

非越波型防波護岸の護岸天端高さと作用波圧について

村上 啓介*・入江 功**・上久保祐志***

1. ま え が き

外洋に面し高波浪が来襲する沿岸域に、空港や発電プラントなどの高度技術の集積からなる施設を施工することが要求されている。これらの施設を確実にかつ安全に保全するためには、越波量を極力低減することが要求される。所定の設計波高に対して越波流量を小さくするためには、護岸の天端高さを高くすればよいのであるが、設計波高が大きくなるにしたがって護岸断面は巨大なものとなる。このことは実際に事業を計画する上での大きな障害となっており、越波量が十分に小さくかつ低天端となり得る護岸断面の開発が強く望まれている。

防波護岸は、直立護岸以外にもいくつかの護岸断面形状が提案されその水理特性が示されているが(例えば、井上, 1974; 高田ら, 1979; 河野ら, 1992, 1993), いずれも越波量および護岸天端高さを根本的に低減できるものではない。そこで、本研究では、原則的に越波量がほとんどゼロでかつ低天端となり得る護岸断面の一つとして、図-1に示す非越波型防波護岸を提案する。非越波型防波護岸は、護岸に衝突する水塊の運動方向を凹断面部の円弧面に沿って強制的に冲向きに変えるため、従来の直立護岸に比べて越波が非常に生じにくい護岸と考えられる。一方、非越波型防波護岸は断面形状が凹形状であることより鉛直波力や衝撃的な波圧の増大も考えられる。

本研究は、非越波型防波護岸の基本的な越波阻止機能を把握するために、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、限界天端高さと呼ぶ)を実験により求め、護岸設置水深および沖波波高に対する護岸天端高さの低減効果を明らかにするとともに、護岸に作用する波圧特性を検討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

実験は、図-2に示す2次元造波水槽(長さ28 m, 高さ0.5 m, 幅0.3 m)の中に勾配1/20の不透過斜面を作成し、沖側水平床部の水深を $h_0=35$ cmとしておこなった。実験に用いた護岸は、護岸高さが $B=15$ cm, 護岸高さ B と護岸奥行き深さ D の比が $D/B=0, 0.5, 1, 2$ の4種類で、各護岸の頂部は5 mm厚のベニヤ板で作成し、越波に対する護岸頂部の厚さの影響を排除した。護岸の限界天端高さ h_c は、表-1に示す入射波の諸元(H_0 : 沖波波高, L_0 : 沖波波長)に対して護岸の設置水深 h を種々変えて越波の有無を逐次確認しながら求めた。越波の有無はビデオに録画した映像と目視によって判断した。このような方法で、護岸前面に消波工を設置した場合と設置しない場合についてそれぞれ限界天端高さを求めた。なお、限界天端高さは護岸前面の消波工の諸元(天端高さ, 天端幅, 設置位置, 空隙率など)にも依存するが(例えば、山本ら, 1984; 笹島ら, 1993; 高山ら, 1988), 本研究では、消波工を縮尺1/25の2t型テトラポッドを天端2個並びで層積みにして作成し、その天端を護岸天端に一致させた場合と静水面に一致させた場合とについて実験をおこなった。

(2) 護岸に作用する波圧分布の測定

実験は、限界天端水深の測定と同様に2次元造波水槽(長さ20 m, 高さ1.2 m, 幅0.6 m)の中に勾配1/20の

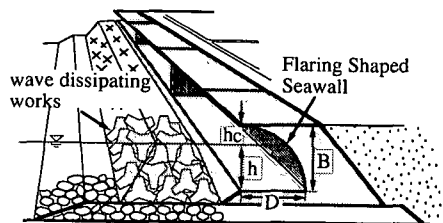


図-1 非越波型防波護岸の概念図

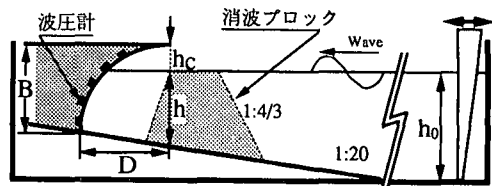


図-2 実験水槽の概要

* 正会員 工博 九州大学助手 工学部建設都市工学科
 ** 正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科
 *** 学生会員 九州大学大学院 工学研究科

