

## 離岸タイプ消波工の効果について

誌名	水産工学研究所技報. 水産土木
ISSN	03892344
著者	影山, 智将 山本, 正昭
巻/号	2号
掲載ページ	p. 51-66
発行年月	1981年3月

## 離岸タイプ消波工の効果について

影山智将\*・山本正昭\*\*

Experimental Study on Characteristics of Breakwater Having Remote Absorber  
by Tomomasa KAGEYAMA and Masaaki YAMAMOTO

### 目 次

1. 緒言	51	3. 実験結果	54
2. 実験方法	51	3.1 波 圧	54
2.1 実験施設と装置	51	3.2 越 波	62
2.2 実験諸元	52	4. 結 言	65

### 1. 緒 言

防波堤に働く波圧を減殺し、また、越波を減少させる目的で、防波堤あるいは海岸堤防前面に異型ブロック消波工を配置することが、よく行われている。従来、この種の消波工形式の場合、防波堤あるいは海岸堤防の前面に直接接する形で異型ブロックを並べ、ブロックの前面を1:4/3程度の勾配にするものが多かった。これに対して、最近、設計の担当者の側から、新しい考え方として、消波工を防波堤から離して設置し、いわば、防波堤前方に透過式離岸堤を設けるような形にした方がよいのではないかという提案がなされている。(以後このような形の消波工を離岸タイプ消波工と呼ぶ)理由としてあげられているものを以下に記すと、

①防波堤を築造する際に、工事に必要な静穏度を確保するために防波堤前方に離して置かれた仮置異型ブロック堤を、防波堤完成後に堤前面に移すよりは、そのまま生かして、離岸タイプの消波工とした方がブロックを移設しなくて済み、経済的である。

②漁港利用者から、仮置ブロックの方が、壁体前面を被覆した従来の消波工型式よりも、越波防止効果が大きいという報告があり、消波工を防波堤から離すことにより、越波を減らすことができる。

③消波工を防波堤から離すことにより、異型ブロックを通して防波堤へ伝わる圧力(ブロック圧)を含めた波圧を減らすことができる。

しかし、これらの理由の根拠としては、②あるいは③について数例の研究<sup>1)2)3)</sup>があるのみで、実験的実証的に十分証明されているとは言い難い。

一方において、離岸タイプの消波工に関しては次のよ

うな疑問点が想起される。

①離岸タイプにすると、現行の消波工の形と比べて、断面積が大きくなり、ブロック移転による経費の増大よりも、断面増による経費の増大の方が大きくかえって不経済でないか。

②越波、波圧の減少と言っても、どの程度のものなのか、その効果が疑わしい。

③離岸タイプにすることにより生ずる新しい問題点として、防波堤と消波工の間の遊水部の水位上昇に伴う流れ、波圧の変化に及ぼす影響がどの程度のものなのか不明である。

④遊水部長さとの関係で、離岸タイプ消波工の効果は、特定の波長の波についてのみ存在し、逆に、別の波長の波では、かえって悪くなる場合もあるのではないか。

⑤離岸タイプにすると、ブロックの安定が悪くなり、被災する場合が増える可能性がある。

この研究では、青森県白糠漁港の防波堤案をベースにした。従来の形式を含めた6種の消波工タイプに関して水理模型実験を行い、波圧および越波の両面から、離岸タイプ消波工の有効性について検討している。

### 2. 実験方法

#### 2.1 実験施設と装置

水槽は、長さ56m、幅2m、深さ2mの2次元実験水路を用いた。中央に幅20cmの中仕切壁を設け、幅1mと幅80cmの2つの水路に分けた。両水路上には、1/50の一樣勾配の海底床を設けた。水路の終端近くには、10m程ガラス側壁があり、真横外側から観察できるようになっている。造波機は、フラップ型規則波造波機である。

1m幅水路上には、白糠漁港の防波堤の縮尺1/25の模型を設けた。堤体は、中央部は波圧計取り付け用のね

\* 水産庁漁港部計画課(前漁港水理研究室)

\*\* 漁港水理研究室

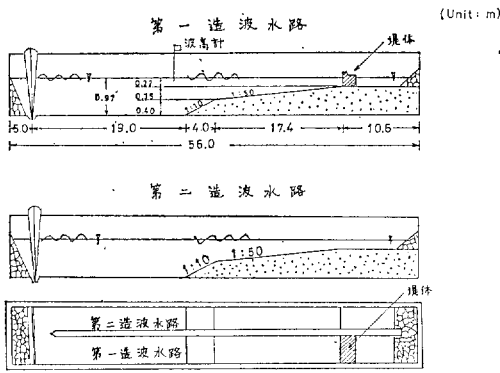


図1 実験施設

じを切った鋼板で作り、両側各40cmはモルタル造りとした。(図1)

動歪測定器と円筒型圧力変換器を用いて、変換器のひずみ量を測定し、ひずみ量から波圧を求めた。ひずみ量の記録には、電磁オシログラフを用いた。越波の測定は、越波量の多いものに対しては、長さ70cm、幅50cm深さ13cmの木箱の中に越波を受け、木箱内の水位変化を容量式波高計で測定し、越波量を求めた。なお、木箱内の水位上昇量と水容積変化の関係は、前もって検定して、検定直線を求めてある。越波量の少ないものに対しては、受口の部分の大きさが幅30cmになるように針金で加工したビニール袋を用いて越波を採取し、その量をメスシリンダーで測定している。異型ブロックは、単位が700~800gのテトラポッドを用いた。

2.2 実験諸元

2.2.1 実験要素

離岸タイプの消波工を持つ防波堤の壁体部に働く波圧に対して影響を及ぼすと考えられる主な諸元には次のものがある。(図2)

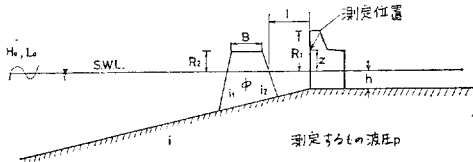


図2 壁体に働く波圧に影響を及ぼす諸元

- ①波に関するもの (沖波波高 $H_0$ , 沖波波長 $L_0$ )
- ②構造物の環境に関するもの (設置水深 $h$ , 海底勾配 $i$ )
- ③構造物に関するもの
  - ④防波堤本体に関するもの (静水面から天端までの

高さ $R_1$ , 波圧測定位置の静水面上の高さ $y$ )

⑤消波工に関するもの (静水面から天端までの高さ $R_2$ , 消波工前面, 後面の勾配 $i_1, i_2$ , 空隙率 $\phi$ , 天端幅 $B$ , 消波ブロック単体の大きさ)

⑥防波堤本体と消波工との関係 (遊水部の長さ $l$ )

2.2.2 実験条件

(1) 波と構造物の環境に関するもの (表1)

白糠漁港の設計波が $H_0 = 6\text{ m}$ ,  $T = 10\text{ sec}$ を用いているので、設計波の6mを最大に、1mきざみで砕波から重複波領域への移行域までをとった。表2には、合田の砕波指標から求めた各実験波の砕波点が記されている。この表によれば $H_0 = 3\text{ m}$ ,  $T = 10\text{ sec}$ の波は重複波領域、他の波は砕波領域になっている。実際の観察結果も、この点では一致している。また、 $T = 10\text{ sec}$ では、 $H_0 = 3.5\text{ m}$ の波の砕波点が丁度堤体設置位置付近にあり、 $T = 15\text{ sec}$ では $H_0 = 3\text{ m}$ の波の砕波点が同様の位置にあるが、

表1 波と構造物の環境に関する実験条件

現	$H_0$	3, (3.5), 4, 5, 6 m
	$T$	10sec および 15sec
地	$h$	5.5m
	$i$	1/50
模	$H_0$	12, (14), 16, 20, 24cm
	$T$	2 sec および 3 sec
型	$h$	22cm
	$i$	1/50

