鋼所機械研究所構造強度研究室

*** 正会員 (株)神戸製鋼所都市環境事業部構造技術部

**** 正会員 宮崎大学工学部土木環境工学科

***** 正会員 九州大学工学部建設都市工学科

度を $\theta=45^\circ$ 、 63° 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、表2に示す護岸の設置水深 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。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。波形勾配は $H_0/L_0=0.036$ 、 0.012 (H_0 : 沖波波高、 L_0 : 沖波波长)の2種類とし、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。

(2) 波圧分布の測定

波圧分布の測定は、限界天端高さの測定と同様に、2次元造波水槽の中に勾配1/20の不透過斜面を設置し、沖側水平床部の水深を $h_0=85\text{cm}$ として行った。実験に用いた護岸は、後に述べる越波阻止性能がほぼ同等のナブラ型I、IIIと、フレア型IVの3種類とし、護岸の前面には消波工を置かずに、護岸単体での波圧分布を測定した。入射波の波形勾配は $H_0/L_0=0.036$ とし、表3に示す設置水深 h と入射波高 H_0 の各組み合わせについて波圧分布を測定した。測定には受圧面直径が8mmの小型圧力計を用い、圧力計8個を、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。測定時間は8秒間で、4~6波計測し、各波形の最大波圧値の平均値を作用波圧値とした。

表1 護岸モデルの形状と寸法

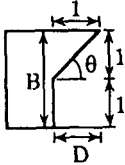
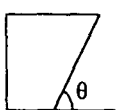
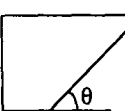
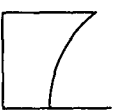
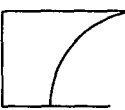
護岸 NO.	形状	B (cm)	D/B	θ (deg)
I	ナブラ 	36.2	0.5	45
II	ナブラ 	36.2	0.5	63
III	ナブラ 	36.2	1	45
IV	フレア 	36.2	0.5	—
V	フレア 	36.2	1	—

表2 限界天端高さの測定に関する実験条件

護岸 NO.	H_0/L_0	h (cm)
I	0.036	22.5, 24, 25.5, 27, 28.5
	0.012	21, 22.5, 24, 25.5, 27
II	0.036	22.5, 24, 25.5, 27, 28.5
	0.012	21, 22.5, 24, 25.5, 27
III	0.036	22.5, 24, 25.5, 27, 28.5, 30
	0.012	21, 22.5, 24, 25.5, 27
IV	0.036	22.5, 24, 27, 30
	0.012	21, 22.5, 24, 25.5, 27
V	0.036	27, 30, 31.5
	0.012	24, 25.5, 27, 28.5

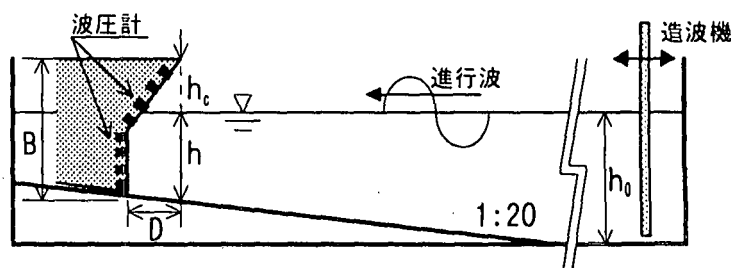


図1 実験水槽の概要

表3 波圧分布の測定に関する実験条件

B (cm)	D/B	h (cm)	H ₀ (cm)
36.2	0.5	27	11, 13, 15
		24	11, 13, 15
		21	11, 13, 15

◇、▽印は、それぞれ表1中の護岸Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴの結果を示している。また、図中には、不規則波による実験であり必ずしも直接対応はしないが、+印で直立消波護岸の越波量算定図²⁾から読みとった相対天端高さも図示している。ただし、海底勾配が1/20に対する越波量算定図が無いことと、越波量がゼロとなる護岸天端高さは図から読みとることはできないので、便宜的に沖波波高 $H_0=2\text{m}$ 、越波流量 $q=2\times 10^{-4}(\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{sec})$ とし、海底勾配が1/10と1/30の場合の相対天端高さの平均値で示している。

