

消波用中空ブロックに関する研究

大阪市立大学教授 工学部 工学博士 永 井 莊 七 郎

1. 研究の目的

この研究の目的は異形コンクリートブロックの消波性、波力に対する安定性などについて水理学的に研究し、最もよく波の圧力を減殺し、しかも波力に対して安定なコンクリートブロックを見出すことである。

2. 異形コンクリートブロックの特長

種々な異形コンクリートブロックに共通したおもな特長は次のごとくである。

(1) 粗度による摩擦抵抗力の増大

異形コンクリートブロックを適当に配列すると、その表面に大きな凹凸を生ずるので、その上を走る波に大きな摩擦抵抗力を与えて、波のエネルギーを減少する。

(2) 透過性による波のエネルギーの吸収

ブロック相互間の間げきに波が透過して、エネルギーを減殺する。

(3) 波の動水圧の減少による耐波性の増大

ブロックが強い波圧を受けないような形に造ることにより、波に対する安定性を増す。

(4) ブロック相互のかみ合わせによる安定性の増大

ブロック相互のかみ合わせがよいため、波力に対して転動および滑動しにくい。このため捨石や直方体ブロックよりも急勾配に積むことができる。

これ以外に施工上の問題では、波による破壊後の補修が容易であるという特長をもっている。

3. 異形ブロックに関する研究の主眼点

上記の特長の中で、法面の粗度は異形ブロックの設置により、捨石、直方体ブロック積などに比較すると相当増大するが、異形ブロックの種類による粗度の変化はあまり期待できない。元来、防波堤の基礎捨石堤、海岸堤防などの表法面における多少の粗度の変化は、波圧、波の遡上あるいは反射にはほとんど影響しないことが理論的にも実験的にも証明できる。

またブロックの角を削って波圧を避けることは、耐波性の構造物として当然考慮すべきことで、この点において特別にすぐれた形状というようなものは考えられない。したがって、他の異形ブロックに比して特にすぐれた消波力をもつブロックがあるとすれば、そのブロックは波圧に対して安定であって、しかも透過性による波のエネルギーの吸収が大きいものでなければならないと考えられる。すなわち消波用異形コンクリートブロックの研究の主眼点は、上記4種の特長の中の(2)と(4)の研究にある。

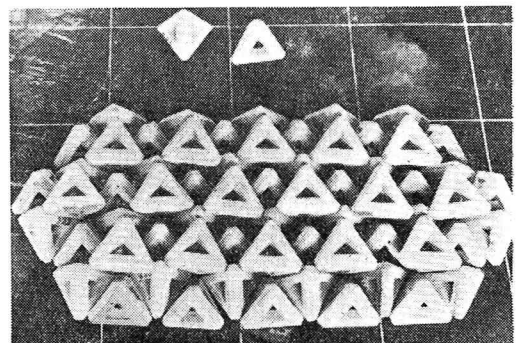
(1) 透過性の増大

透過性を増すにはブロック相互の間隔を広くすればよいのであるが、ブロックの安定性から考えると反対にブロック相互の間隔を狭くしてよくかみ合うように配置することが望ましい。それゆえブロック相互のかみ合わせを悪くしないで、しかも透過性を増すような形にする必要がある。また碎波の衝撃によってブロック相互がしめつけられても、あるいは反対に多少位置が移動しても、透過性が減少しないような形であることが望ましい。

(2) ブロックの安定性の増大

急な勾配の斜面においてブロックが波で転落させられるのは、主として引波のときの吸上げの圧力と引波の動水圧力とによる。それゆえブロックの安定性を増すには、この両圧力が極力小さいような構造にする必要があ

図-1 中空ブロック No. 1 (2層積)



る。ブロックの下部に大きな空けきをもつて、その上面がつまっているような構造では、空けき率は大きい、引波のときに大きな吸上げの圧力が働らく。またブロックの頭部が大きくて、波の動水圧力による回転モーメントが大きい構造のものは安定性が悪い。以上の(1)および(2)の条件を満足するブロックとして図-1に示すような中空ブロックが考えられた。

