

# 港湾技術資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

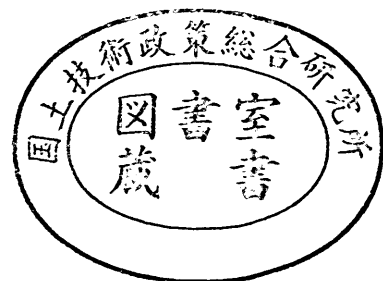
No. 242

Sept. 1976

不規則波による低天端型護岸の越波特性実験

合 田 良 実  
岸 良 安 治

運輸省港湾技術研究所



# 不規則波による低天端型護岸の越波特性実験

## 目 次

要 旨 .....	3
1. ま え が き .....	3
2. 実験条件および実験方法 .....	3
2.1 対象とした現地条件および護岸形状 .....	3
2.2 実験装置および実験方法 .....	6
2.3 実験に用いた不規則波の性質 .....	6
3. 階段護岸の越波特性 .....	8
4. 消波工拡幅による天端高低減効果 .....	9
5. 離岸堤の設置位置による護岸の越波特性の変化 .....	10
6. パラペット後退による天端高低減効果 .....	15
7. 縦スリット式ケーソン護岸の越波特性 .....	17
8. 低天端型護岸の適用性に関する考察 .....	19
9. あ と が き .....	22
参 考 文 献 .....	22
主要記号表 .....	24
付表-1～6 模型護岸の越波流量データ .....	25

## Experiments on Irregular Wave Overtopping Characteristics of Seawalls of Low Crest Types

Yoshimi GODA \*  
Yasuharu KISHIRA \*\*

### Synopsis

Five types of seawalls with low crests were tested for overtopping characteristics with irregular waves equivalent to  $H_0' = 5.8\text{m}$  and  $T_{1/3} = 10$  sec (model scale of 1/33.3). The ratios of crest heights of tested seawalls to those of upright seawalls which yield the same rate of overtopping at respective conditions were obtained from the measured relations between crest heights and overtopping rates. The test conditions for five types of seawalls were not necessarily the same.

According to the tests, the seawall with a stepped slope located at the shoreline requires a crest higher than that of upright seawall by 10 to 20% but lower than that of smooth slope. The crest height of seawall covered with a mound of artificial concrete blocks can be reduced with the increase in crest width; it can be about 40 to 50% of that of upright seawall by placing four rows of blocks at the lower layer of crest. Installment of a permeable breakwater in the offshore of an upright seawall reduces the latter's crest height to the level of that of normal block mound seawall (two rows of blocks at crest); the degree of reduction depends on the size and location of breakwater. The crest height of upright seawall can also be lowered by receding its parapet from the front position; at the distance of four times the wave height, the crest height can be 60% of normal upright seawall. The seawall constructed with a vertical slit caisson having the optimum opening ratio of about 20% in the front and more than 40% in the top may have the crest height equivalent to that of normal block mound seawall.

---

\* Chief of the Wave Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

\*\* Ex-member of the Wave Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

# 不規則波による低天端型護岸の越波特性実験

合 田 良 実\*  
岸 良 安 治\*\*

## 要 旨

低天端型護岸として5種類の型式を取り上げ、現地換算  $H_0 = 5.8 \text{ m}$ ,  $T_{1/3} = 1.0 \text{ sec}$  (模型縮尺  $1/33.3$ ) の不規則波を用いて、各護岸の天端高と越波流量の関係を求めた。この結果は、同一条件の直立護岸の所要天端高に対する所要天端高比として取りまとめられた。ただし、各護岸の実験条件は必しも共通ではない。

実験結果によれば、汀線近傍の階段護岸の所要天端高は直立護岸よりも10~20%高くなるが、滑斜面よりは低い。消波護岸では天端幅を広げるにつれて所要天端高が低減し、下層ブロック4列並びでは直立護岸の40~50%の天端高とすることができる。透過性の離岸堤を併置した直立護岸の天端高は、離岸堤の位置および諸元にもよるが、通常の消波護岸よりもやや低くすることが可能である。直立護岸においてパラベットを後へ下げると、後退距離に応じて所要天端高が低減し、波高の4倍の距離で約60%の天端高となる。直立消波構造としての縦スリット式ケーソン護岸では、最適開口比(前面20%程度、上面40%以上)の場合、所要天端高が通常の消波護岸と同程度となる。

## 1. ま え が き

護岸や海岸堤防は国土を高潮や高波から守るために建設され、毎年多額の費用が投じられている。以前に比べて大規模な海岸災害が最近少ないのは、多年にわたる高潮対策事業がその効果を発揮してきたものであろう。それとともに、一方においては高潮対策施設に対する要請が質的に変化してきた。現在では、高潮防護の機能だけではなく、環境や景観面への配慮が要請されるようになってきている。このため、護岸の計画においても天端をできるだけ低く抑えながら所要の越波防止機能を保持するものが要望される。<sup>1)</sup>

低天端型の護岸構造として最初に用いられたものは、直立壁の前面に消波工を投入した型式のものであり、昭和43年発刊の港湾構造物設計基準<sup>2)</sup>においては、消波工の天端高および天端幅が十分な場合にはパラベットの天端高を直立護岸の場合の70%にまで低減させてよいと述べられている。しかし、それでも設置水深が設計波高よりも大きい場所では、パラベットの天端が設計高潮位に設計波高の1.05倍を加えた高さとなり、相当高いものとなる。このため、さらに天端高を低減させる方法について種々検討されている。

本資料は、こうした低天端型護岸構造として現在考えられているものを5種類選び、許容越波流量の観点から

所要天端高の低減率を実験的に検討したものである。既往の諸実験とは異なり、不規則波を用いて平均越波流量を測定しているため、より現実に近い結果を与えているものと考えられる。

実験で取り扱ったのは構造型式ごとに限られた条件のものなので一般的な結論を下すことはできないけれども、現在試みられている程度の構造を単独で用いるのでは、条件の良いときでも天端高を設計波高の0.7倍程度以下にすることはむずかしいようである。低天端型構造の2種以上の組合せ、あるいは新しい構造様式の発明などによって、さらに所要天端高の低い護岸構造を開発する必要がある。

なお、この実験は運輸省 港湾局防災課からの要請による越波実験の一つであって、先に報告した直立および消波護岸の実験結果<sup>3)</sup>(以下においては前報と称する)を補足するものである。

## 2. 実験条件および実験方法

### 2.1 対象とした現地条件および護岸形状

#### (1) 波浪条件

現地の設計波は風波が主であるので、本実験では沖波波形勾配が0.04程度の波を対象とし、造波装置その他の関係から有義波高15cm級の波を用いることにした。

模型縮尺を1/33.3として実験で計測した波の諸元

\* 海洋水理部 波浪研究室長  
\*\* 前海洋水理部 波浪研究室

を現地に換算すると、次のようである。

$$H'_0 = 5.8 \text{ m}, T'_{1/10} = 1.0 \text{ sec}$$

$$H'_0 / L_0 = 0.037$$

なおこの波は、前報のS型スペクトルの波である。

## (2) 護岸の形状および諸元

低天端型護岸として検討した形状ならびに実験にあたっての主要検討項目は次のとおりである。なお、寸法諸元は模型縮尺1/33.3としての現地換算値示してある。

### 1) 階段護岸 (図-1)

これは低天端型というよりも、海浜レクリエーションなどの関連において見直されているものである。したがって、設計水深も浅いと考えられるので、実験では設計高潮時に堤脚水深が0となるものを対象とした。ただし、実験装置の関係および現地において基準となる地点が直立壁の基部と考えられることなどから、階段護岸の設置水深としては直立壁の基部における値を用いている。

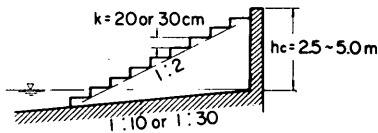


図-1 階段護岸の形状

階段の形状は、1段の高さを20および30cm (模型6および9mm)、法勾配を1:2とした。また、比較のために1:2勾配の滑斜面および直立壁についても実験した。

海底勾配は1/10および1/30を対象とした。

### 2) 消波工拡幅型護岸 (写真-1)

前報では天端幅がブロック2列並び(下層)を対象としたが、今回は範囲を広げて1, 2, 3, および4列並びについて実験した。法勾配は1:4/3, ブロックは砕石マウンド上の2層の整積みであり、法先の根固工は設けていない。消波工の天端高はパラベットの頂部より0.1H<sub>0</sub>程度低い高さを標準とし、各天端高ごとに積み直した。



写真-1 消波護岸の模型(天端ブロック4列並び)

設置水深としては、消波工の使用実績およびその特性からいって比較的浅い場所で拡幅型が検討されるのではないかと考え、水深を1.7および5.0mとした(模型水深5および15cm)。海底勾配は1/10と1/30であるが、1/30については水深5.0mのみを対象とした。

消波ブロックには現地換算重量9.3t(水深1.7m用)および17.8t(水深5.0m用)のテトラポットを用いた。模型重量は250および480gである。

### 3) 離岸堤併置護岸 (図-2, 写真-2)

最近では養浜あるいは堆砂効果を目的とした離岸堤の検討がいろいろ進められているが、ここでは高潮対策施設として波浪減殺効果の点について検討する。この場合、消波護岸と併置されることもあるけれども、本実験では低天端構造の第1歩として岸側に直立護岸を設ける場合を対象とした。海底勾配は比較的ゆるやかな場合として1/30を考え、直立壁を水深5.0mに設置した。

実験にあたっては、直立壁からの距離による越波量の変化、すなわち離岸堤の最適設置位置の有無を調べるため、離岸堤中心線と直立壁との距離を16.7~66.7m(模型距離50~200cm)に変化させた。これは波長の(0.25~0.9)倍に相当する。

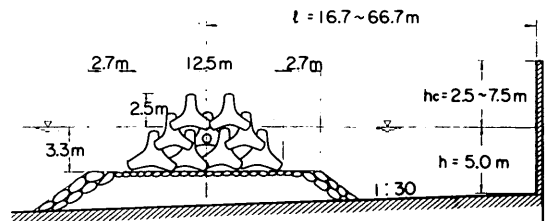


図-2 離岸堤の形状



写真-2 離岸堤の模型

離岸堤は現地換算 17.8 t のブロック 3 段積み (下層 4 列) で天端部はブロック 2 列並び、天端高はブロックの最上面で +2.5 m (≒ 0.4  $H_0$ ) とし、設置水深の差は砕石マウンドで調整した。また、設置場所ごとに砕石マウンドの定木を作り、ブロックの天端高ができるだけ同一になるように注意した。

4) バラベット後退型護岸 (図-3)

直立護岸については、越波量を減少させる目的でバラベットを後退させ、そこに水叩きを設ける場合が考えられる。この場合の問題点はバラベットを引き下げる距離であり、今回は 5, 10, 15, 25, 35, および 50 m について検討した。バラベット

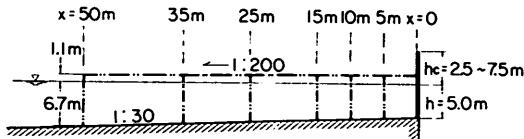


図-3 バラベット後退型護岸の配置状況

後退型護岸は水深がかなり深い場所での低天端型構造として検討される場合も多いけれども、今回は  $h = 5.2 \sim 6.7$  m を対象とした。前面水深が一定でないのは、越波量測定装置の取付けの関係でバラベットを固定する必要があり、このためその前に可変長の棚を設けて所要の後退距離を得るようにしたことによるものである。棚の先端部の天端高は +1.1 m (0.2  $H_0$ ) とし、棚の天端面は排水のために 1/200 の勾配を付けた。

5) 縦スリット式ケーソン護岸 (図-4, 写真-3)

最近は岸壁などに消波機能を兼ね備えた直立消波構造が採択される例があり、その機能から考えて越波減少効果もあると思われるので、直立消波構造の基本形の一つとして縦スリット式ケーソンについて検討した。実験では、スリットの間隔の影響を調べる目的でこれを  $s_1 = 0.33 \sim 1.0$  m で変化させた。また、天端面にもスリットを設け、この幅を  $s_1$  よりも 0.5 m だけ広く取った。なお支柱は幅 2.0 m とし、波力を減少させる目的で断面形が駒形 (五角形) のものを用いた。

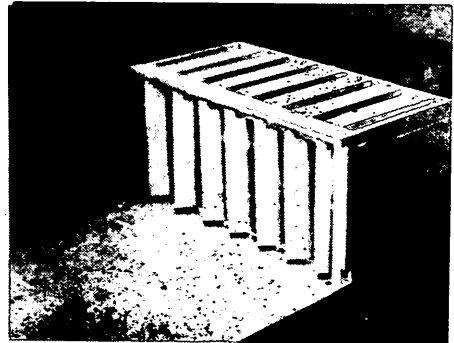


写真-3 縦スリット式ケーソンの模型

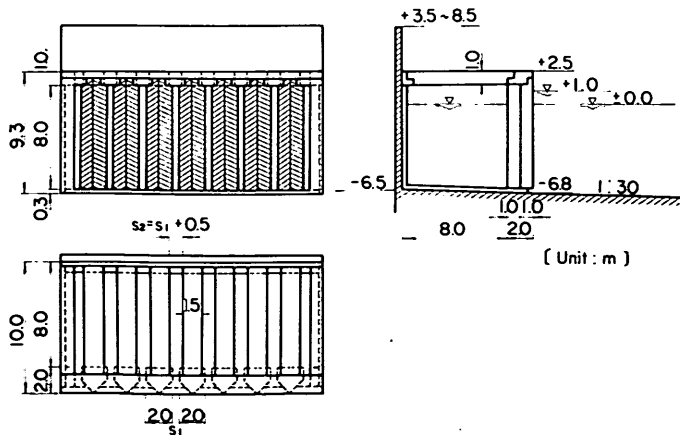


図-4 縦スリット式ケーソン護岸の形状

設置水深としては、前報で検討した最大水深である  $h = 7.5 \text{ m}$  を対象とした。ただし、ケーソン天端高の影響を見るため水位を  $1.0 \text{ m}$  変化させたので、各部の高さは図-4 ようになった。この模型ケーソンは、木製斜面上 (勾配  $1/30$ ) に直接設置した。