図2より、ナブラ型護岸はフレア型とともに、直立消波護岸に比べて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量ゼロ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Ⅴが最も相対限界天端高さ hc/H_0 が低く性能が良いことがわかり、護岸Ⅱが最も悪くなっている。そして、護岸Ⅰ、Ⅲ、Ⅳ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、図3に示す、護岸下面の静水面上の体積（静水面上の護岸のふところの体積）Sに大きく依存するものと考えられる。図3に示すように、同じ水深において、護岸Ⅴの護岸下面の静水面上の体積（ S_V ）が最も大きく、護岸Ⅱのそれ（ S_{II} ）が最も小さく、護岸Ⅰ、Ⅲ、Ⅳ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、

$$S_V > S_I \approx S_{III} \approx S_{IV} > S_{II} \dots\dots\dots(1)$$

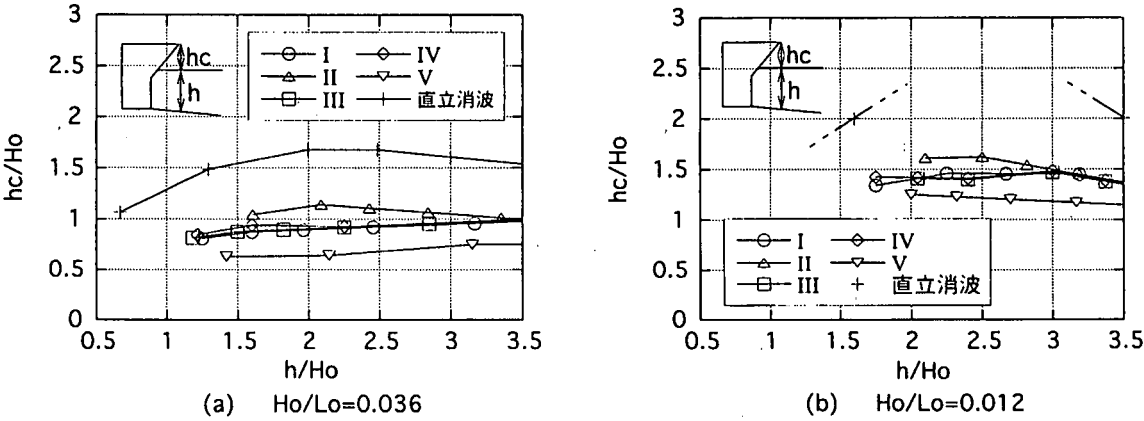


図2 相対設置水深に対する限界天端高さの変化

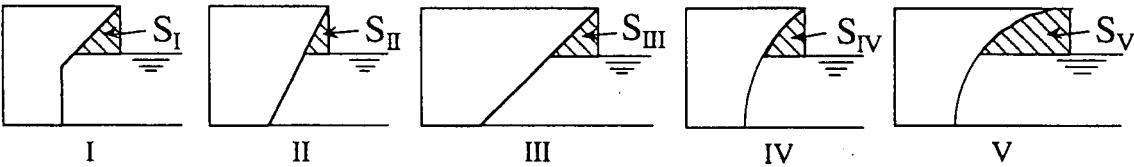


図3 各護岸の護岸下面の静水面上の体積

3.実験結果と考察

(1)限界天端高さ

図2(a)(b)はそれぞれ、入射波の波形勾配 H_0/L_0 が0.036と0.012の場合について、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 hc/H_0 (以下、相対限界天端高さという) を示したものである。図中の○、△、□、◇、▽印は、それぞれ表1中の護岸Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴの結果を示している。また、図中には、不規則波による実験であり必ずしも直接対応はしないが、+印で直立消波護岸の越波量算定図²⁾から読みとった相対天端高さも図示している。ただし、海底勾配が1/20に対する越波量算定図が無いことと、越波量がゼロとなる護岸天端高さは図から読みとることはできないので、便宜的に沖波波高 $H_0=2\text{m}$ 、越波流量 $q=2\times 10^{-4}(\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{sec})$ とし、海底勾配が1/10と1/30の場合の相対天端高さの平均値で示している。