4. 各種異形ブロックの比較検討

この研究の対象として考えられた在来の異形ブロックは四面体、六脚およびテトラポッドである。これらのブロックの消波性および安定性と新しく考えられた中空ブロックの消波性および安定性を、板張り構造を基準にして比較した。なお参考のため捨石構造の場合をも実験した。

(1) 四面体ブロック

実験を行うまでもなく、図-6(d)に示すような四面体ブロックは、

a) 透過性が最も悪い、b) 波の動水圧を強く受ける、c) 2層目の下向のブロックは引波の吸上げ圧力を強く受け、しかも波の動水圧による回転モーメントが非常に大きい、d) 頂点および稜がとがっているので壊れやすい、すなわち異形ブロックの特長である波に対する透過性および安定性に欠けていて、在来の異形ブロックの中では最も好ましくないものの一つであると考えられるが、次に示す実験結果においても、このことをよく実証している。

(2) 六脚ブロック

このブロックも実験するまでもなく、次のような大きな欠点を有している。

a) 重心が高いので斜面上では容易に転落し、また滑動に対しても抵抗力が非常に小さい。
b) 波の動水圧による回転モーメントが大きいため、波力に対して非常に不安定である。何個かをがっちりと組合わせてしまえば比較的波力に耐えると思われるが、組合わせる前に波がきた場合、あるいは組合わせの中の1個が脱落すると、つぎつぎに撃破されて全体が散乱する。

c) 多数をがっちりと組合わせると空けき率は小さくなり、透過性が悪くなる。

d) 引波による吸上げ圧力も大きい。

以上より四面体ブロックと同様、波力を減殺するためのブロックとしては不適当である。

(3) テトラポッド

四面体の欠点を除いた形がテトラポッドである。これは波圧減殺の効果に関する定量的実験結果あるいは理論的考察の結果考案されたものではなく、ただ跳波および遡上高が小さいという定性的実験結果とブロック相互のかみ合わせがよいので波力に対して安定であるという事実からネイルピック社によって世界的に宣伝されたものである。しかしテトラポッドは異形ブロックの一般的特長の(1)~(4)までの条件を備えていて、在来のブロックの中では最もすぐれた形であると考えられる。このことは次に示す実験結果においても十分証明されている。

しかし(2)と(4)の特長である、透過性と安定性特に2層目のテトラポッドの安定性において、なお好ましくない点をもっている。中空ブロックは、これらのテトラポッドの欠点を補うために考案されたもので、後に示す実験結果は中空ブロックが所期の目的を達したすぐれたブロックであることを証明している。

5. 実験設備および方法

(1) 実験設備

防波堤に働く碎波の圧力に関する研究¹⁾に用いた実験設備をそのまま使用した。すなわち実験水槽は長さ25m、巾2m、深さ1mのコンクリート造りである。実験に用いた波圧計は抵抗線ヒズミ型で、受圧面は直径4cmの円形である。この波圧計を同時に3個ずつ使用し、6エレメント電磁オシログラフに同時波圧曲線を記録させた。波高、波速および周期は3個の電気式波高計を用いて、6エレメント電磁オシログラフにより測定した。

(2) 構造物の種類

実験に用いた構造物の種類は次のとおりである。

(a) 混成防波堤の基礎捨石堤の形が高さ $h_d=37$ cm、天端巾 $B=10$ cm、表法の勾配1:1.5の場合 異形ブロックは1:1の勾配にも積みうるが、強い波圧に対してはやや不安定で転落しやすいので1:1.5勾配を用いた。天端巾の10cmは天端ブロックの安定な配置上設けたものである、ブロックは2層積である。3個の波圧計の位置は、巾2mの中央線上およびその左右に9cmずつ離して、基礎捨石堤天端から2,7,13,18,27cmに設置し、捨石堤の天端上の水深 $h_1=0, 7$ cmおよび13cm、波の周期 $T=1.3$ secおよび1.5secの場合において