$H_0$ 内 ( ) は $T = 10\text{ sec}$ のみ

表2 合田の砕波指標による砕波点と観察結果

$T$	$H_0$	$H_0/L_0$	$h/L_0$	$h/H_0$	$h_b/H_0$	$h/h_b$	$h_b$	$l_b$
10	3 m (0.12)	0.0192	0.0353	1.83	1.66	1.10	4.98m (0.20)	m
	3.5 (0.14)	0.0224	0.0353	1.57	1.61	0.98	5.64 (0.23)	7.0 (0.28)
	4 (0.16)	0.0256	0.0353	1.38	1.58	0.87	6.32 (0.25)	41.0 (1.64)
	5 (0.20)	0.0321	0.0353	1.10	1.53	0.72	7.65 (0.31)	107.5 (4.30)
	6 (0.24)	0.0385	0.0353	0.92	1.50	0.61	9.00 (0.36)	175.0 (7.00)
15	3 (0.12)	0.0085	0.0157	1.83	1.95	0.94	5.85 (0.23)	17.5 (0.70)
	4 (0.16)	0.0114	0.0157	1.38	1.84	0.75	7.36 (0.29)	93.0 (3.72)
	5 (0.20)	0.0142	0.0157	1.10	1.76	0.63	8.80 (0.35)	165.0 (6.60)
	6 (0.24)	0.0171	0.0157	0.92	1.68	0.55	10.08 (0.40)	229.0 (9.16)

$l_b = 50(h_b - h)$

( ) 内は模型での長さ

これも観察の結果と一致する。しかしながら、他の波については必ずしも一致しているとは言い難いようで、特に、 $T=15\text{sec}$ 、 $H_0=4\text{m}$ の波では碎波点が堤体から模型上の距離で約1m沖側にあることが観察され、碎波指標による値と大きく異なっていた。また $T=15\text{sec}$ 、 $H_0=6\text{m}$ の波は、二次碎波の碎波点が堤体付近にあることが観察された。

碎波形態は、 $T=10\text{sec}$ が崩れ波、 $T=15\text{sec}$ が巻き波であった。水理公式集りによれば、海底勾配1/50では、 $H_0/L_0 > 0.02$ の時崩れ波、 $H_0/L_0 < 0.02$ の時巻き波碎波となるから、よく合致している。

実験水位は、白糖漁港のH.W.L.(D.L.+1.46m)を用い、静水位から堤脚までの深さを5.5mとしている。

(2) 構造物に関するもの

実験を行なった防波堤、消波工は図3～図8及び表3

に示した6タイプである。「現況」は、白糖漁港(白糖地区)第一東防波堤の現在の断面で、前面には工事用異型ブロックが配置されている。異型ブロック堤の天端高はD.L.+3.00mで、壁体部の天端よりも2m低い。

タイプIは、「現況」の異型ブロックを壁体前面に接する形に移設して、従来の方式に従った消波工配置にしようとするものである。天端幅は「現況」と同じく3.4mで、異形ブロック2個並びの設計になっている。消波工前面の傾斜は、1:4/3であり、「現況」の1:1と比べて緩やかになっている。

タイプIIは離岸タイプの消波工を設けた場合で、「現況」の消波工の外側へ壁体部と同じ高さまでかさ上げた形になっている。天端幅は5.5mと「現況」、タイプIに比べて広く、異形ブロック3個並びである。消波工前面の傾斜はタイプIと同じ1:4/3で、後面の傾斜は

現況

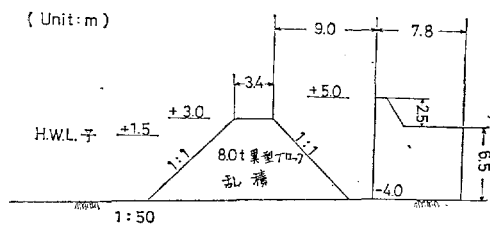


図3 消波工の形(現況)

タイプ III

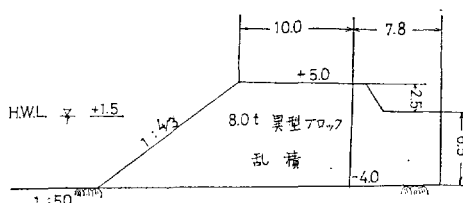


図6 消波工の形(タイプIII)

タイプ I

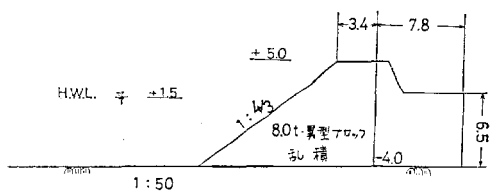


図4 消波工の形(タイプI)

タイプ IV

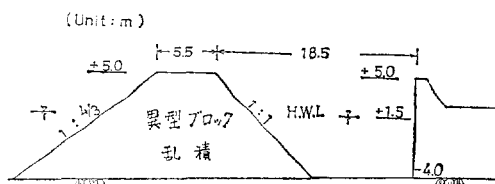


図7 消波工の形(タイプIV)

タイプ II

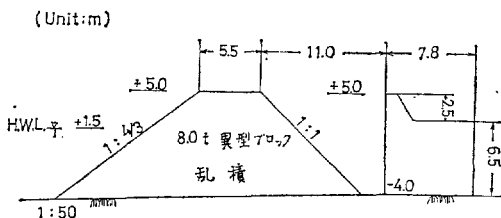


図5 消波工の形(タイプII)

タイプ V

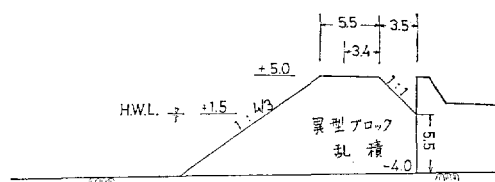


図8 消波工の形(タイプV)

「現況」をそのままかさ上げたもので、1:1となっている。消波工断面積は152.4m<sup>2</sup>と、「現況」およびタイプIの1.8~2倍の大きさを有している。

タイプIIIは、タイプIと同じく従来の形式で消波工を配置したものである。断面積がタイプIIとほぼ等しくなるようにしてある。従って、タイプIIとIIIは所要ブロック量がほぼ等しい。異形ブロックの量は、消波工の効果と経済性の両面において大きく関係してくるので、ブロック量を等しくした実験が比較のために必要とされ、タ

イプIIIの実験を行った。離岸堤型式では多大なブロックを必要とするので、タイプIIと同断面積にしたタイプIIIでは、天端幅が10mに達する。

タイプIVはタイプIIの遊水部長さを現地換算で15mと2倍にしたものであり、タイプVは同様に0mにしたものである。タイプIV、Vの他の条件はタイプIIと等しくなっている。タイプIVとはタイプIIと静水面上の体積形が等しい。タイプVでは、遊水部長さは0mであるが、従来の形式と異なり、壁体との間に三角形の空間を有している。

表3 構造物の諸元

	消波I タイプ	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	i <sub>1</sub>	i <sub>2</sub>	φ	B	l	断面積	
現 地 (m)	現況	3.5	3.5	1.5	1:1	1:1	乱	3.4	7.5	76.6
	タイプI			積	直 立	3.4		0	87.0	
	タイプII									1:1
	タイプIII									1:4/3
	タイプIV									1:1
	タイプV									1:1
模 型 (cm)	現況	14	14	6	1:1	1:1	40	13.6	30	1230
	タイプI			}	直 立	13.6		0	1390	
	タイプII									1:1
	タイプIII									1:4/3
	タイプIV									1:1
	タイプV									1:1

表4 波圧測定座標

Z	現地(m)	-4.5	-1.5	0	1.5	3.0
	模型(cm)	-18	-6	0	6	12
z/h	-0.818	-0.272	0	0.272	0.545	

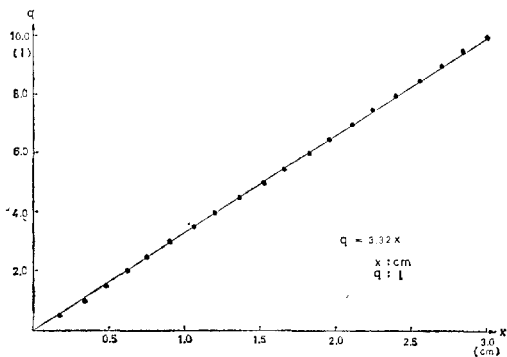


図9 越波測定箱検定直線

波圧の測定は、静水位（ここではH.W.L.を中心として高さ方向6cm(現地換算1.5m)間隔にとった5つの測点で行った。静水位を原点として、上方にy軸をとると、各測点の座標は表4になる。波圧データの整理には、有効測定時間内<sup>5)</sup>の5波の平均値を用いている。

