

深い水深における消波堤に関する研究*

永井 莊七郎**・大坪 崇彦***・遠藤 正男****

1. 緒 言

第 11 回海岸工学講演会¹⁾において、比較的浅い水深における海岸堤防とその前面に設けられた消波堤との関係について発表したが、最近の臨海工業地帯あるいは臨海観光地（たとえば和歌山県串本港など）の中には、前面水深が 7.0~9.0 m、異常高潮位時の偏差が 3.0~3.5 m、設計時の水深が 10~13 m という深い水深まで埋立を行なうようになった。今回は、このような深い海中に築造される消波堤について、設計波浪、設計潮位と相対越波量 q_i/q_0 、相対護岸高さ H_c/H 、相対消波堤天端高さ H_r/H との関係を明らかにする目的で種々の実験を行なった。

消波用異形ブロックとして、第 8 回海岸工学講演会に中空 N 型ブロックを発表した²⁾が、今回、このブロックを空げき率を増すように改良を加えた中空 N_2 、 N_3 型ブロックを考案し、今までのブロックと比較実験を行なったところ、その安定性に加えて消波効果がさらに優れていることがわかったので、ここにあわせて発表する。

2. 実験設備

実験は、昭和 41 年 8 月完成した長さ 50 m、幅 1.0 m、高さ 1.65 m の風洞付波浪水槽で行なった（図-1）。水槽の一端に取付けられたフラップ式の造波装置（10 IP）は、周期 0.9~3.6 sec まで連続的に変化でき、最

大波高は約 40 cm まで起こすことができる。

風は、波浪水槽の上部をアルミニウムの円弧板でおおひ、造波装置の上部に設けた軸流送風機（15 IP）から、風速 $V_m=5.0\sim6.0$ m/sec（縮尺 1/20 として $V_p=20\sim25$ m/sec）の様な風を送った。風速測定は、防波護岸前面と護岸より沖 20 m のところでピトー管で測定した。その鉛直分布を図-2 に示す。

防波護岸の模型は木製で、造波装置より 43 m の所に設けた。海底勾配 1/100 を護岸前面より 10 m のところまで設置した。

3. 深い水深における消波堤の設計方針

いま、設計条件としてつぎのような値を採用する。

前面水深 $h_{ip}=8.0\sim14.0$ m

波高 $H_p=2.0\sim5.0$ m

周期 $T_p=5.0\sim13.0$ sec

風速 $V_p=20\sim25$ m/sec

この条件のもとで、防波護岸前面に消波堤を設ける場合、つぎの事項を決めなければならない（図-3 参照）。

- (1) 護岸天端（パラペットの天端）の設計潮位からの高さ： H_c
- (2) 消波堤天端の設計潮位からの高さ： H_r
- (3) 護岸前面より消波堤ののり肩までの幅： B'
- (4) 消波ブロックの種類とその安定重量
- (5) 越波を許す場合には、排水路の幅と埋立地に設

図-1 (a) 風洞付波浪水槽

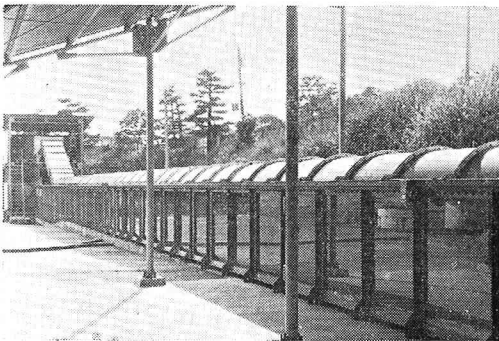
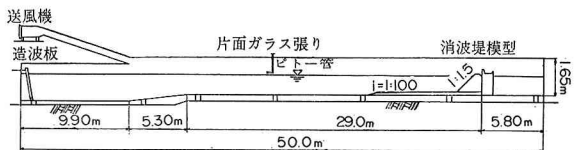