図-2 (a) 実験水槽

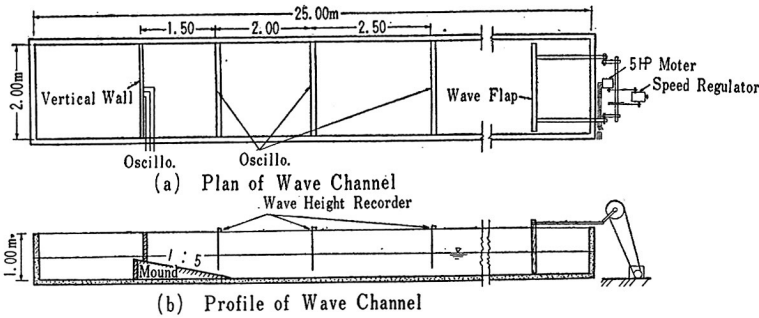


図-2 (b) 波圧計およびその記録装置

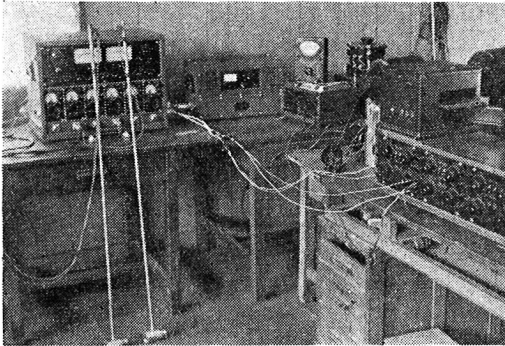


図-3

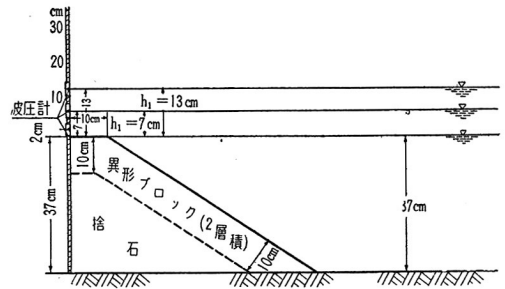


図-4

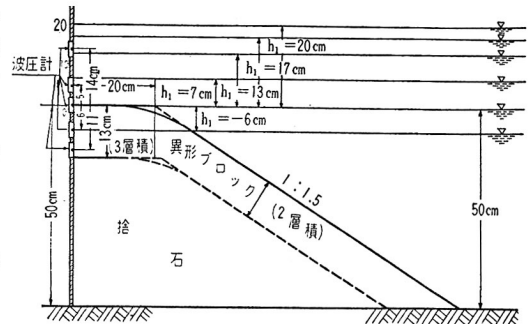
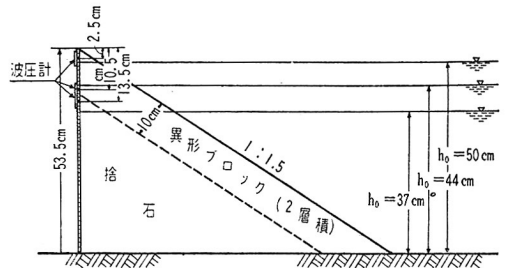


図-5



それらの点における同時波圧を測定した。この実験は混成防波堤の基礎捨石堤の表面あるいは海岸堤防の基礎根固めを異形ブロックで被覆した場合の消波効果およびブロックの安定を調べる目的で行ったものである。

(b) 混成堤の基礎捨石堤の高さ $h_d = 50$ cm に、天端は3層積にして、法は2層積で $1:1.5$ にした場合 この場合は天端巾は大体 $15 \sim 20$ cm くらいの巾になった。水面は捨石堤天端より 6 cm 低い場合、すなわち $h_1 = -6$ cm の場合、 $h_1 = 0, +7, +13, +17$ cm および $+20$ cm の場合において、捨石堤天端より下部および上部の点の最大同時波圧を測定した。この実験は波高が特に大きい場合における異形ブロック背面の直立壁における波圧強度ならびに斜面におけるブロックの安定状況を知るために行ったものである。