実験にあたっては、以上の護岸の模型のほか、直立壁についても同一条件で越波量を測定した、実験ケースは付表-1 ~ 6 に示すとおりで、全 121 ケースである。

なお、海底地形は水深約  $20 \text{ m}$  (模型  $5.71 \sim 5.93 \text{ cm}$ ) の一様水深部から勾配  $1/10$  で  $10 \text{ m}$  (模型  $30 \text{ cm}$ ) 立ち上り、それから岸側を勾配  $1/10$  または  $1/30$  とした。

## 2.2 実験装置および実験方法

実験は当所大型水工実験場内に仮設したブロック積み水路において、前報と全く同一の装置・方法で実施した。すなわち、あらかじめデータレコーダに収録しておいた造波信号波形 (3 種類) を用いて不規則波を発生させ、同一実験ごとに連続約  $200$  波の測定を 3 回繰り返した。

越波量は導水路を介して箱に受け、重量測定を行なって算出した。この結果は模型幅 ( $60 \text{ cm}$ ) および計測時間で割って単位幅当りの越波流量を算出し、3 回測定の結果について平均した。

越波測定の際は、同時に沖側の隣接した 2 点 ( $\Delta l = 20 \text{ cm}$  間隔) での波形を測定した。この波形データから FFT 法による分離計算によって反射率を推定し、2 測点の有義波高の平均値と反射率に基づいて、実験中の入射波高を推定した。そして、測定地点の浅水係数を用いて深水波高  $H_0$  に換算した。また、離岸堤その他については護岸の前面波形も測定した。

模型斜面の配置および造波板から模型護岸までの距離は前報のとおりである。

なお、不規則波実験では長周期成分波が斜面と造波板の間で多重反射を行なって増幅され、現地よりもサーフビートの影響が強調される。このため、越波データの解析にあたっては前報と同様に水深の補正を行なうことにした。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} h' &= h + \Delta h \\ h_c' &= h_c - \Delta h \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 $h'$  および  $h_c'$  は補正水深および補正天端高である。補正量  $\Delta h$  は勾配  $1/10$  の水深  $0$  については  $\Delta h = 2.0 \text{ cm}$ 、それ以外はすべて  $\Delta h = 1.5 \text{ cm}$  とした。

## 2.3 実験に用いた不規則波の性質

### (1) 波高および周期

実験に用いた入射波の諸元は表-1 のとおりである。ただし、波高は浅水係数を用いて沖波に換算した値である。なお、以下においてはすべて実験値および模型寸法で記述する。

表-1 入射波の波高および周期\*

種 別	波高 $H_{1/2}$ (cm)	周期 $T_{1/2}$ (sec)
検 定 時	$17.51 \pm 0.94$	$1.736 \pm 0.052$
模 型 時	$17.56 \pm 0.81$	$1.773 \pm 0.057$

検定は実験中に計 3 回行ない、うち 2 回は木製の模型斜面を取り除いた状態で測定したが、消波装置の下端が急勾配であったため約  $20\%$  の波の反射があった。もう 1 回は、斜面設置時に模型の前にテトラポットを大量に投入して反射率を約  $18\%$  に下げて測定した。このため、検定時にも入・反射波の分離計算を行なって入射波を推定した。表-1 の数値はこの結果である。

また、模型設置時の波も分離計算による推定値である。今回の実験では反射率が最大のものが約  $60\%$  であり、平均が  $30\%$  程度であったので、分離計算による入射波高の推定の誤差は小さい。検定時と模型設置時とで波の諸元がほとんど同じなのは、反射率が小さかったことによると思われる。

もともと、前報と比べると造波信号としてデータレコーダに収録しておいた同一波形のものを使用したのにもかかわらず、波高が約  $11\%$ 、周期が約  $4\%$  大きくなっている。特に、波高は約 5 ヶ月の実験期間 (10 月 ~ 3 月) の後半において大き目の傾向が見られた。こうした波高の変化が何に原因するものかは現在のところ不明である。ただし、今回の実験に限って言えば越波流量の測定値その他はすべて波高を基準値として無次元量に換算して整理しているので、波高の絶対値の影響はほとんどないと考えられる。

### (2) 波のスペクトルおよび波形の非線型性

水深約  $5.8 \text{ cm}$  の一様水深部における入射波のスペクトルは図-5 のようであった。これは、平均  $132$  波の波形記録 9 本のスペクトル計算結果の平均値である。目標とした Bretschneider・光易型スペクトルに比べて、

\*表-1 を初めとして、本資料における  $A \pm B$  の形の数値は [平均値  $\pm$  標準偏差値] を表わしている。

ピークの低周波側がややふくらんでいることと、 $f = 0.1 \sim 0.15$  Hz にかんがりのエネルギーが存在すること（サーフビート）が異なっている。ピークが小さく二つに割れているのは、造波信号の発生に用いたバンドパスフィルターの影響と思われる。また、ピーク周波数の2倍、3倍周波数の所に小さなこぶが見られるのは波の非線型干渉によるものである。

波形の非線型性を skewness（歪度）および kurtosis（尖鋭度）の値で調べてみると次のとおりであり、あまり強いものではない。

$$\left. \begin{aligned} \text{skewness} : \sqrt{\beta_1} &= 0.3222 \pm 0.082 \\ \text{kurtosis} : \beta_2 &= 3.061 \pm 0.164 \end{aligned} \right\} (2)$$

### (3) 波高および周期の分布

3回の波の検定の各3種類の波形記録から、波高と周期の総ひん度分布を求めた結果が図-6である。各記録に含まれる波数の総合計は1191波である。波高分布はレーリー分布に比べて  $H/\bar{H} = 0.75 \sim 1.50$  の範囲の波がやや多く、その補償として  $H/\bar{H} < 0.75$  および  $H/\bar{H} > 2.0$  の波がやや少なくなっている。各記録について代表波高間の比率を求めた結果は次のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} H_{\max}/H_{1/2} &= 1.545 \pm 0.112 \\ H_{1/10}/H_{1/2} &= 1.230 \pm 0.022 \\ H_{1/3}/\bar{H} &= 1.547 \pm 0.034 \end{aligned} \right\} (3)$$

これらの数値はいずれもレーリー分布の理論値に比べて小さ目であり、波高の分布幅がやや狭いことに対応している。

周期の分布は  $T^2$  についてレーリー分布をあてはめた Bretschneider の分布式に近いけれども、 $T/\bar{T} <$

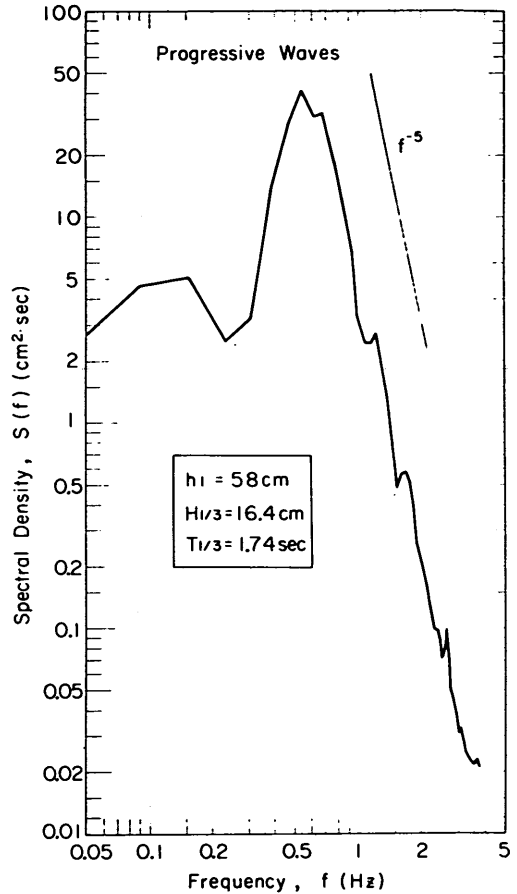


図-5 実験に用いた入射波のスペクトル

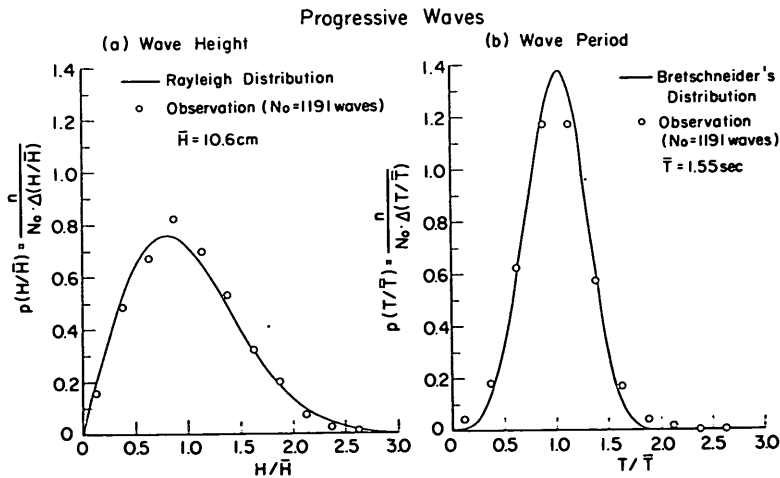


図-6 入射波の波高・周期のひん度分布



0.5および $T/\bar{T} > 1.5$ の範囲の波がやや多く、Bretschneiderの分布よりも分布幅が広い。なお、代表波の周期の比率は次のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} T_{1/10}/T_{1/3} &= 0.999 \pm 0.059 \\ T_{1/3}/\bar{T} &= 1.121 \pm 0.032 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

また、個々の波の波高と周期の相関係数は次のような値であった。

$$r(H, T) = 0.443 \pm 0.048 \quad (5)$$

### 3. 階段護岸の越波特性

越波流量の測定結果を $\sqrt{2gH_0^3}$ で割って無次元化し、相対天端高 $hc/H_0$ に対してプロットしたのが図-7である。越波流量 $q$ は3回の測定の平均値であり、水深 $h'$

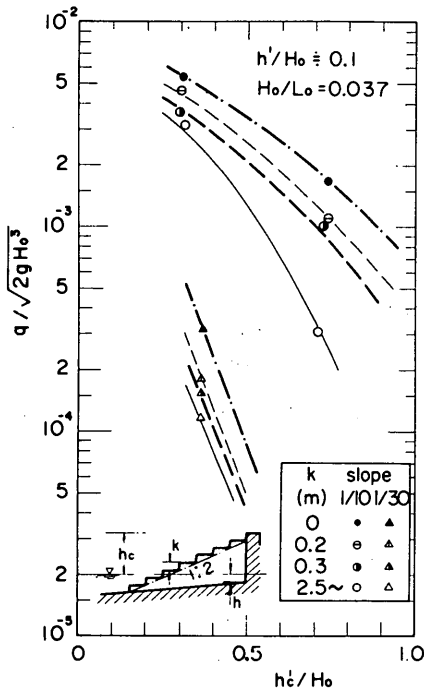


図-7 階段護岸の無次元越波流量と相対天端高の関係

および天端高 $hc$ は式(1)による補正を行なった値である。図-7には海底勾配1/10のデータを丸印、1/30のデータを三角印で示しており、直立壁に比べて階段の段高が現地換算で30, 20, および0cm(滑面)となるにつれて越波流量が増加する様子がうかがわれる。このうち、直立壁のデータは前報でとりまとめた越波流量推定図表の値とほぼ一致しており、図中の各曲線

は前報の曲線を参考にして描いてある。なお、図-7には示していないが、堤高5.0mの直立壁の上部1.3mを45°前傾させた直線波返し工とした場合(図-8)には、越波流量が約1/4に減少した。また、段高30cm

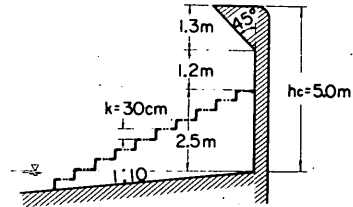


図-8 波返し工の形状

の階段護岸(堤高5.0m)の上部1.3mを同様に直線波返し工とした場合には、越波流量が約1/8に減少し、単純な直立壁の場合よりも少なくなった(付表-1, 2参照)。

汀線近傍の護岸の越波流量が護岸の形状によって変化することは、規則波によるSavilleの実験<sup>4), 5)</sup>でも認められており、越波流量は滑斜面, 階段護岸, 直立壁, 曲面波返し工の順に減少する。ただし、階段(段高1フィート)の効果は今回の不規則波の実験よりも少ない。これに対して、汀線における波のうちあげ高に関しては滑斜面と直立壁とであまり差がないことが、Saville<sup>6)</sup>および豊島・首藤・橋本<sup>7), 8)</sup>の実験結果からうかがわれる。越波流量とうちあげ高とで護岸の形状の影響が異なることは興味深い。護岸を許容越波流量の観点で計画する立場からは、護岸の形状効果を重視すべきであろう。