表-1 限界天端高さの測定に関する実験条件

$B(\text{cm})$	D/B	H_0/L_0	$H_0(\text{cm})$
15	0	0.012	4, 6, 7, 8, 9
		0.036	
	0.5	0.012	
		0.036	
	1.0	0.012	
		0.036	
	2.0	0.012	
		0.036	

表-2 波圧分布の測定に関する実験条件

$B(\text{cm})$	D/B	$h(\text{cm})$	$H_0(\text{cm})$	$B(\text{cm})$	D/B	$h(\text{cm})$	$H_0(\text{cm})$
22.5	0.5	11	6, 8, 10, 11, 12, 13	36.4	0.5	27	7, 9, 11, 13
		13	6, 8, 10, 11, 12, 13			30	3, 5, 7, 9
		15	6, 8, 10, 12, 13			32	4, 5, 6, 7
		18	4, 6, 8, 9, 10				
	1.0	11	6, 8, 10, 11, 12, 13		1.0	24	7, 9, 11, 13
		13	6, 8, 10, 11, 12, 13			27	7, 9, 11, 13
		15	6, 8, 10, 12, 13			30	7, 9, 11, 13
		18	4, 6, 8, 9, 10			34	3, 4, 5, 6

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。実験に用いた護岸は、護岸高さが $B=22.5, 36.4\text{ cm}$ で、護岸高さ B と護岸奥行き深さ D の比が各々 $D/B=0.5, 1$ の4種類で、木製の型枠にコンクリートを充填して作成した。護岸の前には、層積した縮尺 $1/25$ のテトラポッド ($B=22.5\text{ cm}$ では 3.2 t 型、 $B=36.4\text{ cm}$ では 6.3 t 型) からなる消波工を、その天端が静水面と一致するように設置した。入射波の波形勾配は $H_0/L_0=0.036$ とし、表-2 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 8 mm の小型圧力計を用い、圧力計を護岸前面の中心線上に 4.2 cm 間隔で埋め込み、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ーに記録した。測定した波圧波形の多くは衝撃砕波圧の発生時に見られるような波形を呈し、その最大値は各波毎に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を作用波値とした。

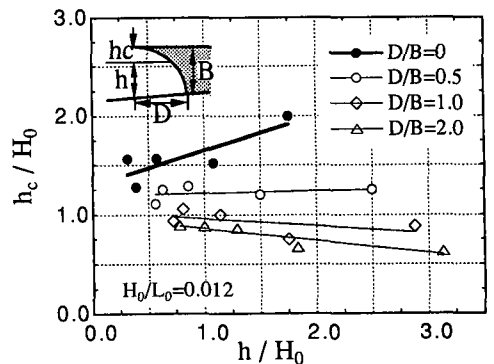
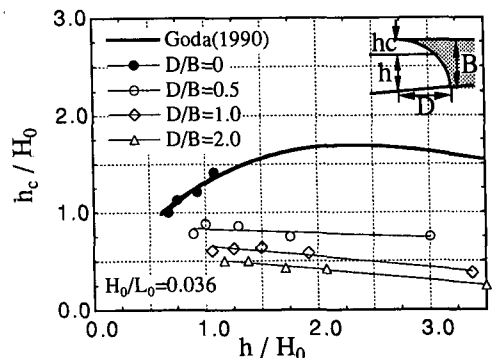
3. 実験結果と考察