(c) 混成堤の外側を直立壁の天端まで異形ブロックで被覆した場合 ブロックは天端まで2層積で様に $1:1.5$ 勾配に積み、水位は図-5に示すごとくである。この実験は異形ブロックで前面を被覆されたときの直立壁における最大同時波圧の減少の程度および越波の減少を調べるためである。

(3) 異形コンクリートブロックの種類と配列

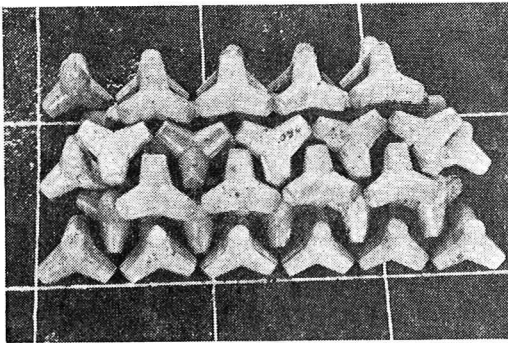
実験に用いた各種コンクリートブロックの特性および配列状況は表-1 および 図-1, 6 に示すごとくである。この実験においてブロックの優劣を比較する場合には、原則としてブロックは2層積とした。それは3層積にすると、どのブロックでも3層目のブロックが非常に不安定になって波によって転倒されやすいからである。テトラポッドについては Neyrpic 社でも同様のことをいっている。

表-1 異形ブロックの特性

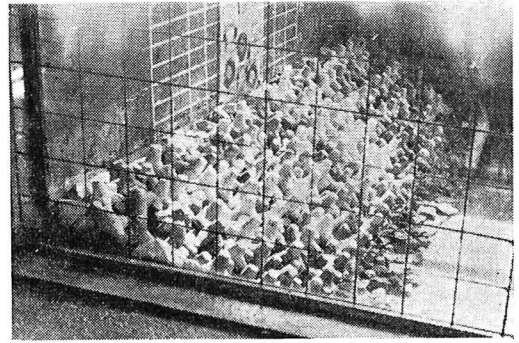
ブロック の種類	1個の体積 (m^3)		1個の 重量 (g)	1個の 現地重 量(t)	間げき率(%)			高さ (cm)	2層積の個数 (巾2×長さ0.76m)			滑動勾配		転倒勾配	
	実体積	空げきを 含めた体積			1個	2層積	乱積		第1層	第2層	計	1層積	2層積	1層積	2層積
テトラポッド	110	110	227~275 平均 251	平均 2.0	0	倒66	50	7.3	倒正 267個	230個 132	497個 399	36°~42°	倒35°~42° 正37°~41°	57°~63°	倒 59° 正 70°
四面体	150	150	298~374 平均 337	2.7	0	50	57	9.3	229	145	374	32°~38°	31°~36°	61°	65°
中空ブロック No.1 (大)	116	155	246~288 平均 267	2.1	25	66	60	7.6	222	112	334	28°~34°	32°~36°	67°	67°~74°
中空ブロック No.2 (小)	90	123	173~226 平均 201	1.6	27	59	58	7.0	363	138	501	33°~34°	33°~34°	65°~69°	70°~71°
中空ブロック No.3 (大)	108	166	224~271 平均 248	2.0	35	70	68	8.0	213	114	327	33°~35°	34°~37°	67°~69°	69°~85°

図-6 ブロックの配列

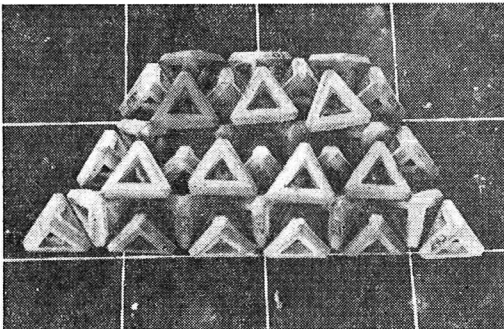
(a) テトラポッド (2層目倒)