図-7のデータから、越波流量の同一値を与える天端高を読みとり、直立壁の場合を基準として所要天端高の

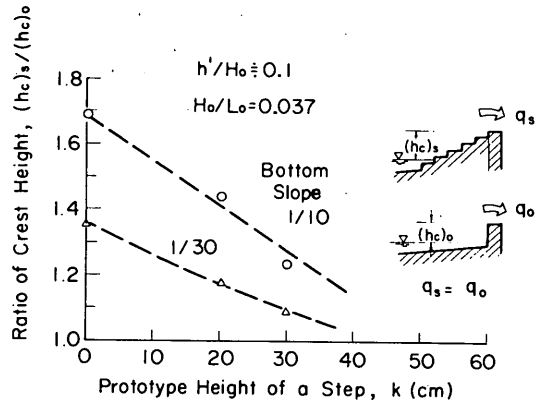


図-9 階段の段高による所要天端高比の変化

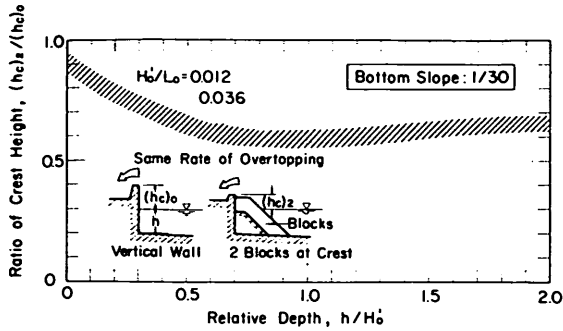


図-10 消波護岸(ブロック2列並び)と直立護岸の所要天端高の比率-海底勾配1/30-

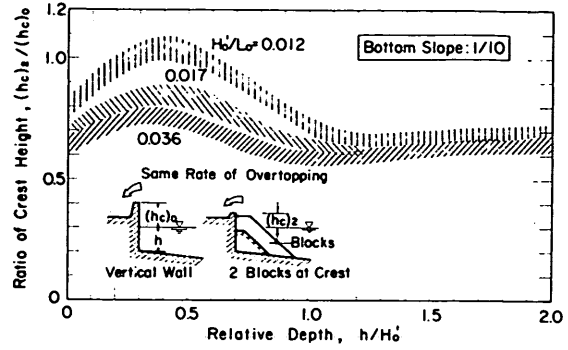


図-11 消波護岸(ブロック2列並び)と直立護岸の所要天端高の比率-海底勾配1/10-

比率を求めた結果が図-9である。越波流量としては、海底勾配1/30の場合が  $q/\sqrt{2gH_0^3} = 1.5 \times 10^{-4}$ 、1/10の場合が  $q/\sqrt{2gH_0^3} = 3 \times 10^{-3}$  および  $1 \times 10^{-3}$  についての平均である。この図-9によれば、法勾配1:2の滑斜面は直立壁の1.4~1.7倍の天端高が必要であるが、斜面に1段の高さが30cm程度の階段を設けることによって、所要天端高の増大率を1.1~1.2倍に抑え得ることが分る。また、滑斜面を基準にして考えれば、段高約30cmの階段状にすることによって、所要天端高を約80%に低減できることになる。この低減率は、オランダで風洞水路で行なった不規則波のうちあげ高の実験結果<sup>9)</sup>と同じである。

結局、汀線近傍の護岸であっても傾斜壁の場合には天端を高くする必要があるが、これを階段状にすることによって直立壁の所要天端高に近づけることができるということになる。

4. 消波工拡幅による天端高低減効果

前報においては直立護岸と消波護岸(天端部ブロック2列並び)の越波流量推定図表を比較し、海底勾配が1/30の場所で波形勾配が  $H_0/L_0 = 0.036$  の波が作用する場合には、消波工の設置によって所要天端高を60~70%に低減できることを例示した。これを他の条件についても比較したのが図-10, 11である。海底勾配1/30の場合(図-10)には波形勾配の影響が

見られず、基準とする越波流量の絶対値によるデータの広がりの中に隠れてしまう。これに対して海底勾配1/10の場合(図-11)には、波形勾配の低いものほど所要天端高が高くなり、特に  $h/H_0' < 1$  の浅水部ではこの影響が著しい。また、 $h/H_0' = 0.4$  の近傍では消波工がその効果を十分に発揮せず、 $H_0'/L_0 = 0.012$  のうねり性の波では消波工の設置によってかえって天端高を高くする必要が生じたりする。

今回の実験で天端部分の消波ブロックを1列から4列まで変えて越波流量を求めた結果を無次元表示した1例が図-12である。これは海底勾配1/30、水深  $h' = 16.5$  cmの場合で、直立壁およびブロック2列並びの

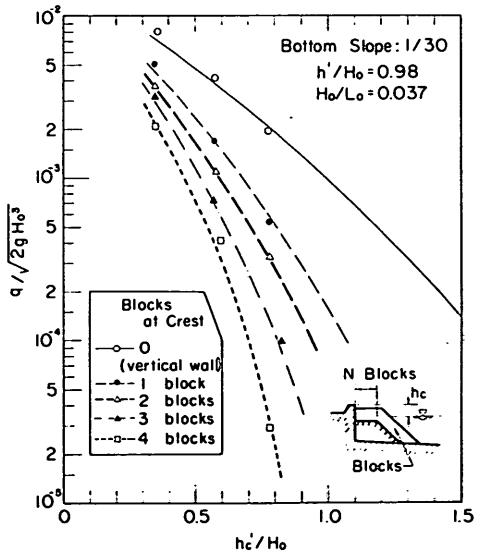


図-12 消波工拡幅型護岸の無次元越波流量と相対天端高の関係

消波工のデータは、前報の図表の値にほとんど一致している。海底勾配1/10の場合も、 $h'/H_0 = 0.37$ の消波護岸の越波流量が約2倍大きかったのを除けば、前報の図表の値と良く一致した。

そこで、前報の図表に基づいて描いた曲線を参考にし、各条件ごとに $q/\sqrt{2gH_0^3}$ と $h_c/H_0$ の関係曲線を描いた。そして、越波流量の同一値に対する天端高を読みとり、所要天端高の比を求めた結果が図-13である。

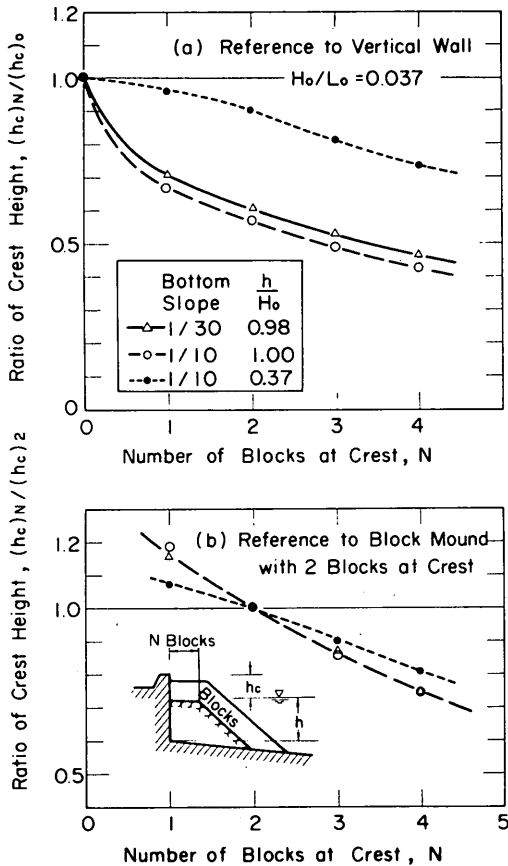


図-13 消波工の天端幅による所要天端高比の変化

る。無次元越波流量としては $2 \times 10^{-3}$ および $2 \times 10^{-4}$  ( $H_0 = 5\text{ m}$ とすると $q = 0.1$ および $0.01\text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$ に相当)について読みとったが、差が微小であったので平均を用いている。図の(a)および(b)は、それぞれ直立壁および消波工天端ブロック2列並びを基準とした所要天端高比とブロック並び数との関係を示している。なお、ブロック並び数は2層積みの中の下層のブロックの数

を指していることに注意されたい。

図-13(a)によると、設置水深が $h/H_0 \approx 1.0$ の場合には海底勾配の影響がほとんどなく、消波工の天端幅を広げるにつれて所要天端高が一樣に減少することが明らかである。図-10, 11を参照すると、 $h/H_0 \approx 1$ は消波工の効果が最も発揮されやすい箇所であり、これから沖側では僅かながら消波工の効果が減少する。また、 $h/H_0 \geq 1$ では海底勾配1/10の場合も含め、波形勾配の影響が小さい。したがって、 $h/H_0 \geq 1$ の箇所(海底勾配1/30では $h/H_0 \geq 0.5$ )では、消波工の天端幅をブロック並び数で1, 2, 3, および4列とすることによって、所要天端高を直立壁の場合の70~80%, 60~70%, 50~60%, および45%~55%にそれぞれ低減できるものと思われる。

しかし、図-13の黒丸で示されるように、海底勾配が急であってしかも $h \approx 0.4 H_0$ の場合には消波工幅の効果が少なく、天端幅をブロック4列並びとしてもまだ直立壁の約73%の天端高が必要である。この条件における実験値は、前報の値よりも大き目であり、所要天端高比も図-10の値よりも大きくなっている。この理由は良く分らないが、この付近では実験条件の僅かの差で越波流量が微妙に影響されるのかも知れない。いずれにしても、海底勾配が急で水深が浅い箇所では、消波工の効果について模型実験により慎重に検討する必要があるものと思われる。

なお、消波工幅による天端高の低減効果を具体的に検討するためには、前報で発表した消波護岸の越波流量推定図表を基準値に使用し、これを図-13(b)で補正するのが便利である。すなわち、 $h/H_0 \geq 1$ の箇所では、天端高比がブロック並び数3列で85%, 4列で75%となり、急勾配の浅水部では同じく90%および80%となる。

## 5. 離岸堤の設置位置による護岸の越波特性の変化

### (1) 離岸堤による天端高低減効果

直立護岸の前方に消波ブロック積みの離岸堤を設置した場合の越波流量の測定結果を無次元量で表示すると、図-14のようになる。離岸距離(模型で $l = 50 \sim 200\text{ cm}$ )は、平均水深に対する波長 $L$  ( $T_{1/3}$ に対する値)に対する比で表わしてある。

測定結果によると、データは $l/L = 0.4 \sim 0.8$ のグループ、 $l/L = 1.0 \sim 1.2$ のグループ、および $l/L = 1.55$ のデータと3グループに分れており、各グループ内の差は僅少である。また、図-14には前報の越波流量図表で推定した直立護岸および消波護岸(ブロック2列並び)の場合の関係曲線を細実線および細1点鎖線

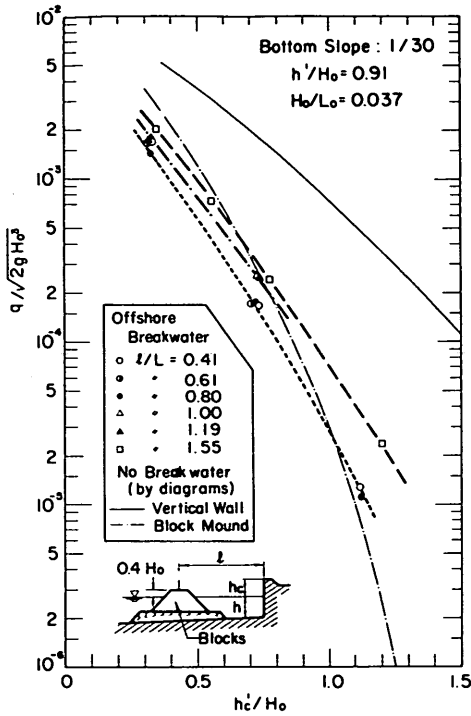


図-14 離岸堤設置護岸の無次元越波流量と相対天端高の関係

で示してある。これらと比べると、離岸堤は天端が低い（約  $0.4 H_0$ ）にもかかわらず越波を減少させるのに有効に機能しており、消波工を直立壁の前面に設置する場合よりも良く働いている。もっとも、護岸の天端を高くして越波量を大幅に減少させる場合には、今回実験した離岸堤では天端高が不足であり、直立壁の前面に消波工を十分高く積んだ場合よりも越波量が多くなるのは止むを得ない。

図-14から、無次元越波流量が  $q / \sqrt{2g} H_0^3 = 10^{-3}$  および  $10^{-4}$  ( $H_0 = 5 \text{ m}$  としてそれぞれ  $0.05$  および  $0.005 \text{ m}^3 / \text{m} \cdot \text{sec}$  相当) の所の相対天端高を読みとり、直立護岸の所要天端高に対する比率を求めた結果が図-15である。前報の消波護岸の越波流量推定図表による天端高比は  $l/L = 0$  の位置にプロットしてある。読み取りにあたっては測定値にできるだけ忠実に  $l/L$  との関係曲線を描いたけれども、 $l/L$  の値による各グループ内の越波流量の差が非常に小さいため、測定値の変動性やブロックの積み方の再現性などを考えると、この差がどれほど有意なものかについてはやや疑問が残る。

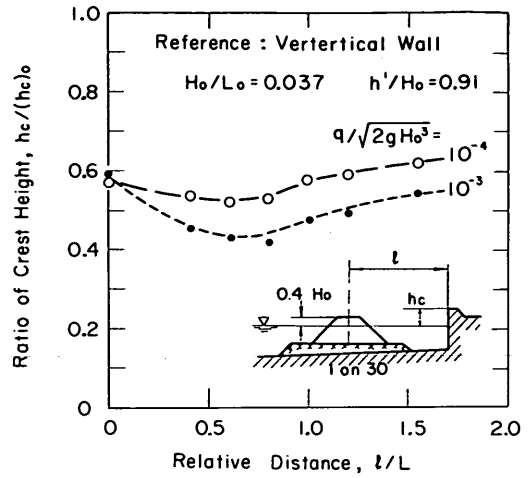


図-15 離岸堤の設置距離による所要天端高比の変化

それでも図-15によると、 $l/L = 0.5 \sim 0.8$  付近で護岸の所要天端高が最低となっており、このあたりが離岸堤の最適設置位置ではないかと思われる。なお、 $l/L$  がこれよりも大きくなるにつれて所要天端高が高くなるのは、離岸堤の設置水深がそれだけ深くなり、そこに作用する波群中に砕波前の波が多く含まれるようになって、伝達波が大きくなることが一因と思われる。また、無次元越波流量の値によって所要天端高の比率が異なるのは、前述のように離岸堤の天端高を約  $0.4 H_0$  と一定にしたためである。

離岸堤の設置位置の効果に関しては樫木・岩田・森永<sup>10)</sup>が検討している。これは、護岸前面の波高を離岸堤と護岸との間の多重反射として解析したもので、 $\Delta l/L = 0.25$  間隔で前面波高が極大・極小を繰り返すことを指摘している。ただし、これは一定周期の規則波の場合であって、不規則波についての実験結果（離岸堤として直立潜堤を使用したもの）では、こうした場所的变化が非常に小さくなっている。今回の実験ではブロック積み堤で反射率が低く、また堤幅が広がったため  $\Delta l/L = 0.25$  間隔の場所的変動がほとんど現われなかったものと思われる。