図-1 (b) 実験水槽側面図



ける副壁の高さ。

消波ブロックの種類は、その安定性、消波性、経済性などを考慮して決定し、その安定重量は安定重量曲線から決める。設置水深が深いのを考慮する。

消波ブロックが決まると、消波堤の天端幅 B' は、消波ブロックを天端に何列並べるかによって決まる。この天端幅 B' は、これを大きくすると水深が深いため消波堤断面が非常に大きくなり経済的でない。また、ブロッ

* 土木学会第 22 回年次学術講演会において一部発表

** 正会員 工博 大阪市立大学教授工学部土木工学科

*** 学生員 大阪市立大学大学院学生

**** 正会員 大阪市立大学助手工学部土木工学科

図-2 水面上風速の鉛直分布

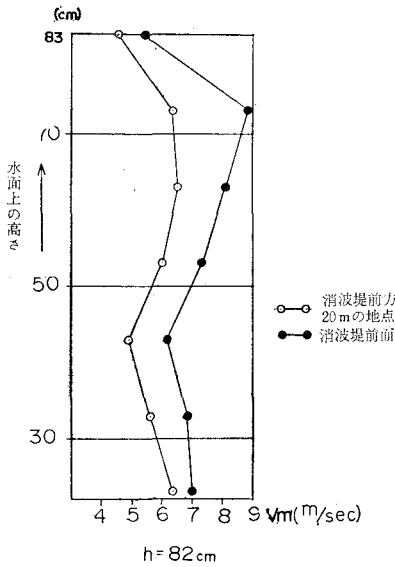
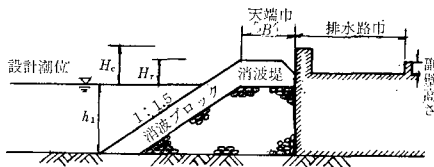


図-3 消波堤断面図



クを1列だけにすると、消波効果をあまり期待できない。過去6年間の現地における経験と実験結果によると、天端には消波ブロックを2.5~3.0列並べるのが適当であると考えられる。

排水路^{3), 4), 5)}は許容越波量、その飛散距離などから決定されなければならない。越波をゆるす量として水塊が飛び込む量(相対越波量で $q_i/q_0=10^{-3}\sim 5\times 10^{-3}$)とすると、設計波浪が $H_p\leq 6.0\text{ m}$, $T_p=6\sim 13\text{ sec}$ の範囲のときは、だいたい排水路幅は10~20 m、副壁の高さは1.5~2.0 mにとるのが適当である。

つぎに、護岸の天端高さ H_c と消波堤の天端高さ H_r は、港湾工事設計要覧では、消波ブロックを用いた場合には、

$$\frac{H_c}{H} = \frac{H_r}{H} = 1.0 \quad \text{または} \quad \frac{H_c}{H} + \frac{H_r}{H} = 2.0$$

としているが、この関係は、護岸前面の水深、波の特性、消波ブロック、許容越波量によって変化する。

許容越波量をいかにすべきかは、背後の経済性によって一律には決めることはむずかしいが、前論文¹⁾において、しぶきが入る場合、水塊が飛び込む場合、および波そのものが越波する場合にわけ、それらの場合に対する相対越波量 q_i/q_0 との関係求めた。その結果は表-1に示す。表-1より、許容越波量と相対越波量とのだいたいの値を知ることができる。