越波測定箱の検定直線を図9に掲げる。直線は、検定量から最小二乗法により求めたもので、次式で表される。

$$q = 3.32x$$

q: 越波量 (l)

x: 水位上昇量(m)

越波測定箱で求めるのは、読みとり誤差等を考えて、測定時間内の水位上昇量が5mm以上ある場合

とし、それ以下の場合には、ビニール袋による直接採取の方法を用いた。測定は、波の周期2秒(現地換算10秒)の場合、有効測定時間内の10波、3秒(現地換算15秒)の場合、3~5波について行なった。

異形ブロック消波工の空隙率は、任意の10個を抽出して測った異形ブロック1個当りの体積と、ブロック使用量、消波工断面積から40~45%程度であった。

### 3. 実験結果

#### 3.1 波 圧

##### 3.1.1 設計公式

漁港防波堤の波圧算定公式は主として次の3式による<sup>6)</sup>

(1) 重複波の波圧 (サンプリングの簡略式)

波高Hの波により直立壁に作用する重複波の波圧は、

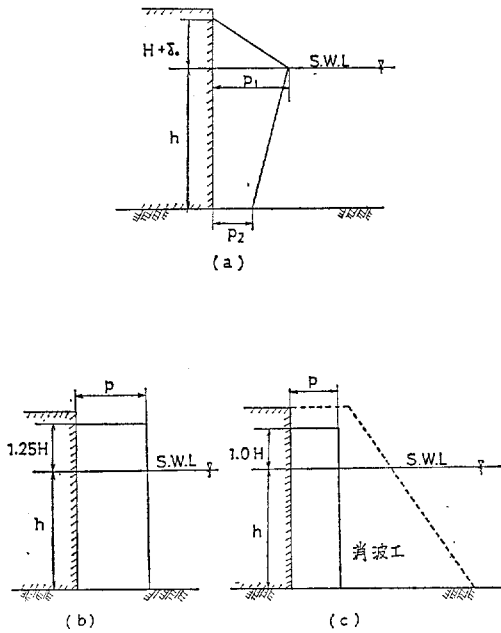


図10 設計公式による波圧分布

図10-(a)のような分布をするものとする。 $H$ としては通常、微小振幅波理論によって誘導された堤体設置位置での波高を用いている。

$$H = K_r \cdot K_d \cdot K_s \cdot H_0 \dots (1)$$

$K_r$ : 屈折係数

$K_d$ : 回折係数

$K_s$ : 浅水係数

図中 
$$p_1 = (p_2 + wh) \left( \frac{H + \delta_0}{h + H + \delta_0} \right) \dots (2)$$

$$p_2 = \frac{wH}{\cosh 2\pi h/L} \dots (3)$$

$$\delta_0 = \frac{\pi H^2}{L} \coth \frac{2\pi h}{L} \dots (4)$$

(2) 碎波の波圧

直立壁に作用する碎波の波圧は、図10 (b) に示すように、静水面上1.25Hの高さ以下に一様に分布するものとする。

$$P = 1.5wH \cos^2 \beta \dots (5)$$

$w$ : 海水の単位体積重量

$H$ : 直立壁前面における波高

$\beta$ : 波の主方向と直立壁の法線の垂線とのなす角度 $\pm 15^\circ$ の範囲において直立壁に最も危険な波圧を与える角度

$H$ の値は、碎波点以浅では次式で与えている。

$$H = 0.78h \dots (6)$$

従って、碎波点以浅に適用される波圧公式は次式のよ  
うに水深により表わすことができる。

$$p = 0.78 \times 1.5wh \cos^2 \beta \\ = 1.17wh \cos^2 \beta \dots (7)$$

本実験では、 $\cos \beta = 1$ と考えるとよいから、水深で無次元化した波圧 $p^*$ は設計公式の場合、次式のように一定値で与えられる。

$$p^* = \frac{p}{wh} = 1.17 \dots (8)$$

(3) 消波工で被覆された直立壁に作用する波圧

消波工で被覆された直立壁に作用する波圧は、図10(c)に示すように、静水面上1.0Hの高さ以下に一様に分布するものとする。

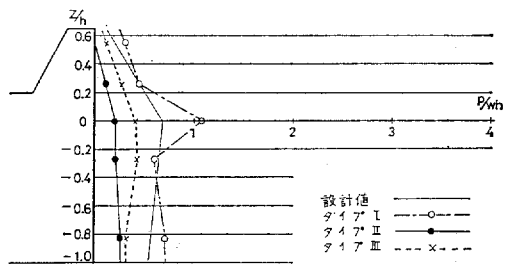
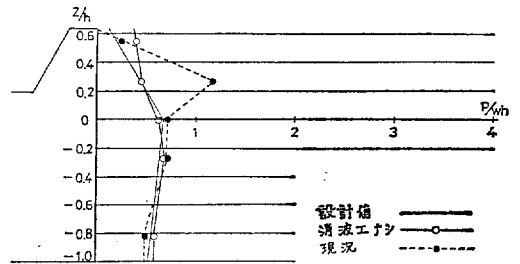
$$p = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) wH \dots (9)$$

碎波点以浅では、(b)と同様の考え方により、無次元波圧 $p^*$ の値は一定となり、次式で与えられる。

$$p^* = 0.78 \dots (10)$$

3.1.2 実験により求められた波圧の分布形

図11~図19に得られた波圧データをもとに作成した波圧の分布を示す。同時に、消波工を設けない場合の実験値、並びに、前節で述べた設計公式による値も併記してある。但し、設計公式としては、 $H_0 = 3\text{ m}$ 、 $T = 10\text{ sec}$ のものだけ重複波の式を用い、残りのケースは、「消波工なし」と「現況」の図には(8)式、タイプI~Vの図に



$H_0 = 3\text{ m}$   $T = 10\text{ sec}$

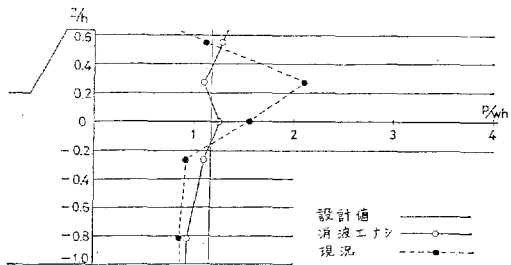
図11 波圧分布 ( $H_0 = 3\text{ m}$ ,  $T = 10\text{ sec}$ )

は(9)式を用いている。これらの図から次の諸点が指摘できるであろう。

①タイプⅠよりもタイプⅡの方が波圧が小さい。タイプⅡとタイプⅢを比較すると、水面下についてはタイプⅡの方がかなり小さな値を示している。水面上については

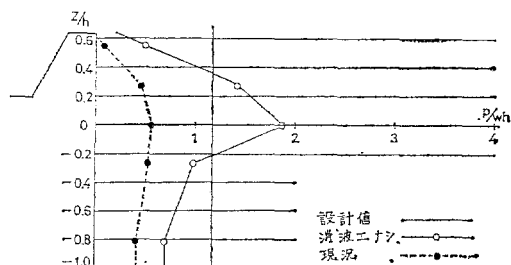
は、重複波領域及び波がはるか沖合で砕波してくるような場合には、同じように、タイプⅡが小さいが、砕波点の近くでは、タイプⅡとタイプⅢは似たような値を示している。

②「現況」のように低い天端の消波工を離岸タイプで



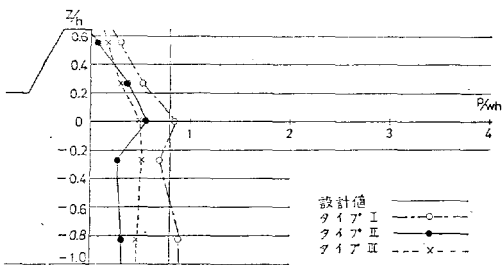
$H_0 = 3.5\text{m}$   $T = 10\text{sec}$

図12 波圧分布 ( $H_0=3.5\text{m}$ ,  $T=10\text{sec}$ )