## (2) 離岸堤設置時の伝達波の特性

図-14, 15に見られるように、設置位置および形状が適切であれば離岸堤は護岸の天端高を低減させるのに効果的である。そこで、離岸堤による波の変化について若干調べてみた。まず、離岸堤だけを設置したときの伝達波を図-16のような配置で測定した。1/30勾配の斜面を汀線で打ち切ったのは、戻り流れの影響を少

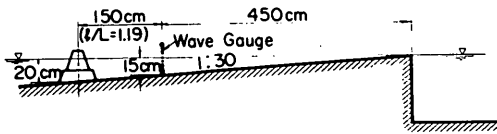


図-16 離岸堤伝達波の測定状況

なくするためである。測定は越波実験と同様に3回繰り返す、その結果を平均した。波形、波高および周期の統計量は表-2のとおりである。

表-2 離岸堤伝達波の統計量

波形	波高	周期
$\bar{\eta} = 1.6 \text{ cm}$	$H_{1/10} = 6.13 \text{ cm}$	$T_{1/10} = 1.895 \text{ sec}$
$\sqrt{\beta_1} = 1.518$	$H_{1/5} = 4.71 \text{ cm}$	$T_{1/5} = 1.502 \text{ sec}$
$\beta_2 = 6.28$	$\bar{H} = 2.90 \text{ cm}$	$\bar{T} = 1.217 \text{ sec}$

このとき沖側の波は  $H_0 = 17.6 \text{ cm}$ ,  $T_0 = 1.823 \text{ sec}$  であり、表-1の入射波の変動範囲に入っている。

この離岸堤伝達波の特徴は、まず波形の非線型性が著しいことである。試みに波形のひん度分布を描いてみると図-17の白丸のようになり、通常の不規則波が示す正規分布(細一点鎖線)と全く離れた分布形となる。この波形のひん度分布は離岸堤背後での平均水位の上昇後の高さを基準としており、表-2の  $\bar{\eta}$  の値を参照すれば分かるように、波形はほとんど静水位から上のみで変動している。

伝達波の第2の特徴は波高の大きい波ほど周期が長い傾向 ( $T_{1/10}/T_{1/5} = 1.26$ ) にあることで、通常の不規則波では見られない現象である。また、入射波の周期に比べて  $T_{1/5}$  および  $\bar{T}$  がかなり短くなっている。これらの特徴その他から判断すると、ブロック積み離岸堤の場合も伝達波の主体は越波によるもので、波高の大きな波のときに多量に越波して水位が上昇するとともに孤立波的な波が進行し、波高の小さな波のときには戻り流が卓越するとともに越波によって小さく割れた波が岸側に伝わるものと考えられる、なお、波高および周期のひん度分布は図-18のとおりである。  $H/\bar{H} = 0.75 \sim 1.0$  の

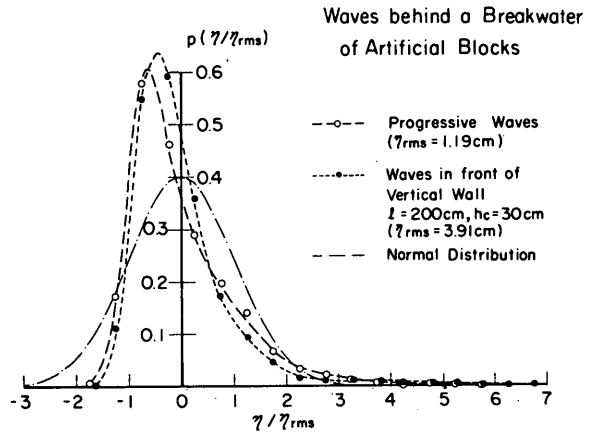


図-17 離岸堤伝達波の波形のひん度分布

波が少ないけれども、これが伝達波の特徴なのかどうかははこれだけの波数では判断できない。また、周期の分布では非常に長いものが多く現われている。

こうした非線型性の著しい波に対してスペクトルを求めることには問題があるけれども、一応、通常の波浪と

Waves behind a Breakwater of Artificial Blocks

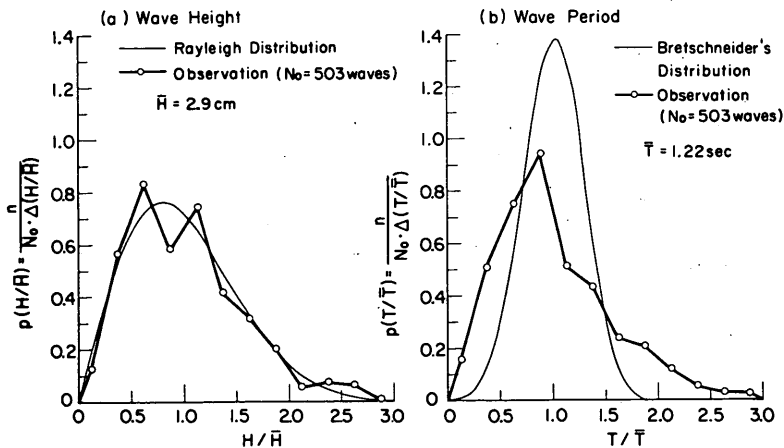


図-18 離岸堤伝達波の波高・周期のひん度分布

同様にスペクトルを求めたのが図-19である。参考のために図-5に示した沖波のスペクトルも載せてある。沖波が9本の波形記録の平均であるのに対し、伝達波は3本の波形記録の平均なのでスペクトルの凹凸がやや激しい感じがある。

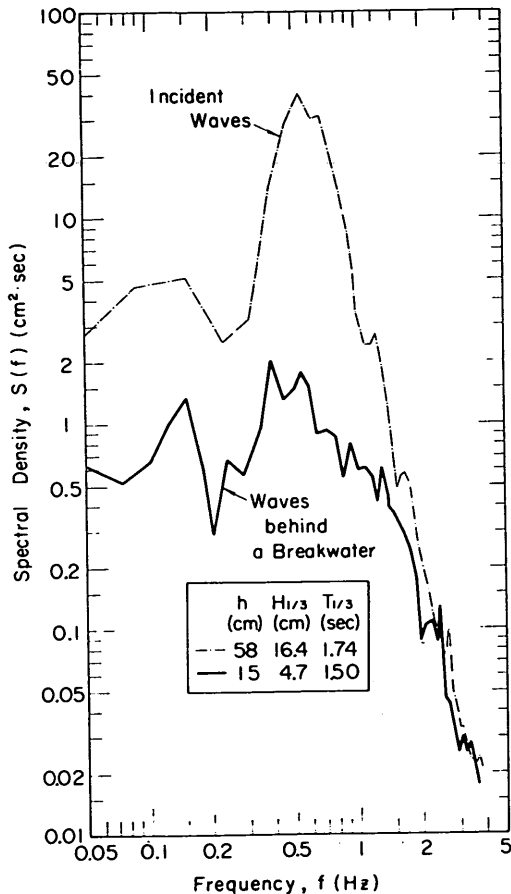


図-19 離岸堤伝達波のスペクトル

離岸堤による波の変形に関しては、富永・坂本<sup>11)</sup>が富山・新潟海岸で、片山・入江・川上<sup>12)</sup>が新潟海岸で現地観測を行なっている。これらの観測において求められた離岸堤によるスペクトルの減衰状況に比べて、図-19では伝達波の減衰がやや著しいように見える。その理由の一つは、今回の実験波の波形勾配が大きいことによるもので、一般に透過式離岸堤の波高伝達率は波形勾配と逆相関の関係にある。またもう一つの理由としては、今回の離岸堤が砕波帯内に位置しているために、実験波が

離岸堤に到達するまでにかなりの砕波変形を受けていることが挙げられる。先に著者の一人がとりまとめた不規則波の砕波変形の算定図表<sup>13)</sup>によれば、離岸堤の前では  $H_{1/3} = 1.4 \text{ cm}$  であったと推定され、 $H_{1/3}$  を基準とした波高伝達率は約 0.34 となる（沖波に対しては 0.27）、また、離岸堤にぶつかる波がかなり砕波状態であったことも、離岸堤による波の減衰を高めていると考えられる。もっとも、新潟海岸での現地観測<sup>12), 14)</sup>では水深 4 m 前後に設置されたテトラポット堤に  $H_0 = 1 \sim 2 \text{ m}$  の波が来襲したときの波高伝達率が 0.3~0.4 と報告されているので、ほぼ同程度の値といえる。

図-19のスペクトルでは、 $f < 0.2 \text{ Hz}$  の低周波部にもかなり強いエネルギーが認められる。これは不規則波に特有なサーフビートおよび越波量の時間的変化による水位変動を表わしている。ただし、模型斜面を図-16の形状にしたため低周波成分が十分に発現していない。本来ならば入射波と同じレベルの大きさになるものと考えられる。

### (3) 離岸堤設置時の直立壁前面の波の特性

次に、越波実験を行なった直立壁前面の波を調べると、まず波形の非線型性が一層はなはだしくなっている。図-17には離岸距離が  $l = 200 \text{ cm}$  で天端高を特別に  $h_c = 3.0 \text{ cm}$  としたときの直立壁前面の波形分布が黒丸で示されているが、正規分布からの偏差は進行波の場合よりも著しい。このときは skewness が  $\sqrt{\beta_1} = 2.54$ 、kurtosis が 1.297 であり、また  $\eta_{\max}/\eta_{\text{rms}}$  の上限値は 9.5 にまでも達している。

直立壁の存在によって進行波の状態と異なる第2の点は、平均水位が顕著に上昇することである。今回の実験では、波形の総平均値として平均水位を計算しているので数%程度の誤差があるものと推定されるけれども、計算結果では進行波の状態では  $\bar{\eta} = 1.6 \text{ cm}$  のものが直立壁設置時には  $\bar{\eta} = 4.0 \text{ cm}$  にもなっている。この上昇量は、直立壁の天端が低くて越波が多いとき ( $h_c = 7.5 \text{ cm}$ ) には  $\bar{\eta} = 3.0 \text{ cm}$  以下下るけれども、それでも進行波の状態よりも高い。離岸堤の設置位置の影響については、測定精度の不足で明らかにすることができなかった。

新潟海岸での観測<sup>12), 14)</sup>では、堤内で  $0.1 H_0$  程度の水位上昇が報告されている。この値は港内検潮所の水位を基準（静穏時に検定）としたものなので、一般の海浜に見られる砕波による水位上昇（wave setup）は含まれていないと考えられる。前報で述べたように、直立壁の前では離岸堤のないときにも約  $1.5 \text{ cm}$  の水位上昇があるので、離岸堤による上昇は約  $2.5 \text{ cm}$ 、すなわち約  $0.14 H_0$  となり、新潟海岸での観測値よりもやや大きい。この差は、新潟海岸では背後が砂浜あるいは消波護

岸となっているのに対し、実験では直立壁であることによるのではないと思われる。

第3点として、離岸堤背後の直立壁前面の波高が進行波の波高の3~4倍と非常に増幅されていることが挙げられる。しかもこの増幅率は $\bar{H}$ ,  $H_{1/3}$ ,  $H_{1/10}$ ,  $H_{max}$ の順に大きくなっている。直立壁のみの場合も波高が大きければ2倍以上に増幅されることがある。しかし、 $H_{1/3}/h \approx 0.3$ 程度の波高ではこうしたことがなく、進行波の2倍前後の波高を示す。離岸堤設置時に波高の増幅率が大きいのは、平均水位の上昇およびサーフビート現象が卓越することによって、離岸堤を大きく越える波が出現しやすくなるためではないかと推察される。また、離岸堤と直立壁との間の多重反射による増大も考えられる。ただし、今回の実験では離岸堤がブロック積みであるところからこの効果は小さいと判断される。これは前面波高の絶対値が離岸堤の位置によって変化せず、ほぼ一定であったことから裏付けられる。

なお、こうした波高の増大現象が存在することは、離岸堤設置時について伝達波の推定値と前報の越波流量図表との組み合わせで越波流量を推定する便法を不可能とする。今回のデータで試算すると、実験値の数十分の1以下の値しか求められない。したがって、離岸堤設置時の越波流量についてはその都度、模型実験によって推定する必要がある。

直立壁前面の波の第4の特徴としては、それほど強いものではないが、多重反射現象が認められることである。図-20はその1例であり、 $l = 200\text{ cm}$  ( $l/L = 1.55$ )、 $h_c = 30\text{ cm}$ の場合のスペクトルを示している。図には参考のために伝達波の波高が2倍になったものとして、図-19のスペクトル密度を4倍にしたものも描いてある。図-20で前面波形のスペクトル密度が極大を示す $f = 0.39, 0.68, \text{および} 0.94\text{ Hz}$ の周波数は、有効長 $l' = 190\text{ cm}$ 、平均水深 $21\text{ cm}$  ( $3\text{ cm}$ の水位上昇を付加)における多重反射の極大点、すなわち $l = L/2, L, \text{および} 3L/2$ の関係をほぼ満足している。ただし、このスペクトル密度の波打ちの振幅から見ると、多重反射に対する離岸堤の反射率は30%程度と推定される。こうした多重反射によるスペクトル密度の波打ちは他のケースでも認められ、極大点の周波数も計算値にはほぼ一致する。多重反射の考え方からすれば、入射波のスペクトルのピークが $l' = L/4$ の条件を満足するように離岸距離を選べば良いことになるが、こうした短い距離では堤内のサーフビートが激しくなり、前面波高は必ずしも減少しないと考えられる。