表-1 越波状況の分類

適否	分 類	越 波 状 況	相対越波量 q_i/q_0	
消波堤として適	Ⅰ	Ⅰ-1	しぶきが入る場合(消波効果良好)	$0\sim 10^{-4}$
		Ⅰ-2		
	Ⅱ	Ⅱ-1	水塊が飛び込む場合(消波限界)	$10^{-4}\sim 5\times 10^{-3}$
		Ⅱ-2		
消波堤として不適	Ⅲ	Ⅲ-1	パラベット天端を越流して波そのものが越波する場合(消波効果不完全)	$5\times 10^{-3}\sim 10^{-2}$
		Ⅲ-2		
	Ⅳ		激しくパラベットに衝突し、そのものが越流して多量に越波(消波無効)	$10^{-2}\sim 10^{-1}$

$$q_i/q_0 = f(h_1/H, h_1/L, H/L, H_c/H, H_r/H, p)$$

q_i : 単位幅当りの一周期間の越波量

q_0 : 単位幅当りの一周期間の移動水量 $q_0 = HL/2\pi$

h_1 : のり先水深

H : 一樣水深での波高

L : 一樣水深での波長

p : 消波ブロックの空げき率

よって、相対天端高さ (H_c/H , H_r/H) は、相対越波量、波の特性、消波堤のり先水深、消波ブロックによって決定することができる。

4. 実験方法

実験はFroude相似則を用いて、現地に対する縮尺は1/20で行なった。実験波浪は表-2のごとくで、侵入波の波形勾配、相対水深は図-4に示す。実験波の周期、波高は、風を送らない状態で護岸前面15~20 mの位置で測定した。

消波堤断面は2種類作った。消波用異形ブロックは3種類の中空N型ブロック(6.0 t)と中空三角錐ブロック(6.0 t)を用いた。中空N型ブロックは写真-1に示す。N₁型、N₂型、N₃型と高さが高くなっている。

N型ブロックの緒元は表-3に示す。天端幅B'はブ

表-2 実験波浪

周 期 T_m	波 高 H_m		
1.12 sec (5.0 sec)	10 cm (2.0 m)	15 cm (3.0 m)	
1.34 (6.0)	15 (3.0)	20 (4.0)	
1.79 (8.0)	15 (3.0)	20 (4.0)	25 (5.0)
2.24 (10.0)	15 (3.0)	20 (4.0)	25 (5.0)
2.91 (13.0)	20 (4.0)	25 (5.0)	

()内は現地

図-4 波浪特性

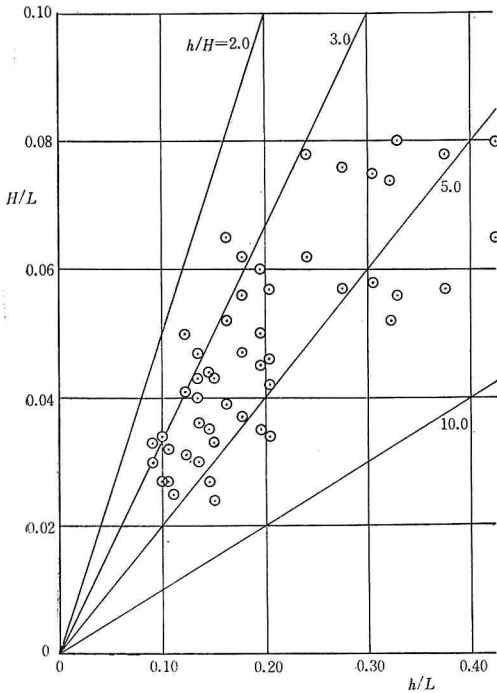


写真-1 中空 N 型ブロック

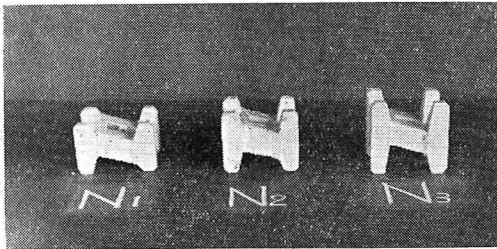


表-3 中空 N 型ブロックの諸元

ブロックの種類	重量 (t)	長さ L (m)	幅 S (m)	高さ H (m)	ブロックの支配面積 $L \times S$ (m^2)	ブロックの支配体積 $L \times S \times H$ (m^3)	体積 V (m^3)	2層の厚さ (m)	2層の空け率 (%)
N_1	6.0	2.206	1.765	1.324	3.894	5.155	2.610	2.50	53
N_2	6.0	2.060	1.648	1.648	3.395	5.598	2.609	3.00	55
N_3	6.0	2.060	1.648	1.936	3.395	6.573	2.609	3.50	61