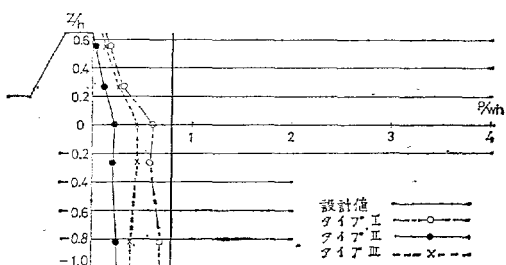
$H_0 = 5\text{m}$   $T = 10\text{sec}$

図14 波圧分布 ( $H_0=5\text{m}$ ,  $T=10\text{sec}$ )



$H_0 = 4\text{m}$   $T = 10\text{sec}$

図13 波圧分布 ( $H_0=4\text{m}$ ,  $T=10\text{sec}$ )



$H_0 = 6\text{m}$   $T = 10\text{sec}$

図15 波圧分布 ( $H_0=6\text{m}$ ,  $T=10\text{sec}$ )

設置した場合、消波工を設けない場合より大きな波圧を生ずることがある。(図11, 12, 16, 19)

③  $T=10\text{sec}$  の波で砕波点が堤体から離れている場合には、「現況」はタイプ I と同じような形の分布を示し、波圧の大きさも似かよっている。但し、水面下の波圧が若干小さくなる傾向が見える。

④ タイプ V, II, IV の比較により、遊水部長さの影響を見ると、タイプ II の波圧は、静水面より下ではタイプ IV とほぼ等しく、静水面より上では、タイプ V と似たような値を示し、全体としては、遊水部長さが大きくなるほど波圧が小さくなる傾向にある。

重複波領域にある防波堤を異型ブロックで被覆すると被覆しない場合よりも波圧が大きくなることもある。 $H_0=3\text{m}$ ,  $T=10\text{sec}$  のケースは、この典型である。消波工なしの場合には、重複波の設計式とほぼ同様な波圧分布をしているが、「現況」あるいはタイプ I では、静水面付近に大きな波圧を生じている。消波工により砕波が強制され、重複波域から砕波域へ移行するためである。タイプ II ~ V では消波工厚が十分あり反射波が小さい、消波工前面の水深が深い等の理由により、砕波が起らなかった。

丁度砕波点付近に堤体がある場合、消波工なしの直立壁では波が大きくなるものの砕波せずに終わってしまう傾向が見られる。あたかも、波が前方へ倒れようとするのを直立壁により支えられるかの如くである。この時波圧の形としては、前節(2)の広井公式のような一様分布

形に近くなる、波圧の値も広井公式とよく似かよっている。(図12, 16, 19)。この砕波点での現況の波圧の値はやはり消波工なしの場合より大きくなっている。重複波域と同様に、砕波を強制するためである。特に、 $H_0=3\text{m}$ ,  $T=15\text{sec}$  では、衝撃的な圧力が堤体にかかっている。

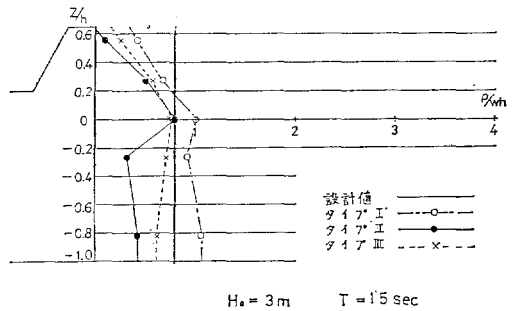
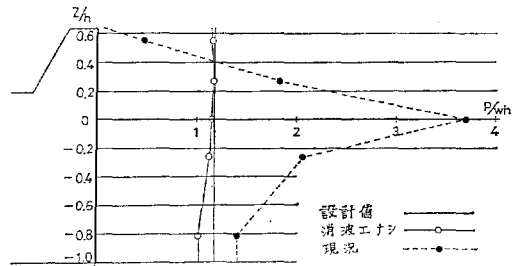


図16 波圧分布 ( $H_0=3\text{m}$ ,  $T=15\text{sec}$ )

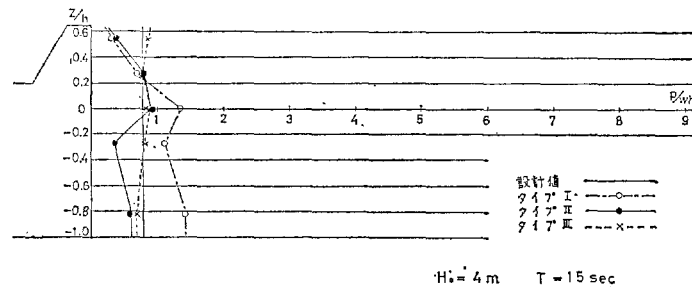
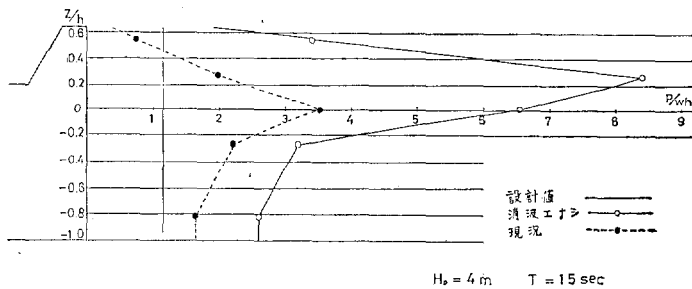
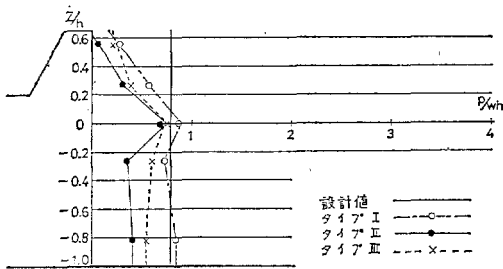
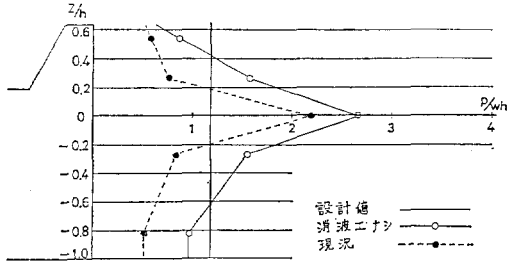


図17 波圧分布 ( $H_0=4\text{m}$ ,  $T=15\text{sec}$ )



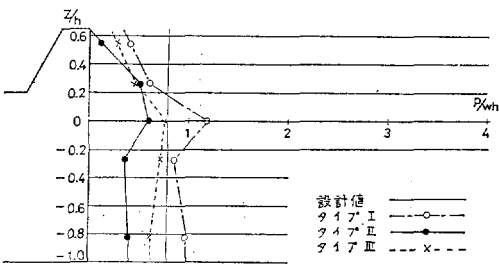
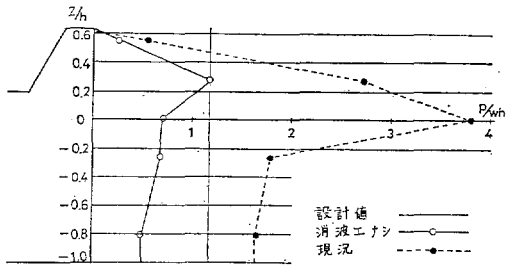
る点は問題である。タイプⅠの場合には、衝撃圧を生じていない。タイプⅡ～Ⅴについても衝撃圧は働かない。

$H_0 = 4\text{ m}$ ,  $T = 15\text{ sec}$  の波は、実験波の中で最大の波圧を示しているが、砕波点と堤体との距離は  $5 H_0$  程度で



$H_0 = 5\text{ m}$   $T = 15\text{ sec}$

図18 波圧分布 ( $H_0 = 5\text{ m}$ ,  $T = 15\text{ sec}$ )



$H_0 = 6\text{ m}$   $T = 15\text{ sec}$

図19 波圧分布 ( $H_0 = 6\text{ m}$ ,  $T = 15\text{ sec}$ )