なお、スペクトルのうちの $f < 0.22\text{ Hz}$ の部分をサ

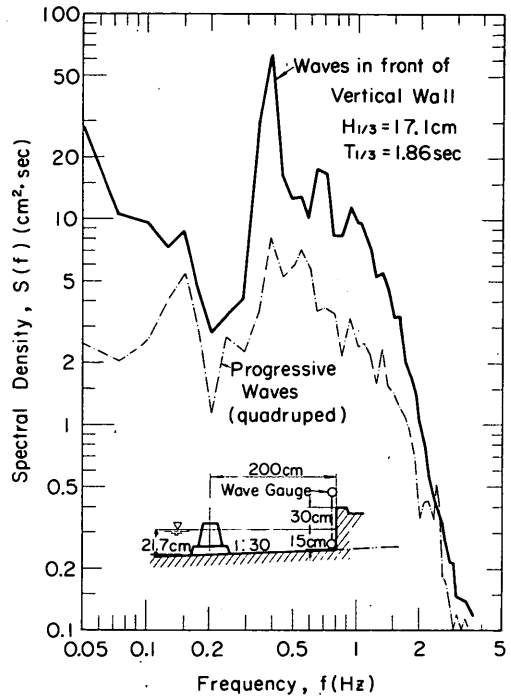


図-20 離岸堤設置時の護岸前面の波のスペクトル

ーフビートと見なしてその積分値からサーフビートの標準偏差値 $\zeta_{rms}$ を求めたところ、 $l/L = 0.4 \sim 0.6$ では $\zeta_{rms}/\eta_{rms} \approx 0.53$ のものが $l/L = 0.8$ では $\zeta_{rms}/\eta_{rms} \approx 0.46$ 、 $l/L \geq 1$ では $\zeta_{rms}/\eta_{rms} \approx 0.35$ となって、距離が伸びるにつれてサーフビートの振幅が減少していた ( $\eta_{rms}$ は約 $4.0\text{ cm}$ ではほぼ一定)。

最後に、離岸堤から沖側へ向けての反射率は付表-4に見られるように、 $l/L = 0.41$ のときの $K_R \approx 0.23$ から $l/L = 1.55$ のときの $K_R = 0.30$ まではほぼ一様に増加する。図-16の進行波の状態では $K_R = 0.30$ であったので、 $l/L = 1.55$ では進行波の値に戻っている。離岸距離の短いときに反射率が減少する理由としては、今回の実験では直立壁の設置位置を固定したので、距離を狭めるにつれて離岸堤が浅い場所に移り、碎波による減衰が激しくなっていたことがまず挙げられる。前報の $1/30$ 勾配斜面上での消波護岸の実験では、 $h = 22.5\text{ cm}$ のときに $K_R \approx 0.33$ 、 $h = 15.0\text{ cm}$ で $K_R \approx 0.27$ であって、水深の減少とともに反射率も低下している。もっとも、今回の反射率がこれよりも小さいのは、直立壁からの反射波との重畳および堤内における水位上昇によって離岸堤を通過する流れが増速され、エネ

ルギー逸散率が増大するためと考えられる。

結局、直立護岸とブロック積み離岸堤の組み合わせでは両者の距離の短い方がエネルギーの減衰が大きいが、その反面、離岸堤を越波した水塊による水面上昇および水面の動揺が大きくなるため、離岸堤を護岸にあまり接近させることは得策でなく、ある程度の距離を置く方がよい結果を生むのであろう。今回の実験では  $L/L = 0.5 \sim 0.8$  が最適距離のようであるが、これについてはさらに条件をいろいろに変えて実験を行ない、検討を加える必要があるものと思われる。

## 6. パラペット後退による天端高低減効果

### (1) パラペット後退時の越波特性

護岸のパラペットを後退させることによって背後地への越波を減少させ得ることは、二、三の模型実験によって明らかにされている。(15), (16), (17) 今回の実験は不規則波を用いてこれをやや系統的に調べたものであり、越波流量とパラペットの天端高の関係は図-21 のようになった。実験値はパラペットの後退距離ごとに分類してあ

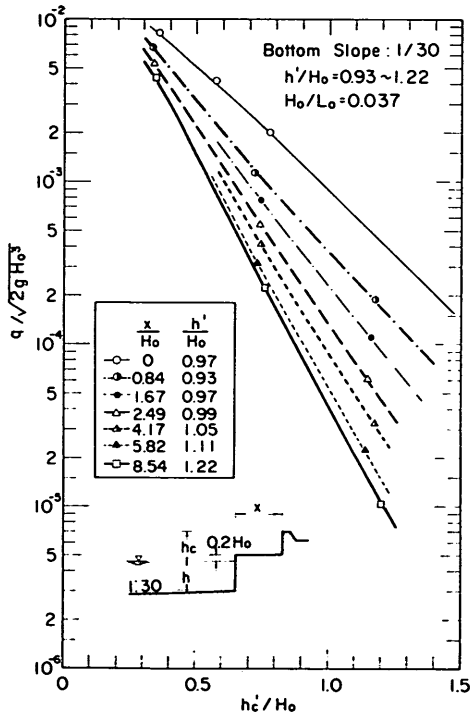


図-21 パラペット後退型護岸の無次元越波流量と相対天端高の関係

り、 $x/H_0$  が大きいほど越波流量が減少するのが明らかである。また、 $x = 0$  の直立壁の実験値は前報の図表

から推定した値とはほぼ一致しており、 $h'_c/H_0 > 0.8$  の部分は図表からの読取値に基づいて描いてある。

今回の実験では越波流量の測定装置の関係でパラペットの取付位置を固定したので、距離  $x$  が増すほど護岸の前面水深が大きくなっている。そこで、パラペットの後退距離ごとにその前面水深から  $h'/H_0$  を計算し、対応する直立壁の越波流量と天端高の関係曲線を前報の図表から読みとって、同一の越波流量に対する所要天端高の比率を求めた。越波流量としては  $q/\sqrt{2gH_0^3} = 10^{-3}$  および  $10^{-4}$  を基準としたが、所要天端高比は両者ともほとんど同じであった。この結果を相対後退距離  $x/H_0$  に対してプロットしたのが図-22 である。これから、 $x = 2H_0$  で直立壁の約 70%,  $x = 4H_0$  で

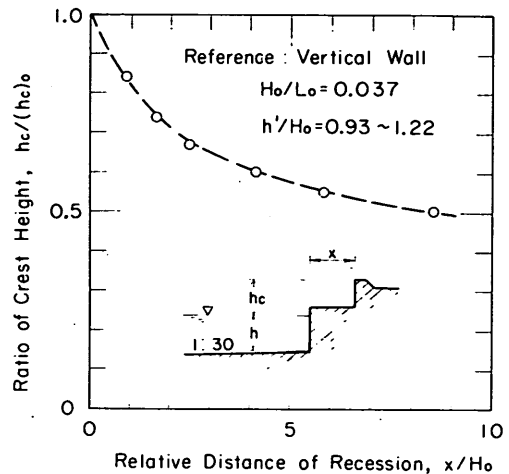


図-22 パラペット後退距離による所要天端高比の変化

約 60%,  $x = 8H_0$  で約 50% にそれぞれ所要天端高が低減されるのが分る。

なお、ここでは簡単のために後退距離  $x$  を沖波波高  $H_0$  で無次元化したけれども、岩礁上の波の変形現象<sup>18)</sup> から類推すれば、支配的パラメーターは  $x/T\sqrt{gH}$  と考えられる。ここで、 $L_0 = gT^2/2\pi$  の関係を使うと、

$$\frac{x}{T\sqrt{gH}} = \frac{x}{H_0} \left( \frac{H_0}{2\pi L_0} \right)^{1/2} \quad (6)$$

であるので、波形勾配の小さいうねりの場合は所要天端高比が図-22の値よりも大きくなると考えられる。

### (2) パラペット後退型護岸前面の波の特性

この型式の護岸前面の波の特徴は、まず波高の分布幅が非常に狭くなることである。後退距離が最大の  $x = 150\text{cm}$  ( $x/H_0 = 8.54$ ) の場合について波高および周期分布のひん度分布を求めた結果が図-23 であり、



Waves in front of Seawall with Receding Parapet

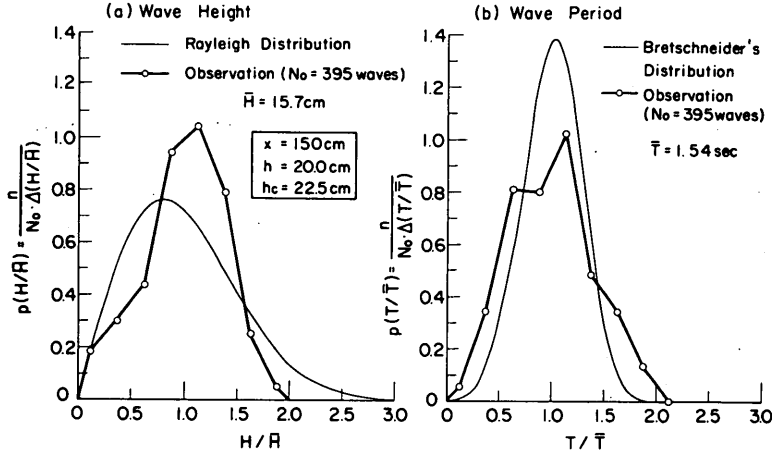


図-23 パラベット後退型護岸前面の波の波高・周期のひん度分布

$H/\bar{H}$  の最大値は 1.89 にとどまっている。これは、波高の大きな入射波ほど水叩きの上への乗り上げが著しいことによるものである。代表波高間の比率はパラベットの後退距離によってあまり変化しないので、 $h_c = 22.5$  cm の場合について全ケースを平均した結果は  $H_{1/10}/\bar{H}_{1/10}$  が 1.15,  $H_{1/3}/\bar{H}_{1/3}$  が 1.37 となり、式(3)の入射波の値よりも相当に小さい。

一方、周期については全般的に入射波よりも長目であり、特にパラベットの後退距離が短いものほど周期が長い傾向にある。 $h_c = 22.5$  cm の全ケースの平均では  $T_{1/3} = 2.00$  sec と入射波の約 1.3 倍増である。また、波高の大きい波の周期が長い傾向も強く、 $T_{1/10}/T_{1/3}$  の平均値が 1.11,  $T_{1/3}/\bar{T}$  の平均値が 1.26 となっている。

波形のひん度分布については、 $\eta_{max}/\eta_{rms} = 1.2 \sim 1.4$  と頭打ちになっているため、kurtosis の値が 2.4 ~ 3.1 となって正規分布の  $\beta_2 = 3$  よりも小さい。skewness は平均が 0.613 でやや大きい。これは浅水波の特徴として波の谷が浅くなる ( $\eta_{min}/\eta_{rms} \geq -2.0$ ) ことによるものである。

スペクトルは図-24のとおりであり、細一点鎖線で表示した直立壁の場合のスペクトル(前報のデータを転載)と比べて、高周波側のふくらみを除去したような形状である。ここに示したのは  $\alpha$  の最小値の場合であり、 $\alpha$  が大きいときは直立壁前面の波のスペクトルにやや近づく。直立壁の場合に高周波側にふくらみが現われるのは振幅の大きな重複波が形成されることによる非線型効果の一つと考えられる。パラベットを後退させると、波の山の部分が水叩きの上へ乗り上げることによって重複波の波頂の盛り上がり不十分となり、これが図-24のような非線型性の弱いスペクトルを生むことになるので

あろう。

なお、反射率は 0.35 ~ 0.45 であって、前面の水深が大きいほど高くなっている。直立壁の場合には、到達する過程での不規則波としての碎波減衰のために反射率が 1 よりも小さくなるが、それでも 0.6 ~ 0.7 の値を示す。パラベットを後退させることによって反射率が減少しているのは、戻り流れとなって水叩きから流下する際に、流れのエネルギーが渦損失として逸散されることが

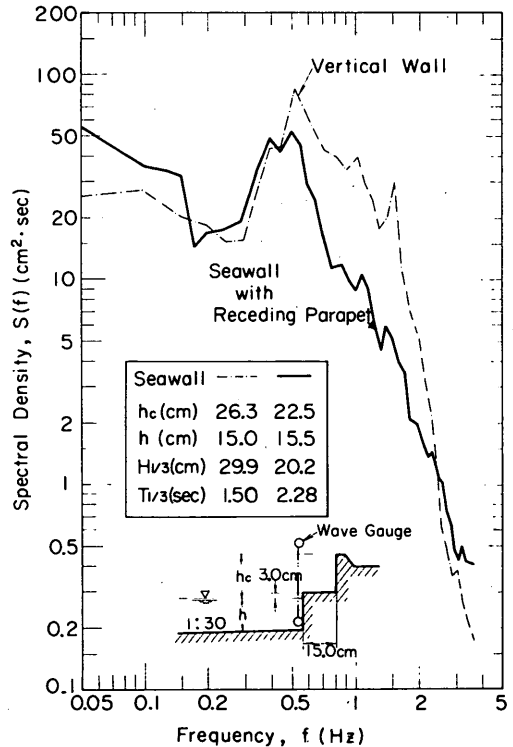


図-24 パラベット後退型護岸前面の波のスペクトル

主因と考えられる。反射率から概算すると、これによる逸散エネルギーは入射波のエネルギーの30%程度と見積られる。

結局、パラベット後退型護岸にあっては水叩きの上への乗り上げ効果によって波頂が低くなることで越波量を減少させる主要な要素であると考えられる。水叩き部分によるエネルギー逸散は反射率を減少させるけれども、越波に対しては直接には影響しないであろう。ただ、パラベット後退型護岸を実際に計画するにあたっては、後退距離が不十分であるとパラベットに働く波力が増大し、被災を招く可能性がある<sup>19), 20)</sup>ので、波力についても模型実験などで慎重に検討する必要がある。

### 7. 縦スリット式ケーソン護岸の越波特性

直立消波構造としての縦スリット式ケーソン護岸の特性は、まず前面スリットの開口比に影響される。今回の実験では、支柱の幅  $b_1 = 6\text{ cm}$  に対してスリット幅を  $s_1 = 1.0 \sim 3.0\text{ cm}$  の範囲で5種類に変化させて越波流量および反射率を測定している。越波流量については前報で作成した図表に基づいて同一水深・天端高の直立壁の場合の値  $q_0$  を推定し、これに対する比率  $q/q_0$  を計算した。この越波流量比を反射率とともに前面スリットの開口比  $s_1 / (s_1 + b_1)$  に対してプロットしたのが図-25である。ただし、前面水深としてはスリット前面の値を基準値としている。なお、天端部分には  $s_2 = s_1 + 1.5\text{ cm}$  のスリットを設けてある。