(1) 非越波型防波護岸の限界天端高さ

図-3 は、入射波の沖波波形勾配 H_0/L_0 がそれぞれ 0.012 と 0.036 の場合について、天端が静水面と一致す

るよう作成した消波工を護岸前面に設置した場合の相対設置水深 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。図中の $\circ, \diamond, \triangle$ は、護岸高さ B に対する護岸奥行き深さ D がそれぞれ $0.5, 1, 2$ の場合の結果を示しており、 $\bullet$ は非越波型防波護岸と同じ護岸高さ B の直立護岸の限界天端高さを示している。また、図-3(b) には、直立消波護岸の越波量算定図 (合田, 1990) から読み取った相対天端高さも同時に図示している。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取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 $q=2\times 10^{-4}(\text{m}^3/\text{s})$ を与え、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-3(a) および (b) ともに、非越波型防波護岸の限界天端高さは相対設置水深の増加にともないほぼ直線的に減少する傾向を示している。一方、直立消波護岸の限界天端高さは相対設置水深の増加にともない大きくなる傾向にあり、非越波型防波護岸が直立消波護岸に比べて非常に越波が生じにくい断面であることがわかる。また、護岸の相対奥行き深さ D/B が大きいほど限界天端高さは小さくなる傾向がある。これらの結果は消波工の天端

(a) $H_0/L_0=0.012$ (b) $H_0/L_0=0.036$ 図-3 相対設置水深 h/H_0 に対する限界天端高さ h_c/H_0 の変化

を護岸頂部に一致するように設置した場合についても同様である。ただし、消波工の天端高さが高い場合は消波工法面を波が遡上するため、非越波型防波護岸の限界天端高さは図-3に示した結果よりも若干大きくなる傾向が見られた。また、消波工を設置しない場合の限界天端高さは、図-3に示した結果と大きな違いは見られなかったが、護岸面と波面との間に空気塊を取り込んだ激しい護岸への波当たりが発生し易い傾向が見られた。このような波当たりの状況は衝撃砕波圧の発生と大きく関係しており(例えば、荒見ら, 1989; 高橋ら, 1983), 護岸の強度や安定性を考える上では消波工の設置は必要と考えられる。

先に述べたように、非越波型護岸の限界天端高さが相対設置水深の増加にともない減少することは、入射波の波高が同じであれば、護岸の設置水深が大きくなるにしたがって天端高さが減少することを意味する。これは、沖波波高および護岸の相対奥行き深さ D/B が同じであれば、護岸の設置水深 h が大きくなるにしたがって入射波の波長に対する護岸の奥行き深さの比 D/L_0 が大きくなるため(ここでは護岸の奥行き深さ D が大きくなる),