ある。「現況」の場合、消波工なしと比べると波圧は減少しているものの、衝撃的な圧力がまだ残っている。これとは対照的に、タイプⅠ～Ⅴでは、大きな衝撃圧は働かない。

タイプⅡの波圧がタイプⅠの波圧よりも小さいことは異型ブロック量の違いからしても当然の事と思われるが、タイプⅡとⅢの差異は特徴的である。静水面下の圧力がタイプⅡの方が小さくなっているが、原因としては、水面下のブロック量の違い、ブロック堤頂を飛び越えて遊水部へ落下する水塊とブロック堤内を通過してくる波の到達時間の違いによるエネルギーの分散等が考えられる。しかしながら、どの因子がどの程度影響を与えているかは明確ではない。静水面上の波圧は離岸タイプの場合大きくなる傾向にあり、これはブロック堤頂を飛び越えた水塊が壁体に衝突するためである。遊水部の長さが十分大きくなると、水塊が遊水部へ落ちるようになって壁体に働く静水面上の波圧は減少する。

図20～21はタイプⅡとタイプⅢの波圧、時間記録の一例を示したものである。2秒と3秒（現地換算10秒と15秒）の波のうち、堤体に最大の圧力を及ぼすものの静水面と底面の波圧計の記録である。これからわかるように、タイプⅡとタイプⅢでは波圧のかかり方が異なっている。タイプⅡではブロック堤を飛び越えて、直接堤体に衝突する水塊による圧力と、ブロック堤を通過してく

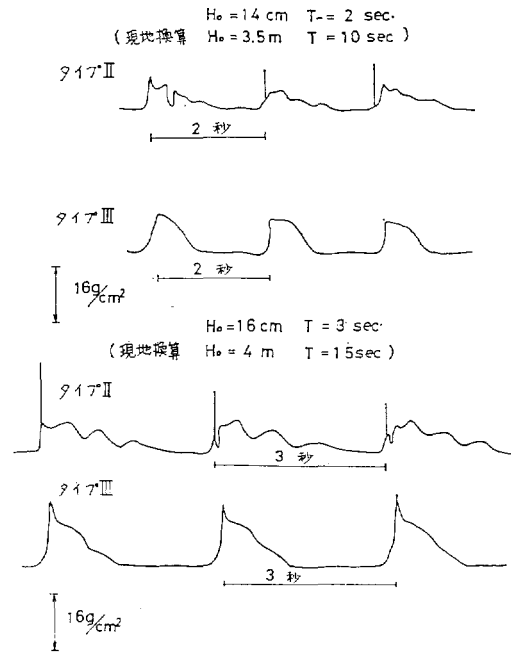


図20 波圧時間記録の例 (静水面)

る波による圧力とに分離していることがうかがえる。前者による圧力は衝撃的であり、後者によるものは静圧的である。静水面における圧力は前者による影響が大きいためデータのばらつきが大きい(表5)。これに対して、タイプⅢでは、静圧的であるため、データのばらつきが小さい。これらの性質の違いは、離岸タイプと従来の形式との差異でもある。

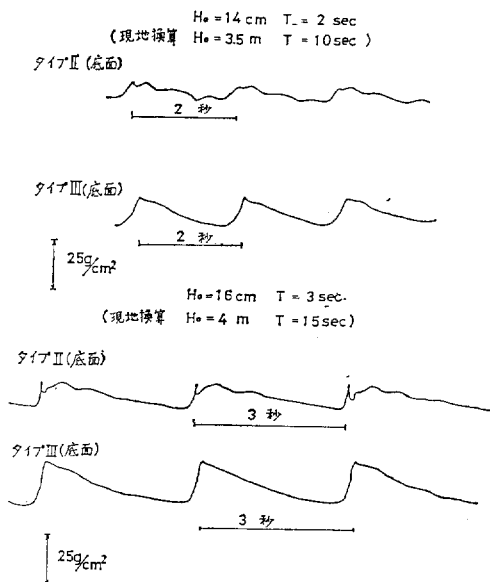


図21 波圧時間記録の例(底面)

表5 実験データのばらつき

			$p^*_{max}$	$p^*_{min}$	$R^*$	$\sigma_{n-1}$	C.V. (%)
$T=10\text{sec}$	(静水面)	タイプⅡ	1.00	0.24	0.76	0.28	50.1
		タイプⅢ	0.51	0.45	0.06	0.03	5.8
$H_0=3.5\text{m}$	(底面)	タイプⅡ	0.35	0.28	0.07	0.03	10.7
		タイプⅢ	0.49	0.44	0.05	0.02	4.1
$T=15\text{sec}$	(静水面)	タイプⅡ	1.15	0.57	0.58	0.23	26.4
		タイプⅢ	1.03	0.84	0.19	0.08	8.8
$H_0=4\text{m}$	(底面)	タイプⅡ	0.80	0.45	0.35	0.15	25.5
		タイプⅢ	0.69	0.65	0.04	0.01	1.9

$p^*_{max}$  : 5波の $p^*$ 最大値

$p^*_{min}$  : 5波の $p^*$ 最小値

$R^* = p^*_{max} - p^*_{min}$

$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{(p^* - \bar{p}^*)^2}{n-1}}$        $\bar{p}^* = \frac{1}{n} \sum p^*$

C.V. =  $\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{p}^*}$       波の数  $n=5$

### 3.1.3 波圧合力

前項(2)で得られた波圧分布をもとに、堤体全体に働く無次元波圧合力を求めると表6になる。但し、測点と測点の間の波圧は直線分布とし最も底面に近い測点と底面の間の波圧は、その最下段の測点における波圧と等しいと考えている。また、最上段の測点と天端までの波圧分布は、上から2番めの測点と最上段の測点の間の直線分布を、そのまま外挿したものとしている。

堤体に働く全波圧合力をと考えると、次式で表される。

$$F = W \int_{-h}^{z_0} p \, dz$$

$z_0$  : 静水面上の天端高さ

$W$  : 堤体幅

但し、幅方向には波圧は一様であると考えている。

$$p^* = p/wh \quad z^* = z/h \quad z_0^* = z_0/h$$

とすると、波圧合力は次式の形に無次元化される。

$$F^* = \frac{F}{w W h^2} = \int_{-1}^{z_0^*} p^* \, dz^*$$

以下本防波堤の場合にあてはめると、 $z_0^* = 0.636$ であるから、各設計公式の場合には次のようになる。

①  $p = 1.5wh$

$$F^* = 1.17 \times 1.64$$

$$= 1.92$$

②  $p = 1.0wh$

$$F^* = 0.78 \times 1.64$$

$$= 1.28$$

③  $H_0 = 3\text{m}, T = 10\text{sec}$ の場合の重複波

$$h = 5.5\text{mより } h/L_0 = 5.5/156 = 0.035$$

$$\therefore h/L = 0.0778 \quad L = 70.7\text{m}$$

$$H/H_0 = 1.090 \quad H = 3.27\text{m}$$

$$\delta_0 = \frac{\pi H^2}{L} \coth \frac{2\pi h}{L} = 1.05\text{m}$$

$$p_2 = \frac{wH}{\cosh 2\pi h/L}$$

$$\cosh 2\pi h/L = 1.122$$

$$\therefore p_2^* = \frac{p_2}{wh} = \frac{3.27}{1.12 \times 5.5} = 0.531$$

$$p_1 = (p_2 + wh) \left( \frac{H + \delta_0}{h + H + \delta_0} \right)$$

$$\therefore p_1^* = \frac{p_1}{wh}$$

$$= (p_2^* + 1) \left( \frac{H + \delta_0}{h + H + \delta_0} \right)$$

$$= (0.531 + 1) \left( \frac{3.27 + 1.05}{5.5 + 3.27 + 1.05} \right)$$

$$= 0.674$$

天端における波圧の大きさを $p_0$ とすると

$$\frac{H+\delta_0-z_0}{H+\delta_0} = \frac{p_0}{p_1}$$

$$p_0^* = \frac{H+\delta_0-z_0}{H_0+\delta_0} \cdot p_1^*$$

$$= 0.128$$

ゆえに

$$F^* = \frac{z_0^*}{2} (p_0^* + p_1^*) + \frac{1}{2} (p_1^* + p_2^*)$$

$$= \frac{1}{2} \times 0.636 \times (0.128 + 0.674)$$

$$+ \frac{1}{2} \times (0.674 + 0.531)$$

$$= 0.858$$

図22~23は各実験値および設計式の $F^*$ の値を $h/H_0$ を横軸にとり、示したものである。表7は、各 $F^*$ の値と消波工で被覆された堤体に働く波圧の式(9)式から求めた $F^*$ の値との比を示したものである。これらの図表より次のことが言える。