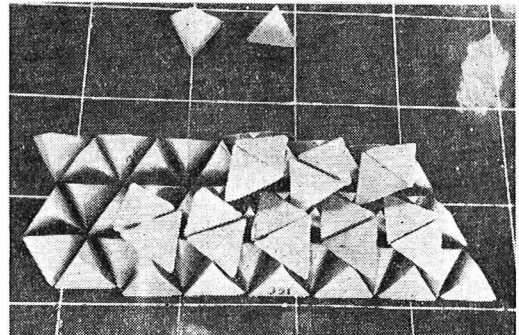
(b) テトラポッド (2層目正)



(c) 中空ブロック No. 3



(d) 四面体ブロック



(4) 実験波

この研究は暴風時におけるコンクリートブロックの消波性および安定性を対象としているので、実験には比較的周期が短かく、波形勾配が大きい波を用いた。実験波の特性および実験と現地との縮尺 1/20 を用いてフルードの相似率から求めた現地の波の特性は表-2のごとくである。

表-2 実験波の特性

	周期 $T(\text{sec})$	波高 $H(\text{cm})$	波長 $L(\text{cm})$	波形勾配 H/L
実験	1.25~1.37	10~22	191~260	0.040~0.085
現地	5.6~6.1	200~440	3 820~5 200	"
実験	1.45~1.57	9~26	241~327	0.038~0.071
現地	6.5~6.9	180~520	4 820~6 540	"

これらの波は直立壁前面の水深（基礎捨石堤の天端における水深） $h_1 = -6 \sim +20 \text{ cm}$ のときには強い弱い差はあるが、完全砕波あるいは部分的砕波として砕けた。

6. 実験結果の相似性

(1) 相 似 律

この実験における波圧および波の特性に関するすべての測定は、巾 2 m の水槽の中央縦断面上において行ったから、実験値は両側壁の影響はほとんど受けていないと考えてさしつかえないであろう。また実験における Reynolds 数は大体 10^6 以上の桁であるから、水の粘性は考慮する必要はない。したがってこの実験には Froude の相似法則を適用しうると考えられる。また波の特性および波の圧力の値の実地の値に対する比率は大体 1/20 であって、実験における波高および波圧の測定上の誤差は最大 1/15~1/20 であるから、この実験の精度は実用上の精度に対して十分であると考えられる。

いま長さおよび水深をそれぞれ l および h で表わし、実験および実際の海における文字にそれぞれ添字 m および p をつけ、実験と海との大きさの比率を n で表わすと、

$$l_m = n l_p, h_m = n h_p \dots\dots\dots (1)$$

時間および圧力強度を t および p で表わせば、Froude の相似率より、

$$t_m = \sqrt{n} t_p, p_m = n p_p \dots\dots\dots (2)$$

実験における水深 h_m 、波高 H_m 、波長 L_m は、

$$h_m = 37 \sim 70 \text{ cm}, H_m = 9 \sim 26 \text{ cm}, L_m = 190 \sim 330 \text{ cm}, T_m = 1.25 \sim 1.57 \text{ sec}$$

であるから、これらを実際の海の値に換算すると、

$$h_p = 7.4 \sim 14.0 \text{ m}, H_p = 1.8 \sim 5.2 \text{ m}, L_p = 38 \sim 66 \text{ m}, T_p = 5.6 \sim 7.0 \text{ sec}$$

になる。また実験に用いた波形勾配は、

$$H_m/L_m = H_p/L_p = 0.038 \sim 0.085$$

である。また砕波の圧力は $p_m \leq 100 \sim 200 \text{ g/cm}^2$ であるから、実際の海における砕波の圧力の $p_p \leq 20 \sim 40 \text{ t/m}^2$ に相当する。それゆえ実験に用いた砕波の特性、最大波圧および水深は、防波堤あるいは海岸堤防の設計に用いられる砕波の特性、最大圧力および水深の大部分を包含している。

(2) 実験結果の実際の海への適用性

この実験に用いた水槽、波圧計、波高計などの実験装置および実験波の特性はすべて「防波堤に働く砕波の圧力に関する研究」¹⁾ に用いたものとほとんど同じである。同論文にも記述したごとく、