図-25によると、越波流量比  $q/q_0$  は相対天端高  $h'_c/H_0$  が大きくなるほど減少し、実験値では約1/8にまで下っている。ただし反射率は  $h'_c/H_0$  の値にあまり影響されない。図-25から、天端高によって若干の差はあるけれども、 $K_R$  および  $q/q_0$  は開口比が20%の付近で最小値を示しており、この付近が最適開口比と判断される。

次に、ケーソン天端部分のスリットの効果について検討した結果が図-26である。前面スリットの開口比は前述の結果に基づいて20% ( $s_1 = 1.5\text{ cm}, b_1 = 6.0\text{ cm}$ ) とし、天端面を全閉 ( $s_2 = 0$ )、40%開口 ( $s_2 = 3.0\text{ cm}, b_2 = 4.5\text{ cm}$ )、および全開 ( $s_2 = 6.0\text{ cm}$ ) とした場合について比較した。図で明らかなように、天端面を塞ぐことは消波機能を低下させ、反射率、越波流量を共に増大させる。消波の目的からいえば、天端面には何も設けず、全面開放とするのがよい。実際には構造体としての強度を保持するための梁が必要であり、この場合は面積比50%程度の開口部を設けることによって、消波機能をあまり低下させずに済むと思われる。

なお、天端面を塞いだ場合に消波機能が低下するのは、

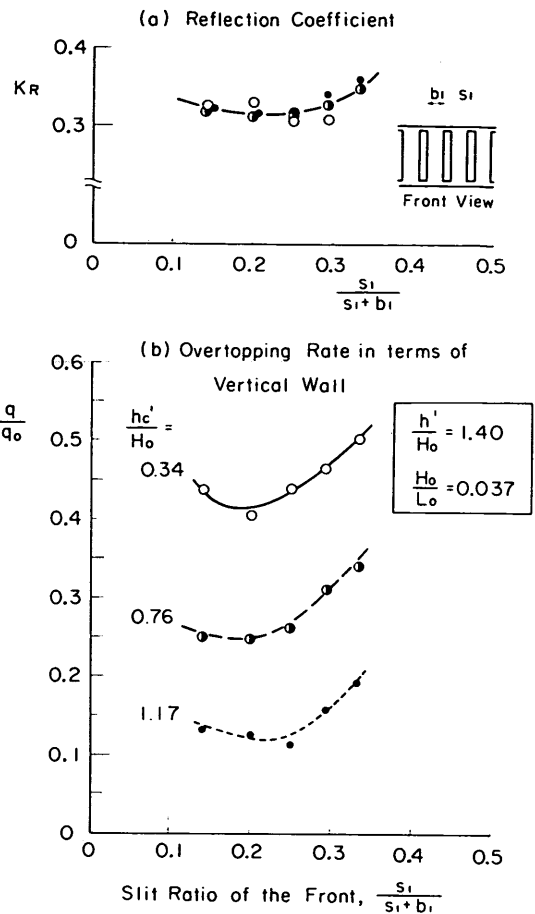


図-25 縦スリット式ケーソンの前面開口比による反射率および越波流量比の変化

今回の模型ケーソンの天端高が  $h_{ca}/H_0 = 0.25 \sim 0.42$  と低かったため、ケーソン内部の水面の上下運動が天端面で制約されて前面スリット部分の流速が弱くなり、このためエネルギー逸散率が低下したことによると思われる。

縦スリット式ケーソン護岸の無次元越波流量と相対天端高の関係は図-27のとおりである。この図は前面開口比40%の場合について、直立壁のデータと比較してプロットしたものである。実験では、図-4の断面図に示されるように水位を現地換算で1m変化させたので、二通りのデータが得られている。直立壁に対する曲線は前報の越波流量図表による推定値であり、今回の実験値はこの推定値とはほぼ一致している。ただし、 $h'/H_0$  の影響はあまり明瞭には現われていない。縦スリット式ケーソンの実験値の場合には、 $h'/H_0$  による差が直

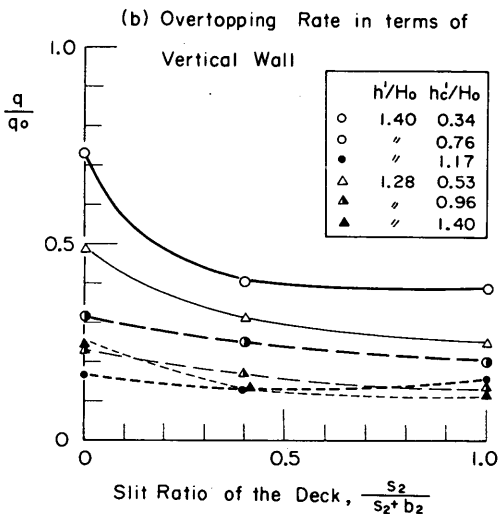
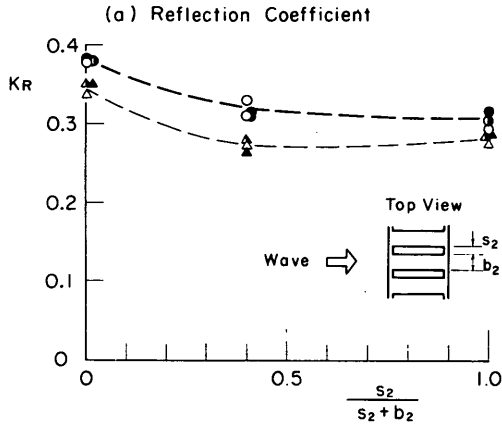


図-26 縦スリット式ケーソンの天端開口比による反射率および越波流量比の変化

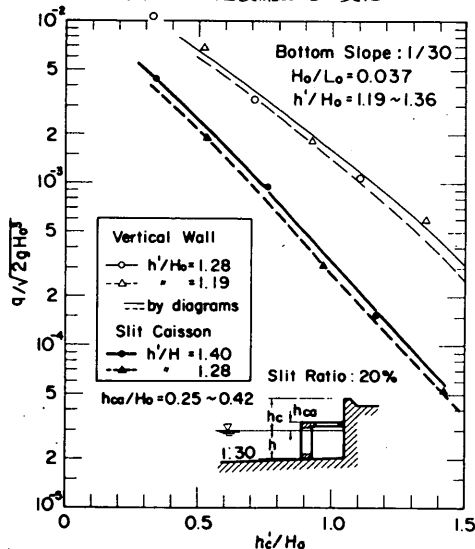


図-27 縦スリット式ケーソンの無次元越波流量と相対天端高の関係

立壁に対する推定値の場合と同程度に現われている。

図-27の結果から、無次元越波流量  $q/\sqrt{2gH_0^3}$  の種々の値に対する所要天端高を求め、直立壁の所要天端高に対する比率を算出した結果が図-28である。ただし、直立壁の所要天端高は今回の実験値ではなく、縦スリット式ケーソンと同一の  $h'/H_0$  のデータを前報の図表から読みとったものである。図-28には、天端ブロック2列並びの消波護岸の所要天端高も示してある。

縦スリット式ケーソンの天端高低減率は、越波流量の絶対値によって異なるのが特徴的である。すなわち、護岸の天端が比較的低くて越波量が多い場合には縦スリット式ケーソンを用いることによって、パラベットの天端高

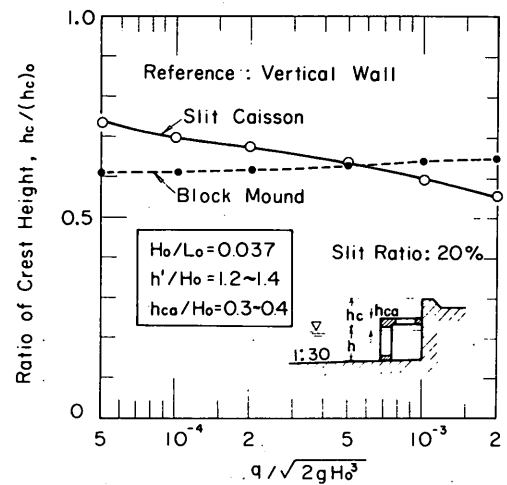


図-28 無次元越波流量の値による縦スリット式ケーソンおよび消波護岸の所要天端高比の変化

を直立壁の場合の60%以下にすることができる。しかし、護岸の天端が相当に高く越波量が少ない場合には、縦スリット式ケーソンを用いても直立壁の場合の70%前後の天端高を保つ必要がある。これに対して消波護岸の場合には、越波流量の絶対値が少ない方が相対的にやや低い天端高で済むという特性がある、このため、今回の実験条件では  $q/\sqrt{2gH_0^3} = 5 \times 10^{-3}$  において消波護岸と縦スリット式ケーソン護岸の天端高の関係が逆転する。

縦スリット式ケーソン前面の波の性質はパラベット後退型護岸の場合と類似しており、波の非線形性、波高比、周期などはほとんど同じ値である。すなわち、波の山の部分がケーソン内部に吸い込まれるために重複波の波頂の盛り上がりが見られず、波高分布では波高の大きな部分が欠除する。また、波高の大きい波は周期が長い傾向に

ある。波形について興味のある現象の一つは、ケーソン前面において平均水位の上昇がほとんど見られないことで、天端面開放時には $\bar{\eta} = 0.5 \text{ cm}$ 、天端スリット開口比40%で $\bar{\eta} = 0.6 \text{ cm}$ であった。しかし、天端面を密閉したときは $\bar{\eta} = 3.1 \text{ cm}$ と直立壁やパラベット後退型護岸よりも高くなった。

次に、前面波形のスペクトルを求めた結果の1例が図-29であり、前面開口比20%、天端面開口比40%の場合を示している。細一点鎖線で示した直立壁前面のスペクトル(前報のものを転載)と比べてみると、 $f = 0.5 \sim 1.5 \text{ Hz}$ の範囲ではほぼ一様に減衰している。ただし、図示はしていないが入射波が重複波を形成してスペクトル密度が単純に4倍になると考えたものと比べてみ

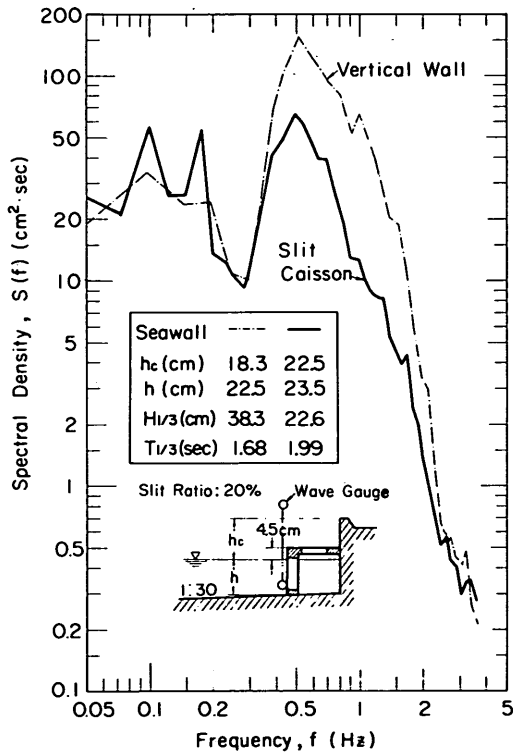


図-29 縦スリット式ケーソン護岸前面の波のスペクトル

ると、エネルギー減衰は $f = 0.4 \sim 1.0 \text{ Hz}$ の範囲に限られている。これは前報でも述べたように、直立壁の場合には非線型な重複波の形成によって $f \geq 0.8 \text{ Hz}$ の範囲のスペクトル密度が増大するのに対し、縦スリット式ケーソン護岸の場合には重複波の形成が不十分のためにこうしたスペクトル密度の増大が見られないことによる。

ケーソンの天端面を全面的に塞いだ場合には高周波側の減衰が少なく、部分的ではあるが非線型重複波の形成がうかがわれた。

いずれにしても、縦スリット式ケーソンによるエネルギー損失は狭いスリットを出入する噴流の速度水頭損失によるものであって、流速の絶対値に依存する非線型な現象と考えられる。ここでは参考のためにスペクトルを示したけれども、スリットによるエネルギー損失を周波数ごとに議論することは適当でないと思われる。

なお、図-25, 26に見られるように、縦スリット式ケーソンの反射率は今回の実験条件においては30%前後であった。これを周期、波高が有義波の諸元等に等しい規則波を用いて測定した結果もほぼ同じであり、波の不規則性の影響は特に認められなかった。ただし、規則波の反射率は不規則波の場合と同じ2点間の同時波形のフーリエ成分の解析によるもので、基本成分のみでなく高周波成分も含めたエネルギー的な反射率である。スリット式ケーソンを包含する直立消波構造体は、一般に波の反射の際に強い3倍周波数成分を発生するものであり(21)、今回の測定でもこれを検出することができた。反射率を通常のヒーリーの方法で求めたものとすると、反射率として上記よりも小さな値が得られたものと思われる。測定値として求められた30%の反射率は、前報で求めた同一条件の消波護岸の値と同じであり、越波流量あるいは所要天端高の低減率がほぼ同一であることに対応している。

また、スリットの支柱として駒形のものに代りに薄い平板を使ったところ、しぶきが多くなって波の当たり方が強くなったように観察されたけれども、反射率および越波流量ともに駒形支柱の場合とほとんど同じであり、支柱の形の影響は認められなかった。

### 8. 低天端型護岸の適用性に関する考察

前章までにおいては、データをすべて無次元越波流量、あるいは同一越波流量を与える直立護岸の天端高に対する所要天端高の比率という形で提示した。また、実験した各模型護岸の設置条件もさまざまであって、相互の比較あるいは条件の異なる現地への適用が困難である。そこで本章では、各種の低天端型護岸の特徴や応用に当たっての問題点をやや具体的に考察する。