図2より、ナブラ型護岸はフレア型とともに、直立消波護岸に比べて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量ゼロ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Ⅴが最も相対限界天端高さ hc/H_0 が低く性能が良いことがわかり、護岸Ⅱが最も悪くなっている。そして、護岸Ⅰ、Ⅲ、Ⅳ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、図3に示す、護岸下面の静水面上の体積（静水面上の護岸のふところの体積）Sに大きく依存するものと考えられる。図3に示すように、同じ水深において、護岸Ⅴの護岸下面の静水面上の体積（ S_V ）が最も大きく、護岸Ⅱのそれ（ S_{II} ）が最も小さく、護岸Ⅰ、Ⅲ、Ⅳ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、

$$S_V > S_I \approx S_{III} \approx S_{IV} > S_{II} \dots\dots\dots(1)$$

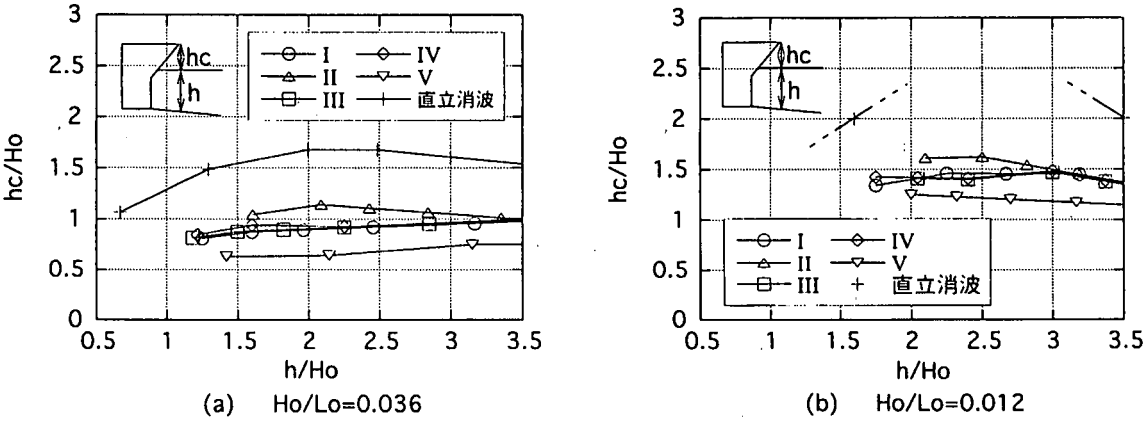


図2 相対設置水深に対する限界天端高さの変化

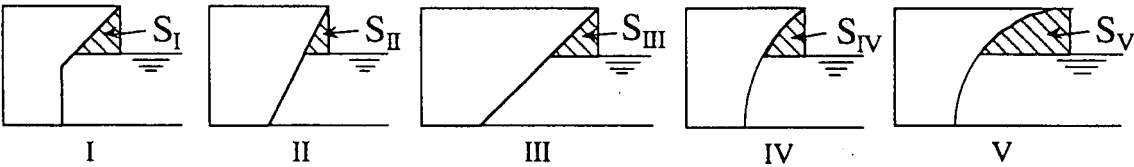


図3 各護岸の護岸下面の静水面上の体積

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体積 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)護岸に作用する波圧特性

図4、5、6はそれぞれ、越波阻止性能がほぼ同等の護岸Ⅰ、Ⅲ、Ⅳの波圧分布を示したもので、各図の(a)(b)(c)は護岸設置水深を変化させている。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。

図に示すように、波圧の分布形状は入射波高 H_o や護岸設置水深 h により異なるが、最大波圧は、静水面上から護岸高さ B の約10%程度の間に生じており、その値は沖波波高相当の静水圧の1~2倍程度になっている。