ロックが 2.5~3.0 列並ぶように 7.5 m とした。

消波堤内の中詰捨石は平均径 $d_m=3.5$ cm (現地で 70 cm) 1 個の平均重量は 62.5 g (現地で 500 kg) の砕石を用いた。

消波ブロックの比較実験は、消波ブロックの層は常に 2 層として、消波堤ののり面と天端高さを一定に行なった。したがって層厚が厚い N_2 型、 N_3 型ブロックの場合には中詰の捨石の一部を取り除いて並べた。

表-4 実験消波堤断面の特性

	沖水深 h		のり先水深 h_1		消波堤天端高 (設計潮位上) H_r		パラペット天端高 (設計潮位上) H_c	
	cm	m	cm	m	cm	m	cm	m
A	62.0	(12.4)	43.0	(8.6)	10.0	(2.0)	20.0	(4.0)
B	62.0	(12.4)	43.0	(8.6)	10.0	(2.0)	35.0	(7.0)
C	72.0	(14.4)	53.0	(10.6)	0.0	(0.0)	10.0	(2.0)
D	72.0	(14.4)	53.0	(10.6)	0.0	(0.0)	20.0	(4.0)
E	72.0	(14.4)	53.0	(10.6)	0.0	(0.0)	35.0	(7.0)
F	72.0	(14.4)	53.0	(10.6)	20.0	(4.0)	20.0	(4.0)
G	72.0	(14.4)	53.0	(10.6)	20.0	(4.0)	30.0	(6.0)
H	72.0	(14.4)	53.0	(10.6)	20.0	(4.0)	40.0	(8.0)
I	82.0	(16.4)	63.0	(12.6)	10.0	(2.0)	10.0	(2.0)
J	82.0	(16.4)	63.0	(12.6)	10.0	(2.0)	20.0	(4.0)
K	82.0	(16.4)	63.0	(12.6)	10.0	(2.0)	30.0	(6.0)
L	82.0	(16.4)	63.0	(12.6)	10.0	(2.0)	35.0	(7.0)
M	87.0	(17.4)	63.0	(13.6)	5.0	(1.0)	15.0	(3.0)
N	87.0	(17.4)	68.6	(13.6)	5.0	(1.0)	30.0	(6.0)

() 内は現地の値

A~E は消波堤断面 I

F~N は消波堤断面 II

(断面 I, 断面 II いずれの場合も消波堤の天端幅、勾配は同じ。)

パラペットの高さは、高さ 5.0 cm と 10 cm の板を作りそれらを組み合わせて必要な護岸高さを作った。

実験を行なった消波堤断面と、のり先水深 h_1 、消波堤天端高 H_r 、パラペット天端高 H_c の組み合わせを表-4 に示す。

実験は、はじめ風速 $V_m=5.0 \sim 6.0$ m/sec の風を送り、一様な風波になってから、造波機によって規則波を起こして実験を行なった。

越波量の測定は、一様な越波が生じ、かつ造波板からの反射波の影響がない範囲内で、越波量の多い時には、2~5 波の平均、少ない時には 10 波平均を取り、同じ実験を 3 回くり返して、3 回の平均値を単位幅一周周期当りの越波量 q_i とした。