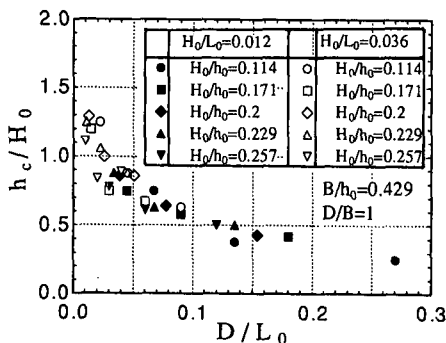


図-4 相対奥行き深さ D/L_0 に対する限界天端高さ h_c/H_0 の変化

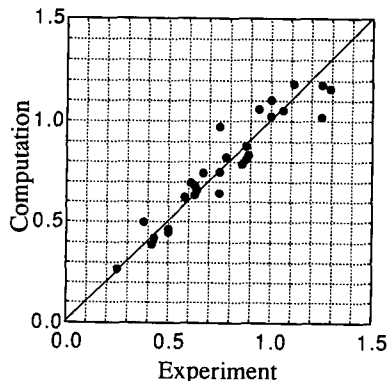


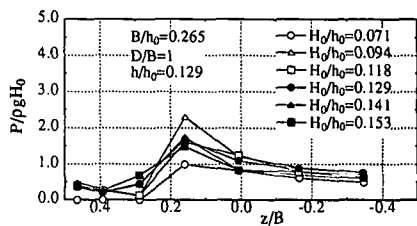
図-5 限界天端高さに関する実験値と推定値の相関

図-4に示すように、 D/L_0 の増大にともない限界天端高さ h_c/H_0 が減少することによる。

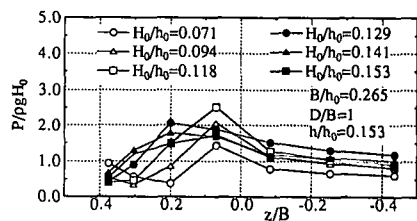
非越波型防波護岸の限界天端高さは、護岸の設置水深、相対奥行き深さ、沖波波形勾配、海底勾配、消波工による波高減衰率、砕波による波高減衰、護岸反射率など多くのパラメーターに依存するものと考えられるが、ここでは図-3の実験結果をもとに次式に示すような限界天端高さの推定式を重回帰分析により求めた。

$$\frac{h_c}{H_0} = -0.24 \frac{h}{H_0} - 0.18 \frac{D}{B} - 11.59 \frac{H_0}{L_0} - 2.63 \frac{H_0}{h_0} + 2.17 \quad \dots\dots\dots (1)$$

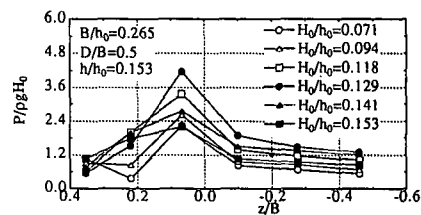
式(1)は消波工の天端が静水面に一致する場合についてのもので、式(1)から求めた限界天端高さを実験値との相関を図-5に示す。図-5より、推定値と実験値



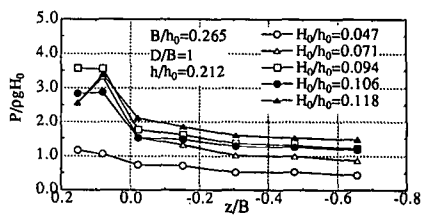
(a) $h/h_0=0.129$



(b) $h/h_0=0.153$



(c) $h/h_0=0.176$



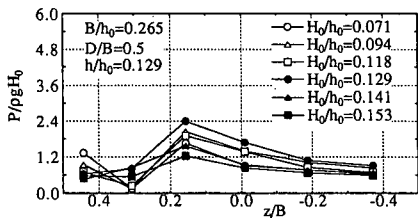
(d) $h/h_0=0.212$

図-6 護岸に作用する波圧分布 ($D/B=1$)

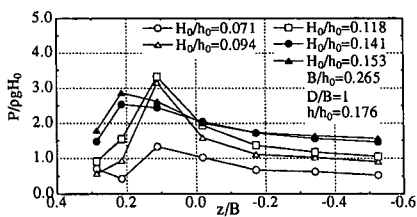
の相関係数は0.96と高く、式(1)が実験結果を良く決定しているものと考えられる。

(2) 非越波型防波護岸に作用する波圧・波力特性

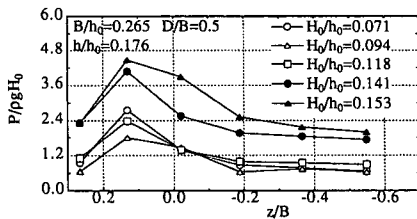
図-6と図-7は、護岸高さが $B=22.5$ cmの護岸に作用する波圧分布を $D/B=1$ と 0.5 の場合について示したもので、各図の(a)~(d)は護岸設置水深が異なる。図の縦軸は護岸面に対して法線方向の波圧を表し、横軸は静水面を原点とし鉛直上向きを正に取った座標で表している。図-6および図-7に示すように、波圧の分布形状は入射波高や護岸設置水深によって若干異なるが、最大波圧は静水面上から護岸高さ B の10%~20%の間に生じ、その値は沖波波高相当の静水圧の1.2~4.5倍程度を示している。この傾向は護岸スケールが大きい $B=36.4$ cmの場合についても同様である。