図4~6の(a)図に示す水深が比較的深い場合には、波はまだ砕波していないので、護岸形状に依らず、波圧分

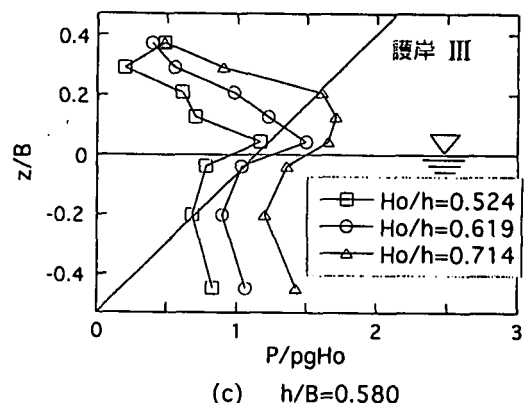
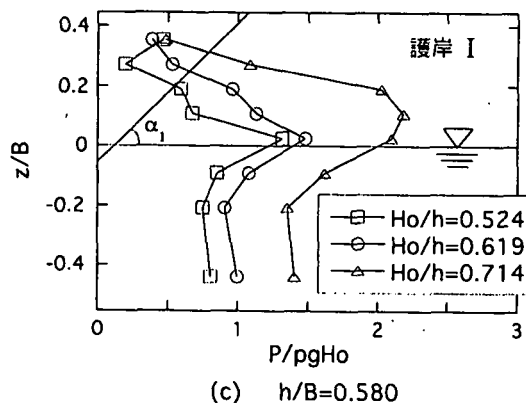
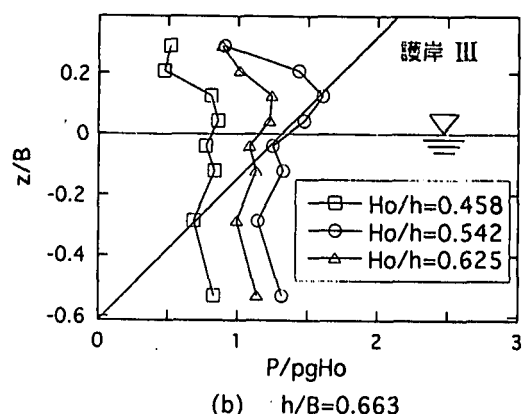
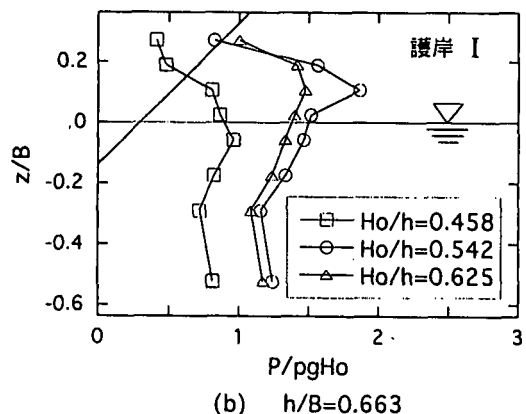
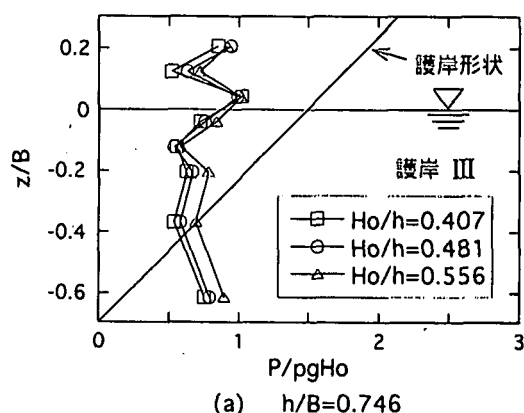
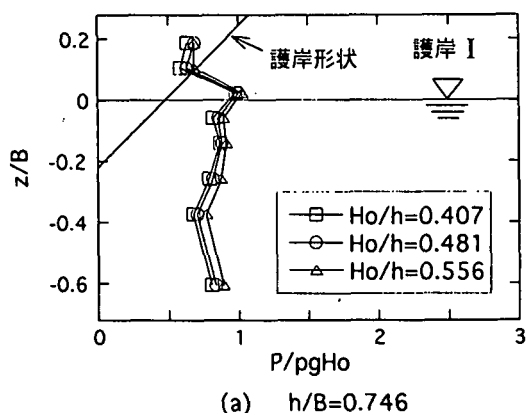


図4 護岸に作用する波圧分布 (護岸Ⅰ)

図5 護岸に作用する波圧分布 (護岸Ⅲ)

布はほぼ同じ形をしており、最大波圧値も沖波波高相当の静水圧程度になっている。これに対して、図4～6の(b)図から(c)図へと、水深が浅くなるにしたがって、波が砕波し始め、ナブラ型護岸における作用波圧がフレア型のそれに比べて大きくなっていく。また、水深が浅く入射波高が大きいときにナブラ型護岸で最大波圧値を示した部分の波形を観察すると、衝撃砕波圧の発生時に見られるような双峰型波形の前部が切り立った波形を呈していた。ナブラ型護岸における作用波圧がフレア型のそれに比べて大きくなる理由として、護岸前面と波面が成す角度の違いが考えられる。直立護岸に衝撃砕波圧が生じる場合、その波圧値は、砕波により切り立った波面と直立壁面との成す角度が小さいほど大きくなるといわれている³⁾。今回実験した護岸形状と水深の範囲では、水深が浅くなると、ナブラ型護岸の前面と静水面が成す角度 α_1 は、フレア型のそれ(α_2)よりも小さくなっていく(図4(c)、6(c)参照)。このため、護岸前面と砕波した波の波面が成す角度も水深が浅くなると、ナブラ型の方がフレア型よりも小さくなり、波圧が大きくなったものと考えられる。