5. 実験結果とその考察

(1) のり先水深 h_1 の影響

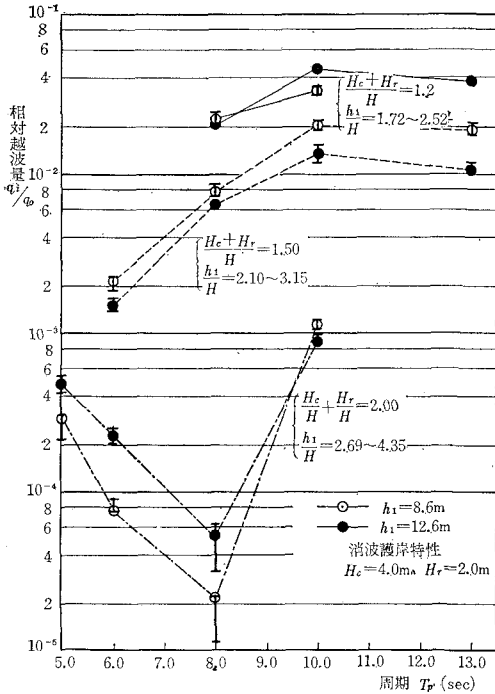
侵入波が消波堤に対してどの位置で砕けるかによって越波量はいちじるしく異なる。波の特性とのり先水深の関係からつぎの 3 つの領域に大別される¹⁾。

- ①消波堤ののり先よりかなり沖側で砕波して衝突する場合 (沖側砕波の領域)
- ②消波堤ののり先付近で砕波する場合、あるいは砕波直前の状態で衝突する場合 (のり先砕波の領域)
- ③消波堤ののり面上で砕ける場合 (のり面砕波の領域)

今回行なった実験は、のり先水深 ($h_1=8.0 \sim 13.6$ m) が深く、侵入波との関係は $h_1/H \geq 1.7$ であるので、侵入波はほとんど変形することなく消波堤ののり面に衝突して砕ける、のり面砕波の領域である。

図-5 は、消波護岸の特性 $(H_c + H_r)/H$ と、侵入波浪

図-5 のり先水深 h_1 の影響



特性 (T, H) を一定にし、水深 h_1 を 2 種類 ($h_1=8.6, 12.6$ m) に変化させて、相対越波量とのり先水深の関係を調べた実験結果を示す。図-5 によると、たとえば、周期 $T_p=10$ sec の場合 (相対水深 $h_1/L=0.123\sim0.145$)

$$\frac{H_c+H_r}{H}=2.00 \text{ の時}$$

$$\begin{cases} h_1/H=2.77 \text{ で } q_i/q_0=1.1 \times 10^{-3} \\ h_1/H=4.12 \text{ で } q_i/q_0=0.9 \times 10^{-3} \end{cases}$$

$$\frac{H_c+H_r}{H}=1.20 \text{ の時}$$

$$\begin{cases} h_1/H=1.72 \text{ で } q_i/q_0=3.1 \times 10^{-2} \\ h_1/H=2.52 \text{ で } q_i/q_0=4.5 \times 10^{-2} \end{cases}$$

すなわち、のり先水深と波高との比 h_1/H が 1.7 以上での面砕波の領域では、 h_1/H の値が相対越波量におよぼす影響は、消波護岸特性や侵入波浪特性に比較してわずかである。

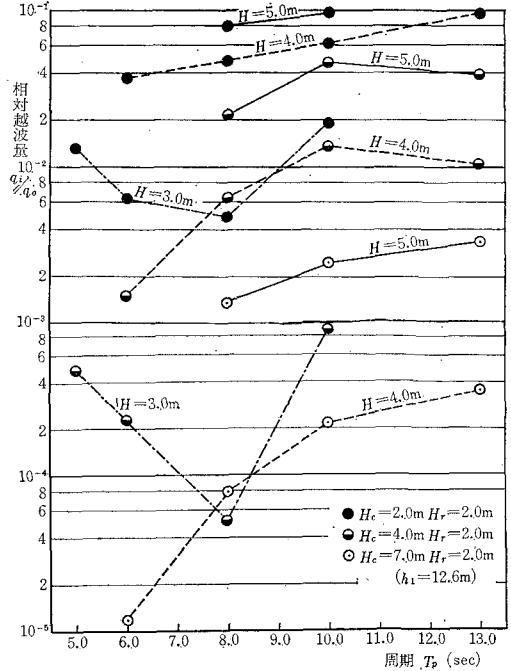
図-5 において、越波量が少ない場合に、バラツキがあるが、この範囲の越波はしぶき程度であるので、こうしたバラツキはある程度やむを得ないものである。