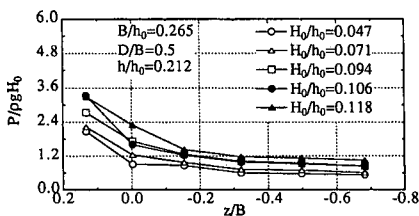
(a) $h/h_0=0.129$



(b) $h/h_0=0.153$



(c) $h/h_0=0.176$



(d) $h/h_0=0.212$

図-7 護岸に作用する波圧分布 ($D/B=0.5$)

最大波圧の値が入射波高や護岸の設置水深によって異なるのは、護岸の相対設置水深によって碎波位置が変動することによる。図-8と図-9は、図-6と図-7の結果をもとに、護岸の相対設置水深 h/H_0 に対する最大波圧の特性を $D/B=1$ と $D/B=0.5$ の場合について示したものである。図-8に示した $D/B=1$ の場合は、沖波波高が小さい範囲では消波工の天端上で弱い碎波が生じ、最大波圧値 $P_{\max}/\rho g H_0$ は1~1.5程度と小さいが、沖波波高が増大するにしたがって碎波のスケールも大きくなり、最大波圧値は増大している。さらに沖波波高が大きくなると、碎波点は消波工の沖側に移動し、碎波後の減衰した波がさらに消波工を通過して護岸に作用するため最大波圧値は減少している。

図-9に示した $D/B=0.5$ の場合についても、設置水深が比較的浅い $h/h_0=0.129$ と 0.153 のケースでは図-8と同様の傾向が見られる。一方、設置水深が比較的深い $h/h_0=0.176$ と 0.212 において h/H_0 が小さい範囲で最大波圧値の減少傾向が見られないのは、消波工の沖側で碎波が生じる程度の大きな波高の波が実験に用いた装置では造波できなかったためと考えられる。

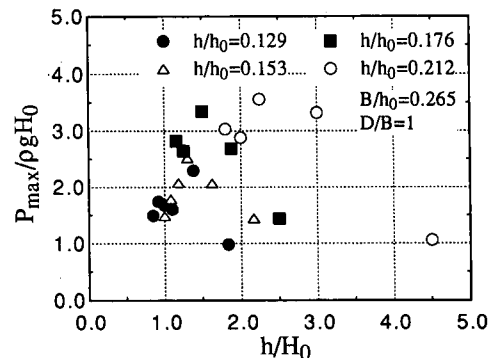


図-8 護岸の相対設置水深 h/H_0 に対する最大波圧の変化 ($D/B=1$)

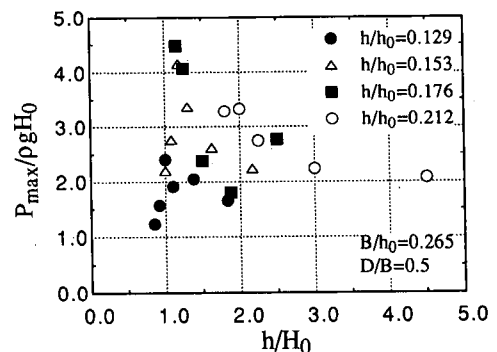
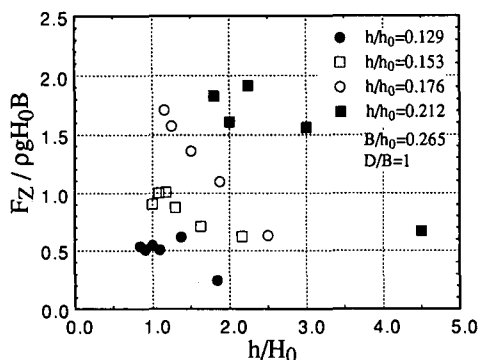
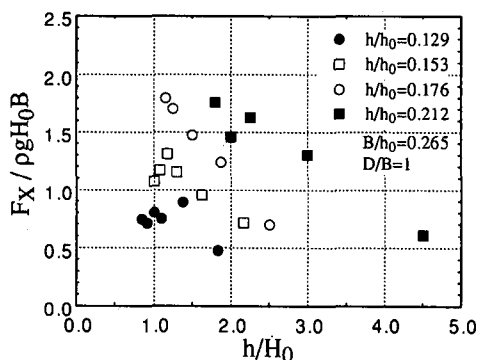