(a) この実験で得た直立壁に働く最大同時波圧の合力 P の値は、大部分の場合に実際の防波堤における災害の経験から作られた広井式および Minikin 式の P の値と同一の桁で、実験値に対する両式の誤差はほぼ $\pm 70\%$ 以内であった。また最大同時波圧の鉛直分布が A 型分布 (Minikin が推定したのと同じの分布) をした場合には、最大波圧強度 $p_{\max}$ および合力 P の値は Minikin 式の $p_{\max}$ の値に非常に近い。

(b) 暴風時の波の特性および波圧分布を同時に実測した資料はきわめてわずかで、実験結果を実測値と比較検討するには十分でないが、1935 年および 1937 年に Dieppe 港で行った実測結果と比較すると、最大同時波圧の鉛直分布、 $p_{\max}$ および P ともに比較的良好に実験結果に合っている。

以上の事実より、この実験結果を縮尺 1/20 を用いて、Froude の相似率で実際の防波堤の設計に適用してさしつかえないであろうと考えられる。

7. 実験結果

5. (2) および (3) に記したような構造物の形状および異形ブロックの配置で多数の実験を行ったが、これらの実験において、直立壁に働く砕波の最大圧力強度 $p_{\max}$ および $p_{\max}$ と同時に働く最大同時波圧の鉛直分布並びに合力 P をオッシロ グラフによって測定した。また砕波の状況、跳波および遡上の状況あるいは直立壁天端の越波の状況を写真および肉眼で測定し、ブロックの安定状況および構造物からの反射率を観測した。ブロックの安定は大体 25 回の砕波における条件によって比較した。不安定なブロックは初めの 20 回くらいの砕波で転落し、それ以上回数を増しても、ブロックはしまるだけで新しい転落は起らないからである。

(1) 混成防波堤の形状およびブロックの配置が 図-3 の場合

図-3 のような形状の混成防波堤の基礎捨石部を、板張り、砕石 (粒径 $d = 2.8 \sim 7.3 \text{ cm}$)、テトラポッド 2 層積で、上層を逆さ (倒) にした場合および正位置 (正) に置いた場合、四面体 2 層積、中空ブロック No. 1, No. 2 および No. 3、並びに四面体 1 層積について実験した結果を示すと 表-3 および 4 のようである。四面体 1 層積の場合は砕波によってブロックが転倒あるいは移動するので、板の上にモルタルで固定し、四面体の頂面の形

表—3 各種異形ブロックの実験結果の比較 (図—8 および 9 の場合)

実験波の特性 $T=1.25\sim 1.37$ sec, $L=1.91\sim 2.52$ m, $H=10\sim 19$ cm, $H/L=0.040\sim 0.082$ $T=1.45\sim 1.55$ sec, $L=2.41\sim 2.82$ m, $H=9\sim 16$ cm, $H/L=0.038\sim 0.062$ 波の $T_m=1.5$ sec ($T_p=6.7$ sec)