(2) 波の特性の影響

a) 波高の影響 図-6 は周期 T_p と q_i/q_0 の関係を波高 H をパラメーターとして示したものである。周期 $T_p=5\sim13$ sec の間では、波高 $H_p=3.0\sim5.0$ m と大きくなれば、相対越波量は増大する。すなわち、のり面砕波の領域では波高が大きくなれば、越波量は増すことを示している。

b) 周期 T の影響 図-6 によれば、 $H=4.0$ m,

図-6 波の特性の影響



5.0 m の場合には、周期が長くなると、相対越波量は増加する傾向がある。 $H=3.0$ m の場合には、周期 $T_p=8.0$ sec あたりで極小値をとる。この理由は、周期が 8.0 sec より短い波では、波形勾配が大きくなるから、消波堤に激しく衝突して、多量のしぶきが風で舞上り風によって堤内に押しやられるからである。

(3) 空げき率 p の影響

図-7 は中空 N 型ブロック (N_1 型, N_2 型, N_3 型) を

使い、空げきの形状を一定にし、空げき率を 3 種類に変化させ、 $h_1=12.6$ m, $H_r=2.0$ m, $H_c=4.0$ m の場合の実験結果を示す。この図より、同じ形状のブロックであると、空げき率の大きいほど、その消波能力が大きく、その割合は、波高が小さいほど、また周期が短いほど顕著である。