①タイプⅡとⅢの比較より、消波工の天端が十分高い場合、消波工天端高が同じであれば、離岸タイプの方が堤体に働く力が小さく、有利である。

②消波工の効果は波の周期により異なり、周期の長い波に対しては効果が乏しい。10秒の波と15秒の波の波圧合力を比較すると、同じ沖波波高をもつ波であれば、いずれのケースも、後者の消波効果は前者の半分以下となっている。

表6 無次元波圧合力と作用点

(sec)		10					15			
(m)		3	3.5	4	5	6	3	4	5	6
消波工なし	$F^*$	0.923	1.820	2.565	1.714	1.807	1.815	7.474	2.393	1.055
	$z^*$	-0.244	-0.137	-0.057	-0.134	-0.093	-0.157	-0.057	-0.142	-0.148
現況	$F^*$	1.063	1.958	0.967	0.683	0.593	3.087	3.336	1.480	3.363
	$z^*$	-0.150	-0.055	-0.204	-0.259	-0.228	-0.196	-0.196	-0.116	-0.172
タイプⅠ	$F^*$	1.051	1.112	1.042	0.811	0.691	1.393	1.719	1.112	1.358
	$z^*$	-0.248	-0.298	-0.314	-0.340	-0.327	-0.288	-0.329	-0.287	-0.274
タイプⅡ	$F^*$	0.280	0.505	0.481	0.285	0.288	0.675	0.946	0.609	0.640
	$z^*$	-0.382	-0.220	-0.281	-0.354	-0.451	-0.210	-0.162	-0.263	-0.217
タイプⅢ	$F^*$	0.523	0.659	0.600	0.581	0.499	0.968	1.283	0.828	0.953
	$z^*$	-0.273	-0.290	-0.260	-0.286	-0.271	-0.250	-0.143	-0.252	-0.265
タイプⅣ	$F^*$	0.239	0.370	0.404			0.393	0.783	0.480	
	$z^*$	-0.339	-0.323	-0.299			-0.336	-0.141	-0.286	
タイプⅤ	$F^*$	0.339	0.613	0.505			0.834	1.333	0.816	
	$z^*$	-0.362	-0.237	-0.309			-0.252	-0.210	-0.286	
設計式	重複波の式	$F^*$	0.858							
	$z^*$	-0.264								
設計式	$p=1.5H$	$F^*$	←-----1.914-----→				←-----1.914-----→			
	$z^*$	←-----0.182-----→				←-----0.128-----→				
設計式	$p=1.0H$	$F^*$	←-----1.276-----→				←-----1.276-----→			
	$z^*$	←-----0.182-----→				←-----0.182-----→				

③タイプⅡとⅠの比較より、タイプⅡにかかる波圧合力は、タイプⅠの約半分程度になっていることがわかる。タイプⅡでは、広井式表示で $0.8wH$ 以下になると考えられ、消波工天端が十分高い離岸タイプでは、従来の式、(9)式で対応して十分である。

④「現況」の場合、堤体付近に碎波点のある波に対し

ては消波工なしの場合よりも大きな力がかかる場合が見られ、その値は広井式表示で $1.5\sim 2.6wH$ にまで及んでいる。主として、これらは消波工の天端の低さに起因すると考えられる。離岸タイプの消波工の場合には、十分天端高をとらないと、かえって危険である点は注意が必要である。また「現況」断面の設計公式は、消波工被覆

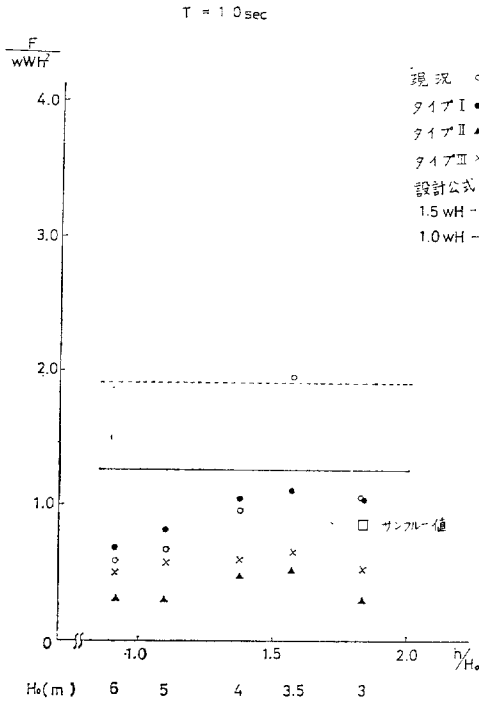


図22 無次元波圧合力 ( $T=10\text{sec}$ )

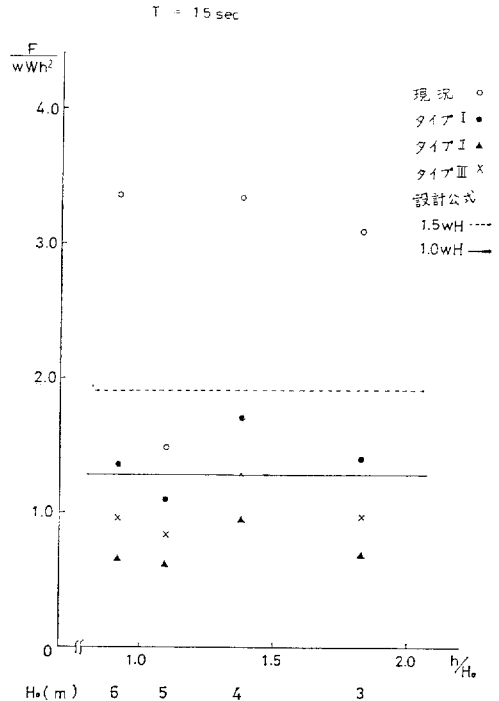


図23 無次元波圧合力 ( $T=15\text{sec}$ )

表7  $p=1.0wH$ との比 ( $F^*$ )

(sec)		10					15			
(m)		3	3.5	4	5	6	3	4	5	6
消波工なし		0.72	14.3	2.01	1.34	1.42	1.42	5.86	1.88	0.83
現況		0.83	1.54	0.76	0.54	0.46	2.42	2.62	1.16	2.64
タイプⅠ		0.82	0.87	0.82	0.64	0.54	1.09	1.35	0.87	1.06
タイプⅡ		0.22	0.40	0.38	0.22	0.23	0.53	0.74	0.48	0.50
タイプⅢ		0.41	0.52	0.47	0.46	0.39	0.76	1.01	0.65	0.75
タイプⅣ		0.19	0.29	0.32			0.31	0.61	0.38	
タイプⅤ		0.27	0.48	0.40			0.65	1.05	0.64	
設計公式	重複波の式	0.67								
	$p=1.5wH$	←—————1.5—————→					←—————1.5—————→			
	$p=1.0wH$	←—————1.0—————→					←—————1.0—————→			

の場合の(9)式では不十分で、周期の短い波の場合は、消波波のない場合の碎波圧の式(5)、周期の長い波の場合には、ミニキン公式等の衝撃碎波圧の式による検討が必要である。