図-9 護岸の相対設置水深 h/H_0 に対する最大波圧の変化 ($D/B=0.5$)

図-10 護岸の相対設置水深 h/H_0 に対する鉛直波力の変化図-11 護岸の相対設置水深 h/H_0 に対する水平波力の変化

先に述べたように、最大波圧は静水面上から護岸高さ B の 10%～20%の間に生じ、その値は沖波波高相当の静水圧の数倍程度となる。非越波型防波護岸は凹状の護岸断面を有するため、護岸の上部に作用する最大波圧は鉛直波力の増大に大きく寄与するものと考えられる。そこで、波圧の鉛直成分と水平成分をそれぞれ求め、その値を護岸面に沿って積分して各波力成分を算定した。なお、各測点における波圧時間波形の位相がほぼ同期していることを確認したので、鉛直および水平波力は各測点における波圧最大値の各方向成分を積分して求めた。

図-10 は、 $D/B=1$ の護岸 ($B=22.5$ cm) に作用する鉛直波力の変化を護岸の相対設置水深 h/H_0 に対して示したもので、図-11 は水平波力成分について示している。相対設置水深 h/H_0 に対する鉛直波力および水平波力の変動は、各波力成分に対する護岸上部に作用する最大波圧の寄与が大きいため、図-8 に示した最大波圧の変動特性に類似している。また、鉛直波力の大きさは水平波力の大きさとほぼ同程度となり、従来の直立消波護岸などに比べて鉛直波力成分が無視できないことがわか

る。同様の傾向は $D/B=0.5$ の場合についても言えるが、奥行き深さが浅いため鉛直波力値は水平波力値のおよそ 50%～65%程度小さな値を示している。

4. あとがき

本研究では、越波量が原則的にゼロでかつ低天端となり得る防波護岸として非越波型防波護岸を提案し、その限界天端高さが従来の直立消波護岸に比べて格段に低く、沖波波高以下となることを示した。また、限界天端高さの推定式を誘導し高い相関で実験値を推定できることを示した。つぎに、護岸に作用する波圧特性の検討をおこない、沖波波高相当の静水圧の数倍程度の最大波圧が静水面付近に生じ、その値は護岸の相対設置水深によって変動することを示した。

非越波型防波護岸は深い凹断面形状を有するため、水平波力と同程度のオーダーの鉛直波力が護岸に作用する。このような鉛直波力は護岸の安定問題に大きく係ることより、鉛直波力の低減が可能な消波工の最適諸元や護岸断面形状の検討が必要と考えられる。また、本研究では護岸に作用する衝撃碎波圧に関する詳細な検討はおこなわなかったが、衝撃碎波圧の発生条件や波圧強度も従来の直立消波護岸とは異なるものと考えられる。これら、護岸の強度や安定性に係わる波圧および波力特性の詳細な検討は今後の課題である。

参 考 文 献

- 荒見敦史・服部昌太郎 (1989): 衝撃碎波圧の発生機構に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 579-583.
- 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.
- 河野二夫・高野重利・河野文俊・宮下 充 (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.
- 河野二夫・高野重利・津田博規 (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.
- 合田良夷 (1990): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 122-123.
- 笹島隆彦・山中浩次・木村克俊・水野雄三・菊地聡一 (1993): 2 重堤の水理特性について, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 645-649.
- 高田 彰・吉田吉治・藤川浩生 (1979): 海岸堤防・護岸の断面形状と越波量との関係, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 285-289.
- 高橋重雄・谷本勝利・鈴木諭司 (1983): 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.
- 高山知司・池田直太・永井紀彦・高山 俊 (1988): 広天端幅帯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.
- 山本正昭・西 裕司 (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.