つぎにブロック形状と空げき率の異なる中空三角錐

図-7 空げき率 p の影響

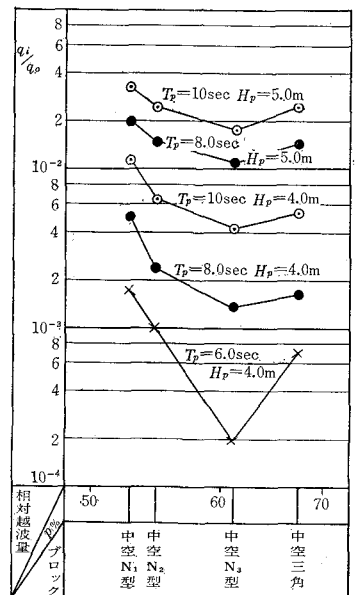
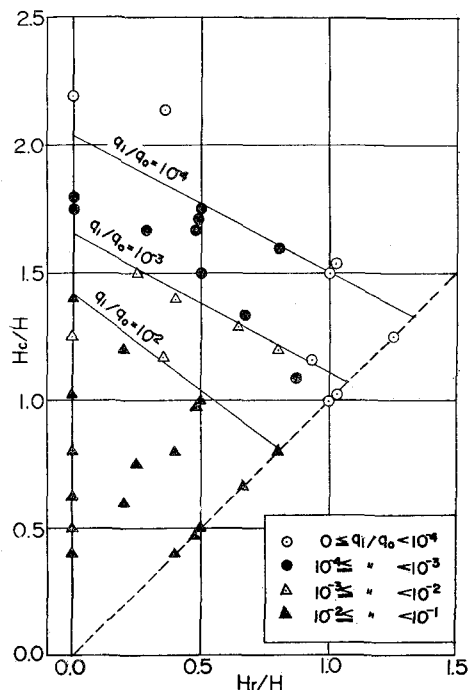
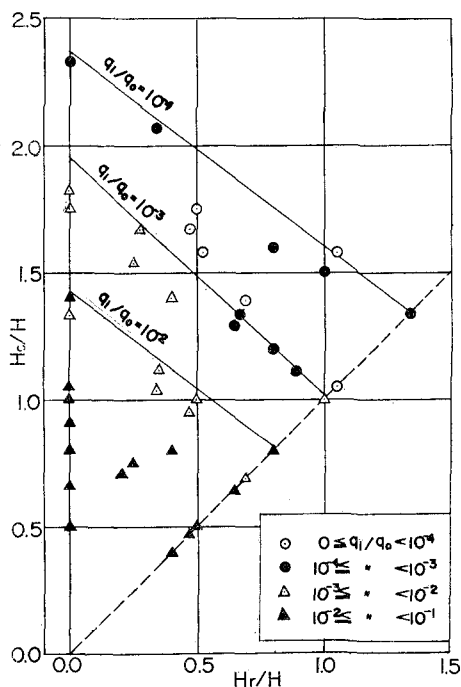
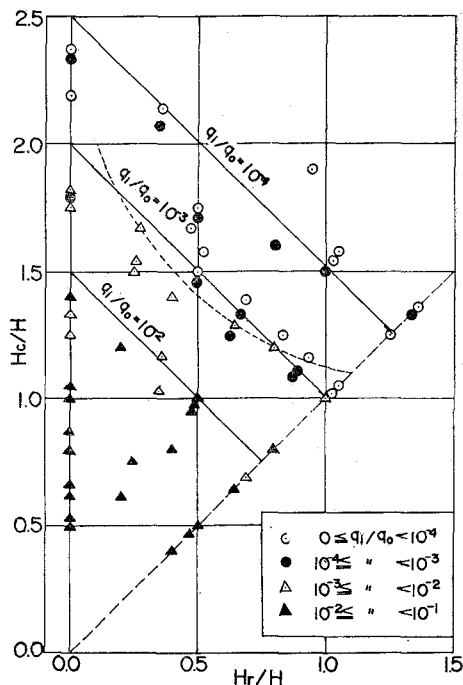


図-8 H_c/H と H_r/H との関係 (中空 N_1 型ブロック)(a) $h/L=0.090\sim0.16$ (b) $h/L=0.160\sim0.450$ (c) $h/L=0.90\sim0.450$ 

消波能力に影響することを示している。

(4) H_c/H と H_r/H の影響

図-8 (a), (b), (c) は消波ブロックとして中空 N_1 型ブロック ($p=53\%$) を用いた場合で、それぞれ相対水深 $h/L=0.090\sim0.160$, $h/L=0.160\sim0.450$, $h/L=0.090\sim0.450$ の領域について、相対越波量 q_i/q_0 をパラメーターとして H_c/H と H_r/H の関係を示したものである。

●印, △印, ▲印の上限は、相対越波量 q_i/q_0 が、 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} を示している。

図-8 (a) と (b) を比較すると、 $H_r/H < 0.5$ では図 (b) のほうが、 $H_r/H \geq 0.5$ では図 (a) の領域のほうが相対越波量が多い。すなわち、図 (b) の場合には $H_r/H < 0.5$ では、波が消波堤のり肩や護岸に激しくぶつかり、高く飛沫を上げるから H_c/H が大きくなる。これに反し $H_r/H \geq 0.5$ では、越波は護岸前面の水位上昇により左右されるので、移動水量の多い図 (a) のほうが越波量が多くなる。しかしながら図-8 (a) と (b) との差はあまり大きいものではないので、両図を一緒にしたものが図-8 (c) である。

図 (c) より相対越波量と H_c/H , H_r/H との間にはつぎの関係が成り立っていることがわかる。

$$\frac{H_c}{H} + \frac{H_r}{H} = C$$

表-5 中空 N_1 型を用いた場合の定数 C

相対越波量	10^{-4}	10^{-3}	5×10^{-3}	10^{-2}
定数 C	2.5	2.0	1.75	1.6

ブロック (6.0 t) を用いて、同じ実験を行なった。その結果によると、中空三角錐は、 N_1 型より空げき率が大きい、越波量は少なくならず、 N_2 型にはほぼ等しい。このことは、消波ブロックの空げきの配置および形状も