図24は横軸に遊水部長さ  $l$  と壁体位置における波長  $L$  の比をとり、縦軸に無次元波圧合力をとって、遊水部長

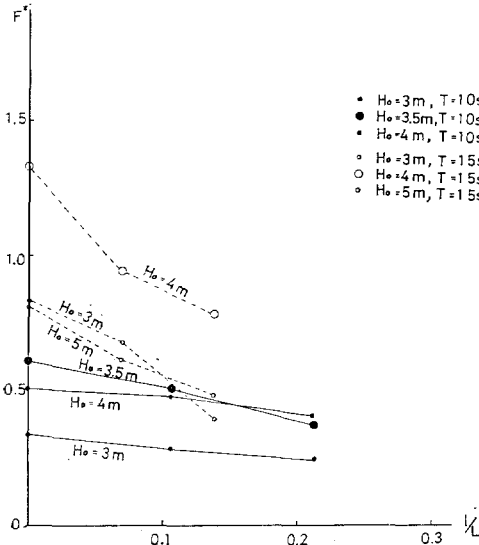


図24 遊水部長さと波圧合力

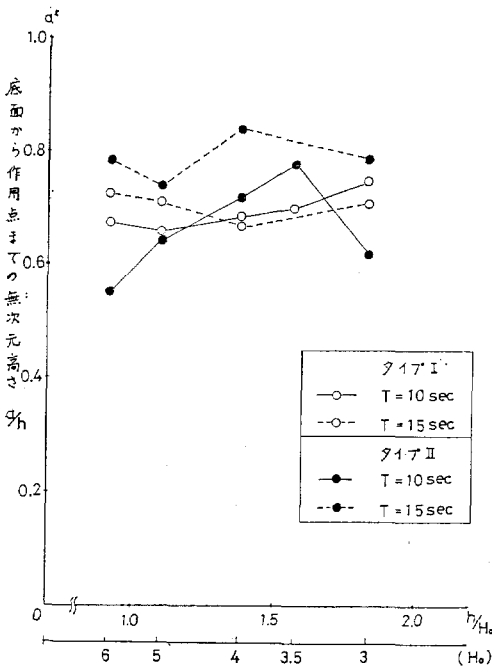


図25 波圧合力の作用点

さが壁体に働く圧力に及ぼす影響について調べたものである。図中にはタイプ V, II, IV の値が記してある。図より、実験の範囲では、遊水部長くなると波圧合力の値が小さくなると言える。碎波の場合、碎波点と消波工の位置関係が重要であり、消波工を沖側へ出すことにより、壁体近くでの碎波が妨げられるからであると考えられる。T=15secの方が、T=10secよりも波圧合力減少の割合が大きいが、これは碎波型の相違によるものである。

3.1.4 波圧合力の作用点と転倒モーメント

$F^*$  の作用点の堤体底面からの高さ  $a$  を水深  $h$  で無次元化したものを  $a^*$  をタイプ I と II について図示したものが図25である。図より、従来の形式(タイプ I)は、碎波点付近では離岸タイプのタイプ II よりも作用点が低いことが指摘できる。これは、離岸タイプの場合には、消波工を飛び越えて直接壁体に当る波のために、静水面より上の波圧が大きくなる事と、タイプ I の静水面より下の波圧が、タイプ II と比べて大きい事に基づいている。

転倒モーメントの無次元量  $M^*$  は次式である。

$$M^* = F^* \cdot a^* = \frac{Fa}{wWh^3}$$

各実験値から  $M^*$  を求めたものが表8である。これを、消波工で被覆された直立堤に働く波圧の公式(9)の場合との比で示すと、表9になる。この比が「現況」では大きく、最大2.7程度まであり、転倒に関しても(9)式では危険であるが、タイプ II では0.8程度と小さく、天端が十分高い場合には、(9)式で十分であると言える。

3.2 越波

各タイプの越波量を図26~27および表10に示す。縦軸には、無次元越波量として、 $q/\sqrt{2gh^3}$  がとってある。 $q$  は、単位幅単位時間当りの越波量、 $g$  は重力加速度である。表11に、従来の型式(タイプ I)の越波量を基準として、各タイプの越波量をタイプ I の場合との比で表した。これらの図表より次の事が指摘される。

タイプ II では、タイプ I の1~2%にまで越波量を減らすことができる。これはタイプ IV より小さい値である。また、天端の低い離岸タイプ「現況」でも、従来の型式「タイプ I」よりも越波量が少なく、その3割以下である。従って、以上の結果から、離岸タイプの方が越波量を減らす働きが大きいと云える。

観察によると、離岸タイプの場合、壁体に当たった水塊は、鉛直上方へ打ち上がるのに対して、従来の型式の場合には、消波工斜面を波が遇上して、そのまま堤内へ越流する傾向が見られた。従って、離岸タイプの場合、越

波量は風の影響を受けやすく、向岸風では越波量の増加が予想されるので、この面での検討が今後に残されている。

ブII, IVは越波量自体が小さく、データのばらつきを考えると、タイプIIとIVの実験値を比較しても意味がないと考えられたからである。

なお遊水部長さと越波量の関係には、触れない。タイ

表8 無次元転倒モーメント

(sec)		10					15			
(m)		3	3.5	4	5	6	3	4	5	6
消	波 工 な し	0.698	1.571	2.419	1.484	1.639	1.530	7.048	2.053	0.899
現	況	0.904	1.850	0.770	0.506	0.458	2.482	2.682	1.308	2.785
タ	イ プ I	0.790	0.781	0.715	0.535	0.465	0.992	1.153	0.793	0.986
タ	イ プ II	0.173	0.394	0.346	0.184	0.158	0.533	0.793	0.449	0.501
タ	イ プ III	0.380	0.468	0.444	0.415	0.364	0.726	1.100	0.619	0.700
タ	イ プ IV	0.158	0.250	0.283			0.261	0.673	0.343	
タ	イ プ V	0.216	0.468	0.349			0.624	1.053	0.583	
設計 公式	重複波の式	0.631								
	$p=1.0wH$	←————— 1.566 —————→				←————— 1.566 —————→				
	$p=1.0wH$	←————— 1.044 —————→				←————— 1.044 —————→				

表9  $p=1.0wH$ の場合との比 ( $M^*$ )

		10					15			
		3	3.5	4	5	6	3	4	5	6
消	波 工 な し	0.67	1.51	2.31	1.42	1.56	1.47	6.70	1.96	0.86
現	況	0.87	1.77	0.74	0.48	0.44	2.38	2.56	1.25	2.66
タ	イ プ I	0.76	0.75	0.63	0.51	0.44	0.95	1.10	0.76	0.94
タ	イ プ II	0.17	0.38	0.33	0.18	0.15	0.51	0.76	0.43	0.48
タ	イ プ III	0.36	0.45	0.42	0.40	0.35	0.70	1.05	0.59	0.67
タ	イ プ IV	0.15	0.24	0.27			0.25	0.64	0.33	
タ	イ プ V	0.21	0.45	0.33			0.60	1.01	0.56	
設計 公式	重複波の式	0.60								
	$p=1.5wH$	←————— 1.5 —————→				←————— 1.5 —————→				
	$p=1.0wH$	←————— 1.0 —————→				←————— 1.0 —————→				

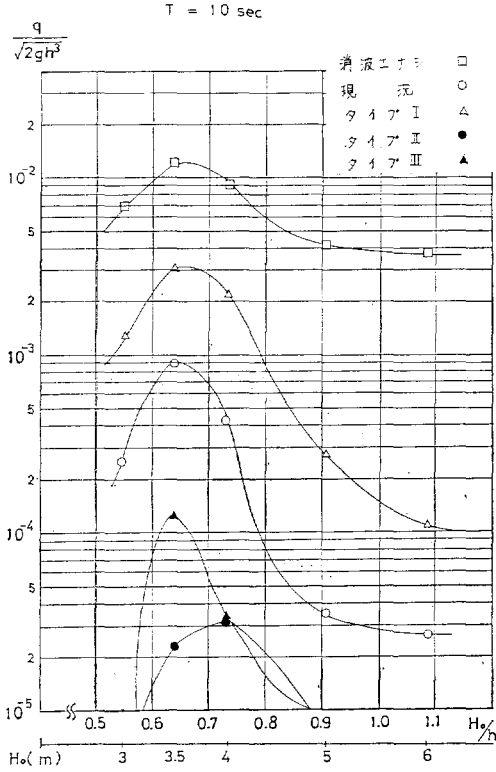


図26 無次元越波量 (T=10sec)