護岸の所要天端高を決める上で最も重要な要素は、越波流量の許容値である。設計条件の高潮・波浪時において越波を全くさせないように設計できれば大慶である。しかし、波の不規則性を考えるとこれは一般には実現不可能に近く、若干の越波を受容せざるを得ない。なおオランダでは、慣習的に波群中の2%の波の越波を許容し

てきたとのことであるが<sup>9)</sup>、今後は越波流量の絶対値を考へる方向に進むようである。

前報でも述べたように許容越波流量に関しては今だ定説がなく、状況に応じて適宜判断されている。前報では海岸保全施設の計画において採択されることの多い  $q = 0.01 \text{ m}^3 / \text{m} \cdot \text{sec}$  を前提とし、かつ  $H_0' / L_0 = 0.036$  の風波を対象として直立護岸の所要天端高を試算した。図-30はその結果を再録したものである。海底勾配の影響は  $h / H_0' \leq 2.5$  で現われ、急になるほど高い天端

すと所要天端高が増大する。いいかえれば、護岸前面の砂浜が広くて高いほど越波が少ない。したがって、階段護岸の計画にあたっては砂浜の維持も含めて検討する必要がある、場合によっては移動床による模型実験も要請されよう。

## (2) 消波工拡幅型護岸について

前出の図-13で明らかなように、消波工の天端幅が広いほどパラベットの天端高を低くすることができる。水深がある程度大きい場合 ( $h \geq H_0'$ ) には、図-30

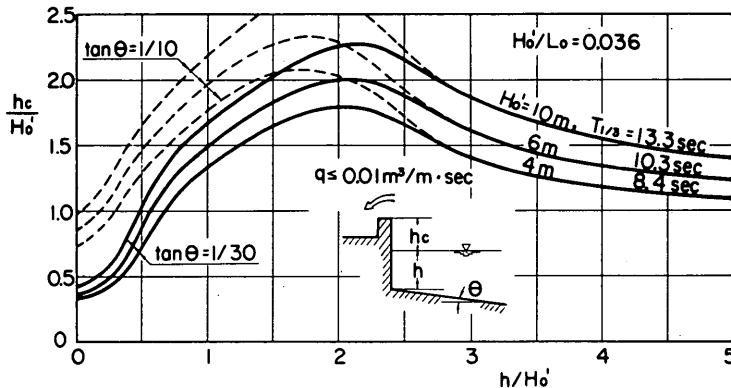


図-30 許容越波流量  $0.01 \text{ m}^3 / \text{m} \cdot \text{sec}$  に対する直立護岸の所要天端高

を必要とする。また、海底勾配が  $1/30$  よりもゆるやかな場合には所要天端高がさらに低くなるものと考えられる。

今回の実験結果を図-30を参照しながら考察すると、次のようなことがいえるものと思われる。

### (1) 階段護岸について

実験結果では、基部水深が0であっても傾斜護岸とすることによって所要天端高が増大するので、階段護岸はもともと直立壁の天端高が低くて済む所に限って使用することが望ましい。その意味で、階段護岸は外浜の勾配がゆるやかで、前面に砂浜が存在しているような場所に施工するのが最も適切である。越波防止の観点からは、1段の高さができるだけ高い方がよい。また、最上部には波返し工を設けると越波量を減少させるのに役立つ。設計高潮位における護岸の基部水深が0の場合、階段護岸の天端高は約  $0.5 H_0'$ 、またはそれ以下とすることができよう。なお、服部・佐藤<sup>17)</sup>によって報告されているように、護岸の前面に幅の広い遊歩道を設けることも、所要天端高を低める上で極めて有効である。

階段護岸を施工する場合の問題点は、前面の砂浜の維持である。図-30でも明らかなように、前面水深が増

に見られるように直立護岸の天端高として  $(1.5 \sim 2.5) H_0'$  を必要とする。今回実験した中で最も天端幅の広いブロック4列並びの場合には直立護岸の約45%の所要天端高であるので、 $(0.7 \sim 1.1) H_0'$  の高さとなる。これは設計高潮位上の有効高なので、基準面から測れば相当の高さである。

水深が浅い場合 ( $h \leq H_0'$ ) には消波工の効果が減少するけれども、直立護岸の所要天端高自体が低減するので、天端高としてはかなり低くなる。もっとも、水深が浅い場合には護岸前面の消波工の拡幅ばかりでなく、離岸堤その他との比較を試みるべきであろう。また、今回の実験は写真-1のように最も単純な形状を対象としたものである。実際の設計にあたっては、根固工、天端部、およびパラベットの最適形状について模型実験を行なうことにより、今回の実験値よりもさらに低い天端高で済ませ得る可能性がある。

### (3) 離岸堤について

消波ブロックを用いた透過性の離岸堤は、護岸の天端高を低減させるのに相当効果がある。越波減殺の目的からは前面消波工よりも効果的であり、設置条件その他が適切であれば消波護岸の天端ブロック3列並びに相当す

る。問題は建設費であり、比較設計の結果として決まることになろう。

もっとも、天端高低減に効果があるといっても、図-15に示されるように直立護岸の50~60%の高さは必要なので、護岸のバラベットの天端高としては(0.8~1.2) $H_0'$ の高さとなる( $h \geq H_0'$ の場合)。護岸の天端高をさらに低減させるためには、離岸堤だけでなく消波護岸その他との併用を考える必要がある。

なお、離岸堤併置型の護岸の越波特性は、離岸堤の構造や設置距離など種々の要因に影響され、特にサーフビート、すなわち入射波の数倍の周期で平均水位が不規則に昇降する現象が重要である。したがって、離岸堤単独の波浪伝達特性と単一護岸の越波特性との単純な組み合わせとして離岸堤併置型護岸の越波量を推定することはできず、設計断面ごとに水理模型実験を行なう必要がある。こうした実験は、サーフビートの重要性から考えると不規則波を用いるのが望ましい。離岸堤型式の場合には一般に反射率が低くて造波板との間の多重反射があまり発達しないと考えられる。したがって 実験としては不規則波を連続的に作用させ、沖波の測定波高を $\sqrt{1+K_R^2}$ で割って入射波の推定値とし、これを模型設置前の検定波の波高と比較した上で、必要に応じて補正を行なえばよいであろう。なお反射率 $K_R$ は、この実験で使用しているような不規則波の分離計算によることが望ましいけれども、近似的には規則波に対する値で代用しても誤差は小さい。

#### (4) バラベット後退型護岸について

図-22のように、直立護岸のバラベットを後へ下げると、その距離に応じてバラベットの所要天端高を低減することができる。風波を対象とすれば、換算沖波波高の4倍程度の後退距離で消波護岸(天端部ブロック2列並び)と同程度の天端高にしてよいと思われる。後退距離を増せば所要天端高をさらに低減できるけれども、一般には埋立用地との関連などから不得策となろう。むしろ、形状等について工夫する方が効果的と思われる。すなわち、バラベットを曲面の波返しとすれば越波量を減少させ得るし、また水叩きの天端高についても越波量を最小とならしめる最適値が存在するはずである。水叩きの先端あるいはその途中で副バラベットを設けることは、副バラベットに十分な大きさの排水孔が設けてあれば効果的であるけれども、排水が不十分な場合には主バラベット前面の水位が上昇することによって逆に越波を増大させるので、<sup>15)</sup><sup>16)</sup> 慎重に検討する必要がある。

なお、今回の実験は $h = H_0$ の条件で行なったものなので、水深がさらに大きな場合にはそれに応じた実験を

行なう必要がある。ただし、この型式の護岸の越波減少効果は、水叩きの上へ波を乗り上げさせて波頂の盛り上りを食い止めることにあるので、水深が深くなっても越波減少効果はそれほど低下しないものと思われる。

#### (5) 縦スリット式ケーソン護岸について

今回の実験結果によると、縦スリット式ケーソンも低天端型護岸構造として有望である。特に、天端面を開放あるいはスリット構造とすることは、越波量および反射率の低減に役立つ。所要天端高は通常の消波護岸と同程度であり(図-28)、条件によっては消波護岸よりも経済的になるのではないかと思われる。

今回実験した縦スリット式ケーソン護岸が有効に機能する理由の一つに、バラベットをケーソンの後端に位置したことによりバラベット後退型護岸と類似の特性を持ったことが挙げられる。実験した模型ではバラベットの後退距離が $e/H_0 = 1.7$ であり、これによる天端高低減の効果は、図-22によれば25%程度である。図-22と図-28では後者の方が相対水深が大きいので、バラベット後退の効果も20%と見積れば、全体としての所要天端高比を0.6として、スリット部分の消波による越波減少効果が天端高低減率で同じく20%と推定される。したがって、スリット式構造であってもバラベットを前面に設ける場合には、所要天端高の低減率が図-28ほどには至らないと思われる。

縦スリット式ケーソン構造の消波機構は、前述のようにスリット部分における噴流の速度水頭損失であり、流速が大きいほど有効に働く。したがって、この構造の使い方として今回実験したような海底面に直接設置する方式は不得策であり、適当な高さの捨石マウンド上に設置して波のエネルギーを集中させた上でスリット式ケーソンに波を作用させる方式が効果的であると考えられる。

低天端護岸として天端をどの程度低くすればよいかは海岸の利用状況によって異なるところで、一般に定義できるものではない。今回実験した構造型式はいずれも形状としてできるだけ単純なものを対象としているので、形状を工夫すればもう少し所要天端高を下げるのが可能であろう。しかし、直立護岸の所要天端高の50%以下にすることは容易でなく、許容越波流量を $0.01 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$ とすれば、条件の良いときでも $0.7 H_0'$ 以上の天端高が必要である(汀線近傍を除く)。水深が $h \geq H_0'$ の所で天端高を $0.5 H_0'$ あるいはそれ以下に抑えるためには、低天端型の構造を2種類以上組み合わせるか、何か新しい構造様式を発明しなければならない。

低天端型構造の組み合わせとしては次のようなものが考

えられる。

- 1) 離岸堤+消波護岸
- 2) 離岸堤+パラベット後退型護岸
- 3) 離岸堤+直立消波護岸
- 4) 消波工+パラベット後退型護岸
- 5) 直立消波構造+パラベット後退型護岸

いずれにしても、水理模型実験によってそれぞれの有効性を検討し、最適な形状を見出す必要がある。前報で行なったような包括的・系統的な実験ではなく、個々の設計条件に対する具体的検討の形で行なわれることになろう。

### 9. あとがき

低天端型護岸構造5種類について、限定された条件の下で不規則波による越波特性について実験的に検討した結果明らかになった事項は次のとおりである。

1. 汀線付近の護岸を傾斜型にすると直立壁に比べて越波量が増大し、同一越波流量に対する所要天端高を高める必要が生ずる。傾斜面を1段の高さが30cm程度の階段にすると、所要天端高の増大率を1.1～1.2倍に抑えることが可能である。
2. 消波護岸では、天端幅を広げるにつれて護岸の所要天端高が低下する。設置水深がほぼ換算沖波波高に等しい箇所では、天端幅をブロック4列並び(下層)とすることによって、所要天端高を直立護岸の40～50%、ブロック2列並びの消波護岸の70～80%に低減することができる。
3. 直立護岸の前面に消波ブロック積みの離岸堤を設けると、設置位置および構造を適切に選定することにより、通常の消波護岸よりも低い天端高とすることができる。
4. 離岸堤の設置位置として直立護岸から波長の(0.5～0.8)倍の距離が適当のようであるが、これについてはさらに検討する必要がある。また、離岸堤併置型の護岸では前面の平均水位の上昇量およびサーフビートの振幅が大きいことに注意する必要もある。
5. 直立護岸のパラベットを後へ下げると、後退距離に応じて越波流量が減少し、所要天端高が低下する。設置水深がほぼ換算沖波波高に等しい箇所では、風波を対象とする場合、波高の8倍の距離だけパラベットを後退させることによって、所要天端高を約50%に低減できる。
6. 直立消波構造としての縦スリット式ケーソンでは、天端面にも十分な大きさのスリットを設けることが反射率および越波量を減少させる上で有効である。

前面スリットの開口比は20%程度が最適値と考えられる。

7. 縦スリット式ケーソン護岸の所要天端高は、実験条件においては通常の消波護岸の場合とはほぼ同程度であった。

本資料で述べた実験は一種の包括的な予備実験であり、これらの実験結果のみで低天端型護岸の設計が可能になるものではない。個々の事例について水理模型実験、それもできるだけ不規則波を用いた実験によって現地条件に最も適合した設計断面を見出すことが必要である。本資料がこうした実験の目安となれば何より幸である。

なお、本実験にあたっては運輸省港湾局防災課の関係各位より種々御助力頂いた。また、実験は当所海洋水理部波浪研究室の菊地 治技官の全面的な協力によって実施されたものであり、さらに実験の一部は当所研修員として来所中であった五洋建設株式会社職員 伊藤雅通氏の協力を受けている。本資料をとりまとめるにあたり、上記各位に厚く御礼申し上げる次第である。

(1976年6月30日受付)

### 参考文献

- 1) 運輸省港湾局防災課：海岸線のあり方と海岸保全施設について～海岸線の自然環境や利用状況を考慮した施設事例～、業務資料№1，1976年1月，27p.
- 2) 運輸省港湾局編：港湾構造物設計基準，日本港湾協会，1968年9月，p. 7-3-8.
- 3) 合田良実・岸良安治・神山 豊：不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第14巻第4号，1975年12月，pp. 3-44.
- 4) Saville, T., Jr. : Laboratory data on wave runup and overtopping on shore structures, Beach Erosion Board, Tech. MemO., №64, 1955, 32p.
- 5) U. S. Army Coastal Engineering Research Center : Shore Protection, Planning and Design, Tech. Rept., №4, 3rd Ed., 1966, pp. 198-212.
- 6) Saville, T., Jr. : Wave runup on shore structures, Proc. A. S. C. E., Vol. 82, №WW2, Paper №925, 1956, 14p.
- 7) 豊島 修・首藤伸夫・橋本 宏：海岸堤防への波のうちあげ高一海底勾配1/30-，第11回海岸工学