図-8(c)中の破線で示した曲線は、前論文¹⁾における。海底勾配 $i=1/40$ 、前面水深 $h_1<6.6$ m、のり面碎波領域で相対越波量 $q_i/q_0=10^{-3}$ を示す。この曲線は今回の実験から得た $q_i/q_0=10^{-3}$ の直線とほぼ一致している。このことはのり面碎波の領域では、のり先水深はあまり影響しないことを示す。

図-9 H_c/H と H_r/H との関係 (中空 N_3 型ブロック)
 $h_1/L=0.090\sim0.450$

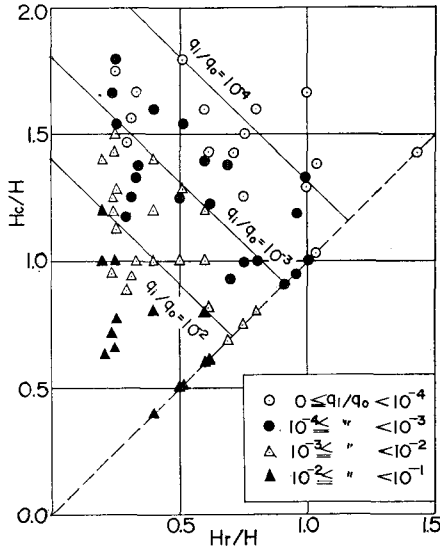


図-9は、中空 N_3 型ブロック ($p=61\%$) を用いた場合、図-8(c)と同じようにして、 H_r/H と H_c/H との関係を示したものである。相対越波量との関係は表-6のごとくである。

表-6 中空 N_3 型を用いた場合の定数 C

相対越波量	10^{-4}	10^{-3}	5×10^{-3}	10^{-2}
定数 C	2.3	1.8	1.55	1.4

図-9および表-6によると、港湾工事設計要覧で示している $C=2.0$ は、中空 N_3 型ブロックを用いた場合、しぶきが入る程度 ($q_i/q_0=0\sim5 \times 10^{-4}$) の天端高さを示していることがわかる。定数 C を表-5、表-6を比較すると、中空 N_3 型を用いた場合、越波量は N_2 型を用いた場合の約 $1/2$ に減少することがわかる。

6. 結 論

実験の結果を要約すると

- (1) のり先水深と設計波高との比 (h_1/H) が 1.7 以上の場合には、侵入波は消波堤のり面で碎け、越波量に対してのり先水深の影響はない。
- (2) 防波護岸の設計潮位上の天端高さ H_r と消波堤の設計潮位上の天端高さ H_c と設計波高 H との間には、つぎの関係がある。

$$\frac{H_c}{H} + \frac{H_r}{H} = C$$

定数 C の値は、許容越波量と消波ブロックの特性によってきまる。

- (3) 中空 N 型ブロックを改良した、 N_3 型ブロックはその安定性において優れているのみならず、その消波効果も他のブロックに比して特に優れていることが証明された。

参 考 文 献

- 1) 永井・高田：海岸堤防の越波におよぼす消波堤の効果，第 11 回海岸工学講演会，1964.11.
- 2) 永井・玉井・上田・高田：新しい消波用コンクリートブロックに関する研究，第 8 回海岸工学講演会，1961.9.
- 3) 白石・遠藤：消波工に関する二、三の問題，第 10 回海岸工学講演会，1963.10.
- 4) 永井：和歌山北港埋立地岸の越波に関する模型実験（未発表）1964 年 4 月.
- 5) 永井・稲垣：芦屋海岸埋立地の防波護岸に関する報告書，1965 年 2 月.