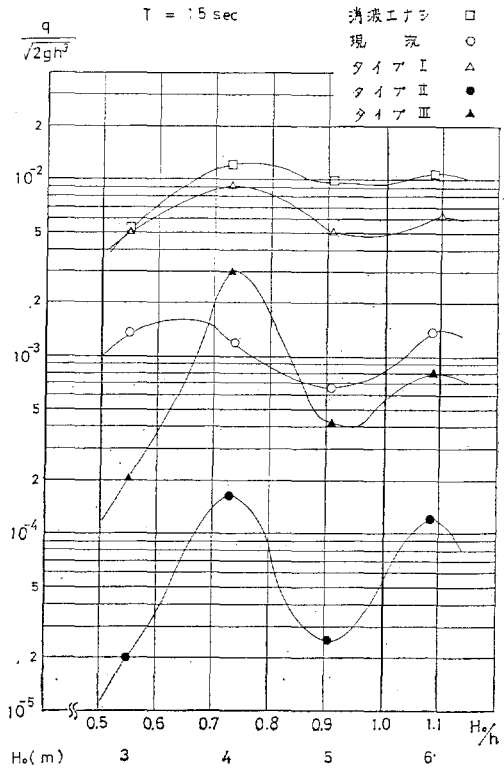


図27 無次元越波量 (T=15sec)

表10 無次元越波量

(sec)	10					15				
	(m)	3	3.5	4	5	6	3	4	5	6
消波工なし		$\times 10^{-3}$ 7.04	$\times 10^{-2}$ 1.20	$\times 10^{-3}$ 9.00	$\times 10^{-3}$ 4.31	$\times 10^{-3}$ 3.78	$\times 10^{-3}$ 5.50	$\times 10^{-2}$ 1.27	$\times 10^{-3}$ 8.85	$\times 10^{-2}$ 1.10
現況		$\times 10^{-4}$ 2.50	$\times 10^{-4}$ 8.91	$\times 10^{-4}$ 4.27	$\times 10^{-5}$ 3.52	$\times 10^{-5}$ 2.69	$\times 10^{-3}$ 1.37	$\times 10^{-3}$ 1.17	$\times 10^{-4}$ 6.43	$\times 10^{-3}$ 1.36
タイプ I		$\times 10^{-3}$ 1.31	$\times 10^{-3}$ 3.02	$\times 10^{-3}$ 2.22	$\times 10^{-4}$ 2.82	$\times 10^{-4}$ 1.05	$\times 10^{-3}$ 5.34	$\times 10^{-3}$ 9.78	$\times 10^{-3}$ 5.11	$\times 10^{-3}$ 6.40
タイプ II		0.00	$\times 10^{-5}$ 2.33	$\times 10^{-5}$ 3.04	0.00	0.00	$\times 10^{-5}$ 2.07	$\times 10^{-4}$ 1.59	$\times 10^{-5}$ 2.44	$\times 10^{-4}$ 1.13
タイプ III		0.00	$\times 10^{-4}$ 1.15	$\times 10^{-5}$ 3.31	0.00	0.00	$\times 10^{-4}$ 2.14	$\times 10^{-3}$ 2.92	$\times 10^{-4}$ 4.13	$\times 10^{-4}$ 8.32
タイプ IV			0.00	$\times 10^{-5}$ 3.72			$\times 10^{-5}$ 5.14	$\times 10^{-5}$ 2.63		
タイプ V			$\times 10^{-5}$ 5.60				$\times 10^{-5}$ 3.49	$\times 10^{-3}$ 1.14		

$$q^*(=q/\sqrt{2gh^3})$$

表11 タイプIの越波量との比

	10					15			
	3	3.5	4	5	6	3	4	5	6
消波工なし	5.37	3.99	4.05	15.27	35.95	1.03	1.30	1.93	1.72
現況	0.19	0.29	0.19	0.12	0.26	0.26	0.12	0.13	0.21
タイプI	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
タイプII	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02
タイプIII	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.04	0.30	0.08	0.13
タイプIV		0.00	0.02			0.01	0.00		
タイプV		0.02				0.01	0.12		

#### 4. 結 言

以上、離岸タイプ消波工の波圧と越波について述べてきたが、ここでその結果をまとめると次のようになる。

①消波工の天端高さが十分あれば、離岸タイプの波圧の大きさは、従来の型式の場合よりも小さい。この結論は、異型ブロック使用量が同体積のものどうしの比較でも変わらない。しかしながら、消波工天端高が低い場合には、条件によって、衝撃圧を生ずるため、従来の型式と比べて、壁体に対する波圧の条件としては、はるかに悪くなっている。

②越波に関しては、離岸タイプの方が有利である。従来の型式「タイプI」との比較をすると、天端の低い場合「現況」で3割以下、十分な天端高があるタイプIIでは1~2%まで越波量が減る。

③今回の実験範囲では、遊水部長さが長くなるに従い壁体に働く圧力が減少する傾向が見られた。越波量に関しては比較が行えなかった。

なお、実験時の観察によれば、離岸タイプの場合、後面法肩付近のブロックの安定が悪いようであり、天端が低い場合には、ころげ落ちる例がしばしば見られた。

離岸タイプ消波工に関して今後残された問題点としては、消波工の適正天端高を求めること、適正遊水部長を求めること、越波に対する風の影響について調べること、更に、海底勾配が急な場合についてその有効性を調べることがあげられる。

実験結果によると、消波工天端の低い「現況」の場合には大きな波圧を生ずるのに対して、天端の高い「タイプII」では、それよりもはるかに小さな波圧しかかからない。天端の高さによる波圧の違いが顕著であった。また、越波の面からは、消波工の静水面上の高さと同様

に、消波工の天端高と壁体の天端高との相対的な関係も重要である。従って、今後の研究の進め方としては、まず、消波工天端高の違いがどの程度波圧の違いとなって現われるのかを調べる（これは、経済的断面決定の上で必要である）及び、越波量と消波工天端の静水面上高さの関係、更に、壁体の天端と消波工の天端高さの相対的な関係の違いによる越波量の差異について調べることが必要である。

遊水部長さの影響に関しては、消波岸壁に関連して、主として反射率の面から種々の研究がなされている。特に、重複波領域では遊水部長さが $0.25L$ 、もしくは、それよりも若干小さめの時反射率が最小になるとされ、不透透壁前面の打上げ波高もまた $0.25L$ 付近で最小になるという実験結果がある<sup>7)</sup>。従って、重複波領域では、越波量を最小にする遊水部長さは $0.25L$ 付近にあることが十分予測される。しかしながら、砕波に対する遊水部の機能に関する実験例は少なく、未知な部分が多い。

（当研究室で現在進行中の研究によると、砕波の場合、最小越波量をもたらす遊水部長さは $0.1L$ 程度となっている）故に、今後、実験の積み重ねにより、砕波領域での最適遊水部長さを求める必要がある。

越波に及ぼす風の影響に関する研究は、まだ緒についたばかりであり、主として鉛直壁の防波堤、護岸の場合の研究を中心に進められている。消波工のついた防波堤の越波と風の関係については未知である。高田によると、鉛直壁の場合、砕波点で浅では、 $10m/sec$ 程度の風が存在により、 $10sec$ の波で16%、 $15sec$ の波では10%程度の越波量の増大が見込まれるが、離岸堤形式消波工を設けた場合には、堤体に当たった波が鉛直上方へ打上がる傾向にあることもあり、もっと多くなる可能性もある。また、越波した波、あるいは、水しぶきが届く距離が、



従来の型式と比べて大きくなることが予想されるので、塩害が増すことも考えられる。故に、このような向岸風の存在下での越波の状況についても、今後の検討が必要である。

#### 参 考 文 献

- 1) 本間仁・堀川清司・長谷直樹：海岸護岸に働く全波力に関する実験的研究，第11回海岸工学講演会講演集 pp.202～207 1964
- 2) 榎本亨・岩田好一郎：堤防越波量に及ぼす離岸堤背後地形の効果に関する実験的研究——離岸堤の効果に関する研究第一報——，第18回海岸工学講演会論文集 pp.269～273 1971
- 3) 合田良実・岸良安治：不規則波に対する護岸の越波流量特性について，第23回海岸工学講演会論文集，pp.176～181 1976
- 4) 土木学会編：水理公式集，昭和46年度改訂版，pp.506
- 5) 合田良実：防波護岸の越波流量に関する研究，運輸省港湾技術研究所報告第9巻4号，pp.3～41 1970
- 6) 社団法人 全国漁港協会：漁港構造物標準設計法，pp.7～18 1976
- 7) 瀬山明・伊川潔：埋立護岸の直立消波構造に関する研究，第25回海岸工学講演会論文集，pp.113～117 1978
- 8) 高田彰：規則波の越波量におよぼす風の影響，第23回海岸工学講演会論文集，pp.170～175 1976