また、図4(c)、図5(c)の $H_o/h=0.714$ の場合を比較すると、ナブラ型護岸Ⅰの方が、Ⅲよりも波圧が少し大きくなっている。本波高条件の場合、引き波時の波面は $z/B=-0.2$ のあたりまで下がり、そこから波面が上昇してくる。このとき、護岸Ⅲの場合は、水流は斜め 45° 上方向にのみ上昇していくのに対して、Ⅰの場合は、護岸前面の屈曲部で水流の方向が急に変えられ、その反力が護岸前面に作用することになる。この反力の作用が、ナブラ型ⅢよりもⅠの波圧が少し大きくなった原因のひとつと考えられる。

4. おわりに

上に述べたように、本研究で提案したナブラ型護岸は、非越波、低天端護岸のひと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。本護岸は、水深が比較的小さい場合には、屈曲部で若干の波圧上昇はあるものの、従来の直立型護岸に比べ天端高さは $2/3$ 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。

今後は、①屈曲部近傍の詳細な波圧特性把握と低減方法、②構造設計を考える上での波力特性の検討、③護岸の反射率の検討などをおこなっていく予定である。

参考文献

- 1) 村上啓介・入江功・上久保祐志 (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.
- 2) 合田良美 (1990): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp.122-123.
- 3) 合田良美 (1973): 衝撃砕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.

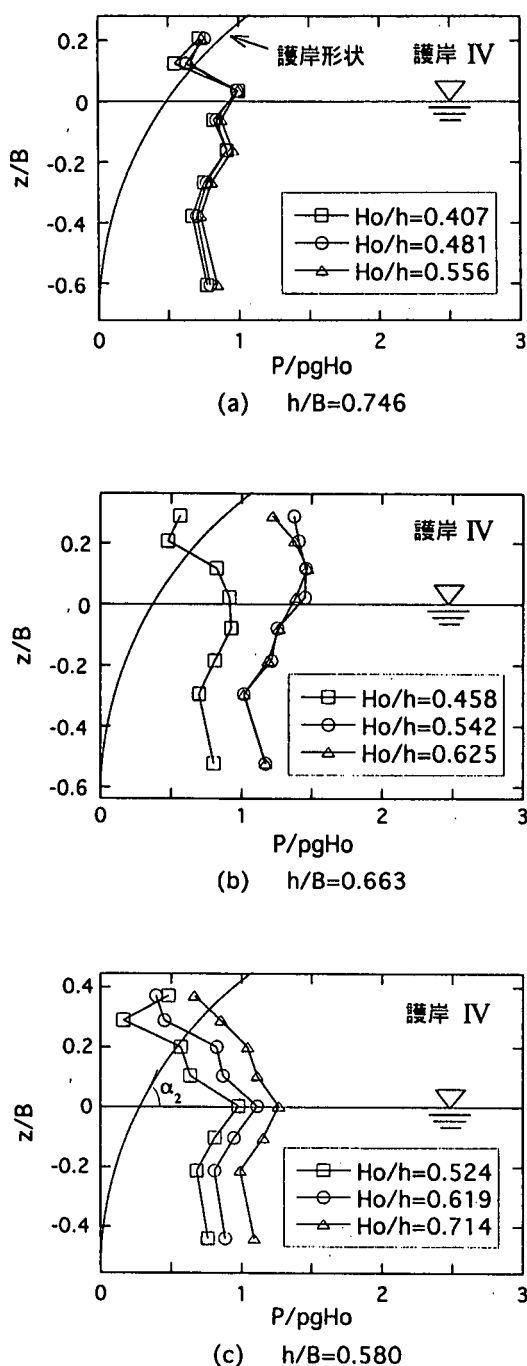


図6 護岸に作用する波圧分布(護岸Ⅳ)