- 講演会講演集, 1964年11月, pp. 260-265.
- 8) 豊島 修・首藤伸夫・橋本 宏: 海岸堤防への波のうちあげ高一海底勾配1/20-, 第12回海岸工学講演会講演集, 1965年11月, pp. 180-185.
  - 9) Technical Advisory Committee on Protection against Inundation: Wave Run-up and Overtopping, Government Publishing Office-the Hague, 1974, 176 p.
  - 10) 榎木 亨・岩田好一郎・森永勝登: 海岸堤防前面波高に及ぼす離岸堤の設置距離の効果について(2次元モデルの場合), 第22回海岸工学講演会論文集, 1975年11月, pp. 415-420.
  - 11) 富永正照・坂本忠彦: 離岸堤による波浪減殺効果の現地観測, 第18回海岸工学講演会論文集, 1971年10月, pp. 149-154.
  - 12) 片山猛雄・入江 功・川上俊雄: 新潟海岸の離岸堤の効果, 第20回海岸工学講演会論文集, 1973年11月, pp. 519-524.
  - 13) 合田良実: 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻第3号, 1975年9月, pp. 59-106.
  - 14) 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所・新潟県新潟港湾事務所: 新潟海岸調査成果報告書(離岸堤の侵食防止機能に関する調査)-第12報-, 新調査48-8, 1974年3月, 50 p.
  - 15) 運輸省港湾技術研究所水工部: 神戸港ポートアイランド防波護岸波浪実験報告書, 1969年3月, 71 p.
  - 16) 運輸省港湾技術研究所水工部: 東京港竹芝棧橋防潮壁波浪実験報告書, 1969年11月, 48 p.
  - 17) 服部典節・佐藤昭二: 前面に遊歩道をもつ海浜護岸について-越波特性からの断面形の検討-, 港湾技術研究所報告, 第12巻第3号, 1973年9月, pp. 71-98.
  - 18) 合田良実・池田龍彦・笹田 正・岸良安治: 岩礁上の円柱の設計波力に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第11巻第4号, 1972年12月, pp. 45-81.
  - 19) 山崎 博・鳥居幸雄: 西神戸高潮対策事業における消波護岸構造の決定について, 第13回海岸工学講演会講演集, 1966年12月, pp. 191-197.
  - 20) 伊藤喜行・藤島 睦・北谷高雄: 防波堤の安定性に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第5巻 14号, 1966年9月, p. 121.
  - 21) Mei, C. C., Liu, P. L. F., and A. T. Ippen: Quadratic loss and scattering of long waves, Proc. A. S. C. E., Vol. 100, No. WW3, 1974, pp. 217-239.



主要記号表

$b_1$	: 縦スリット式ケーソン前面壁の支柱幅 (m)	$n$	: 波の度数分布のある区間における度数
$b_2$	: 縦スリット式ケーソン上床版の梁幅 (m)	$N_0$	: 波群中の波の総数
$f$	: 周波数 (Hz)	$p(\ )$	: 括弧内の変数の確率密度
$g$	: 重力の加速度 (= 9.80 m/sec <sup>2</sup> )	$q$	: 単位時間, 単位幅当りの越波流量 (m <sup>3</sup> /m · sec)
$h$	: 水深 (m)	$r(H, T)$	: 波群中の各波の波高と周期の間の相関係数
$h'$	: 式 (1) により補正を行なった水深 (m)	$s_1$	: 縦スリット式ケーソン前面壁のスリット幅 (m)
$h_1$	: 沖側における波の測定水深 (m)	$s_2$	: 縦スリット式ケーソン天端面のスリット幅 (m)
$h_c$	: 静水面上の護岸パラベット部の天端高 (m)	$S(f)$	: 波のスペクトル密度 (m <sup>2</sup> · sec)
$h_c'$	: 式 (1) の補正を行なった天端高 (m)	$T$	: 波の周期 (sec)
$h_{ca}$	: 縦スリット式ケーソン護岸のケーソン部の天端高 (m)	$\bar{T}$	: 平均周期 (sec)
$H$	: 波高 (m)	$T_{1/3}$	: 有義波周期 (sec)
$\bar{H}$	: 平均波高 (m)	$T_{1/10}$	: 1/10 最大波の周期 (sec)
$H_{1/3}$	: 有義波高 (m)	$T_{max}$	: 最高波の周期 (sec)
$H_{1/10}$	: 1/10 最大波高 (m)	$x$	: 護岸前面からのパラベットの後退距離 (m)
$H_{max}$	: 最高波高 (m)	$\sqrt{\beta_1}$	: 波形のひん度分布の歪度 (skewness)
$H_0$	: 沖波波高すなわち深水波高 (m)	$\beta_2$	: 波形のひん度分布の尖鋭度 (kurtosis)
$H'_0$	: 換算沖波波高すなわち相当深水波高 (m)	$\Delta h$	: 実験水路内のサーフビート増幅効果を修正するための水深補正量 (m)
$k$	: 階段護岸の階段の 1 段の高さ (m)	$\zeta_{rms}$	: サーフビートの波形の標準偏差値 (m)
$K_R$	: 護岸の反射率	$\eta$	: 波形すなわち波による水面変動量 (m)
$\mathcal{L}$	: 離岸堤中心と直立壁との距離 (m)	$\bar{\eta}$	: 波による平均水面の上昇量 (m)
$L$	: 波長 (m)	$\eta_{rms}$	: 波形の標準偏差値 (m)
$L_0$	: 有義波周期に対する沖波波長 (m)		

付表-1 直立壁の越波流量データ

勾配	$h$ (cm)	$h_c$ (cm)	$H_0$ (cm)	$K_R$	$q$ ( $cm^3/cm \cdot sec$ )
1/10	15.2	7.3	16.2	0.52	2920
	15.0	11.3	16.1	0.56	1826
	15.0	15.0	15.6	0.61	980
	5.0	11.3	17.0	0.31	669
	5.0	15.0	17.3	0.33	319
	0	7.5	17.6	0.18	1039
	0	15.0	18.4	0.34	1075
	1/30	22.5	7.5	18.4	0.53
22.5		15.0	19.1	0.58	1207
22.5		22.5	19.1	0.63	403
19.5		10.5	17.3	0.52	2171
19.5		18.0	17.8	0.56	602
19.5		25.5	17.7	0.58	1978
15.0		7.5	16.7	0.38	2433
15.0		11.3	17.0	0.41	1273
15.0		15.0	17.4	0.44	645
0		7.5	16.9	0.10	0358
〔波返し工付き〕					
1/10	0.2	14.8	17.4	0.17	0270

付表-2 階段護岸の越波流量データ

 $h = 0 \text{ cm}$ 

勾配	段高 $h$ (mm)	$h_c$ (cm)	$H_0$ (cm)	$K_R$	$q$ ( $cm^3/cm \cdot sec$ )
1/10	0	7.3	17.5	0.17	1731
	6	7.3	17.5	0.17	1505
	9	7.3	17.8	0.17	1191
	0	14.8	17.5	0.26	541
	6	14.8	17.5	0.25	353
	9	14.8	17.6	0.26	328
	1/30	0	7.5	16.4	0.11
6		7.5	16.6	0.10	0537
9		7.5	16.8	0.10	0478
〔波返し工付き〕					
1/10	9	14.8	17.3	0.20	0414

付表-3 消波工拡幅型護岸の越波流量データ

勾配	* 列数	$h$ (cm)	$h_c$ (cm)	$H_D$ (cm)	$K_R$	$q$ ( $cm^3/cm \cdot sec$ )
1/10	4	15.2	7.3	16.5	0.21	1.194
	3	15.2	7.3	16.2	0.28	1.419
	2	15.2	7.3	16.6	0.27	1.936
	1	15.2	7.3	16.0	0.29	2.529
	4	15.2	11.1	16.6	0.26	3.22
	3	15.2	11.1	16.4	0.25	4.66
	2	15.2	11.1	17.2	0.29	11.98
	1	15.2	11.1	16.8	0.31	12.52
	4	15.0	15.0	16.6	0.28	0.456
	3	15.0	15.0	16.9	0.29	1.207
	2	15.0	15.0	17.1	0.27	2.77
	1	15.0	15.0	17.4	0.33	4.99
	4	5.2	11.1	17.5	0.24	4.12
	3	5.2	11.1	17.9	0.26	5.36
	2	5.2	11.1	17.2	0.23	6.78
	1	5.2	11.1	17.2	0.27	8.16
	4	4.6	15.4	17.4	0.27	0.986
	3	4.6	15.4	17.1	0.26	1.654
	2	4.6	15.4	16.9	0.26	1.810
	1	4.6	15.4	17.5	0.26	2.596
1/30	4	15.1	7.4	16.7	0.21	6.30
	3	15.1	7.4	16.7	0.20	9.72
	2	15.1	7.4	16.8	0.22	11.40
	1	15.1	7.4	16.8	0.22	15.60
	4	15.0	11.3	16.3	0.21	1.21
	3	15.0	11.3	17.0	0.20	2.22
	2	15.0	11.3	16.8	0.19	3.37
	1	15.0	11.3	16.9	0.22	5.16
	4	15.0	15.0	17.2	0.21	0.093
	3	15.0	15.0	16.4	0.21	0.294
	2	15.0	15.0	17.3	0.23	1.038
	1	15.0	15.0	17.1	0.23	1.692

\* 消波工天端部分下層のブロックの列数

付表-4 離岸堤の越波流量データ  
(海底勾配 1/30)

距離 <sup>*</sup> $l$ (cm)	$h$ (cm)	$h_c$ (cm)	$H_0$ (cm)	$K_R$	$q$ ( $cm^3/cm \cdot sec$ )
200	15.0	7.5	17.2	0.30	6.35
	15.0	11.3	17.5	0.31	2.34
	15.0	15.0	17.4	0.31	0.777
	15.0	22.5	17.4	0.30	0.0764
150	15.0	7.5	18.2	0.28	6.11
	15.0	15.0	18.3	0.28	0.867
125	15.0	7.5	18.6	0.29	6.19
	15.0	15.0	18.6	0.30	0.914
100	15.0	7.5	18.5	0.27	5.07
	15.0	15.0	18.6	0.27	0.616
	15.0	22.5	18.7	0.27	0.0398
75	15.0	7.5	18.8	0.26	6.15
	15.0	15.0	19.0	0.26	0.632
50	15.0	7.5	18.2	0.23	5.95
	15.0	15.0	18.3	0.23	0.587
	15.0	22.5	18.8	0.24	0.0465

\* 離岸堤中心と直立壁との距離

付表-5 バラベット後退型護岸の越波流量データ  
(海底勾配 1/30)

距離 <sup>*</sup> $l$ (cm)	$h$ (cm)	$h_c$ (cm)	$H_0$ (cm)	$K_R$	$q$ ( $cm^3/cm \cdot sec$ )
150	20.0	7.5	17.5	0.45	14.05
	20.0	15.0	17.8	0.44	0.729
	20.0	22.5	17.5	0.46	0.0325
105	18.5	15.0	18.6	0.41	1.117
	18.5	22.5	18.4	0.43	0.0784
75	17.5	15.0	18.2	0.37	1.431
	17.5	22.5	17.9	0.37	0.108
45	16.5	7.5	17.9	0.35	17.60
	16.5	15.0	18.2	0.34	1.874
	16.5	22.5	18.4	0.34	0.210
30	16.0	15.0	18.2	0.34	2.54
	16.0	22.5	18.0	0.34	0.368
15	15.5	7.5	18.1	0.33	22.66
	15.5	15.0	18.9	0.36	4.09
	15.5	22.5	17.9	0.36	0.631

\* 護岸先端からバラベットまでの距離

付表-6 縦スリット型ケーソンの越波流量データ  
(海底勾配 1/30)

$h$ (cm)	スリット幅*		$h_c$ (cm)	$H_0$ (cm)	$K_R$	$q$ ( $cm^3/cm \cdot sec$ )
	$s_1$ (cm)	$s_2$ (cm)				
22.5	1.0	2.5	7.5	17.7	0.33	15.65
	1.5	3.0	7.5	17.8	0.33	14.62
	2.0	3.5	7.5	17.7	0.31	15.71
	2.5	4.0	7.5	18.1	0.31	17.22
	3.0	4.5	7.5	18.1	—	18.47
	1.0	2.5	15.0	17.3	0.32	2.91
	1.5	3.0	15.0	17.7	0.31	3.14
	2.0	3.5	15.0	17.7	0.31	3.31
	2.5	4.0	15.0	17.9	0.33	4.01
	3.0	4.5	15.0	18.1	0.35	4.71
	1.0	2.5	22.5	17.7	0.32	0.486
	1.5	3.0	22.5	18.0	0.32	0.526
	2.0	3.5	22.5	17.7	0.32	0.411
	2.5	4.0	22.5	18.1	0.34	0.660
	3.0	4.5	22.5	18.0	0.36	0.779
	1.5	56.0	7.5	17.9	0.29	13.99
	1.5	56.0	15.0	18.2	0.31	2.75
	1.5	56.0	22.5	17.5	0.32	0.539
	1.5	0	7.5	18.2	0.38	26.86
	1.5	0	15.0	17.6	0.38	3.90
1.5	0	22.5	17.4	0.38	0.588	
19.5	1.5	3.0	10.5	17.0	0.28	5.76
	1.5	3.0	18.0	17.1	0.29	0.952
	1.5	3.0	25.5	16.9	0.29	0.164
	1.5	56.0	10.5	17.0	0.27	4.72
	1.5	56.0	18.0	17.3	0.28	0.767
	1.5	56.0	25.5	17.6	0.27	0.184
	1.5	0	10.5	17.4	0.34	10.15
	1.5	0	18.0	17.1	0.35	1.305
	1.5	0	25.5	17.1	0.35	0.330

\*前面のスリットの幅を $s_1$ ，天端面のスリットの幅を $s_2$ で表わす。

港湾技研資料 No. 242

1976・9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 (有)つばさ印刷技研

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.