基礎捨石堤 の構造	h_1 (cm)	H (cm)	H/L	砕波状況	最大波 圧強度 $\rho_{\max}$ (g/cm ²)	比率 (%)	最大同 時波圧 の合力 P (g/cm)	比率 (%)	ブロックの 安定度	力積 (g·cm/sec)	力積/ 運動量 (%)	エネルギー 比 (%)	遡上高 Ru (cm)	反射率 (%)
板張り	7.0	13	0.049	砕波し、跳波 1 m 以上	70	100	452	100	—	355×10^3	61.7	38.0	23~26	45
	13.0	15	0.053	砕波し、跳波大	102	100	510	100	—	—	—	—	27~32	28
砕石	7.0	12	0.059	砕波し、跳波 1 m 以上	80	114	331	74	—	—	—	—	16~18	29
	13.0	15	0.052	弱く砕波、跳波 50 cm	30	30	405	79	—	—	—	—	25~30	21
テトラポッド (上層倒)	7.0	14	0.054	砕波し、跳波 30~50 cm	80	114	376	83	転倒	—	—	—	21~26	54
	13.0	17	0.062	砕波になる直前	23	23	291	57	—	—	—	—	22~25	28
テトラポッド (上層正)	7.0	15	0.054	砕波し、跳波 50 cm	60	86	292	66	上層が動く	314×10^3	54.6	29.8	21~23	36
	13.0	16	0.056	砕波せず、跳波ほとんど	85	83	441	87	—	—	—	—	22~25	27
四面体 (上層倒)	7.0	13	0.053	砕波し、跳波 50 cm ^{なし}	60	86	302	67	頂点のブロックがわずかに不安定、一部転落動く	189×10^3	34.4	11.8	21~26	24
	13.0	15	0.060	砕波し、跳波 40 cm 以下	60	59	588	115	—	—	—	—	25	33
中空ブロック No.1 (大)	7.0	12	0.045	砕波しにくい、跳波 50 cm	60	86	242	54	安定	127×10^3	21.3	4.5	16~18	37
	13.0	16	0.059	砕波せず、重複波に近い	15	15	216	42	—	—	—	—	20	20
中空ブロック No.2 (小)	7.0	13	0.051	砕波し、跳波 1 m 以上	70	100	314	70	大きく動揺	—	—	—	20~23	36
	13.0	15	0.057	砕波せず、跳波なし	26	26	400	78	わずかに動揺	—	—	—	28~33	10
中空ブロック No.3 (大)	7.0	12	0.046	砕波せず、遡上する	40	57	248	55	動揺して落下	—	—	—	26	30
	13.0	15	0.055	砕波せず、水量が多い	35	34	476	93	—	—	—	—	20~24	33
四面体 1層固定	7.0	13	0.051	強く砕波し、跳波 1 m	50	71	222	49	—	173×10^3	29.7	8.8	21~23	38
	13.0	15	0.056	大きく砕波する	41	40	473	93	—	—	—	—	25~30	38

表—4 各種異形ブロックの実験結果の比較 (図—10 および 11 の場合)

波の周期 $T_m=1.3$ sec ($T_p=5.8$ sec)

基礎捨石堤 の構造	h_1 (cm)	H (cm)	H/L	砕波状況	最大波 圧強度 $\rho_{\max}$ (g/cm ²)	比率 (%)	最大同 時波圧 の合力 P (g/cm)	比率 (%)	ブロックの 安定度	力積 (g·cm/sec)	力積/ 運動量 (%)	エネルギー 比 (%)	遡上高 Ru (cm)	反射率 (%)
板張り	7.0	14	0.063	大きく砕波	65	100	452	100	—	262×10^3	44.4	19.7	26~31	32
	13.0	18	0.073	大きく砕波	58	100	725	100	—	—	—	—	35~37	22
砕石	7.0	15	0.072	砕波し、跳波 1.5 m	75	115	375	83	—	—	—	—	28~31	36
	13.0	18	0.082	砕波せず	55	95	329	45	—	—	—	—	35~40	33
テトラポッド (上層倒)	7.0	15	0.063	砕波し、跳波 1 m 以上	65	100	481	106	上層のテトラポッドが転倒する	—	—	—	31~36	40
	13.0	18	0.078	砕波せず	37	64	513	71	—	—	—	—	35~40	31
テトラポッド (上層正)	7.0	15	0.068	砕波する	80	123	400	89	安定	129×10^3	24.0	5.8	31~36	29
	13.0	19	0.079	砕波せず	29	50	417	58	—	—	—	—	30~40	20
四面体 (上層倒)	7.0	15	0.058	完全砕波、跳波 1 m	60	92	366	81	不安定、数個のブロック落下	189×10^3	30.6	9.4	26~31	24
	13.0	18	0.069	砕波直前、引波大	40	69	548	76	—	—	—	—	35~37	33
中空ブロック No.1 (大)	7.0	14	0.058	弱く砕波、跳波 1.5 m	75	115	343	76	安定	87×10^3	13.9	1.9	26	33
	13.0	18	0.077	小さい波、砕波せず	16	28	192	27	—	—	—	—	30~32	33
中空ブロック No.2 (小)	7.0	14	0.055	完全砕波、跳波 1 m	65	100	274	61	頂部ブロックの一部動揺	—	—	—	26~31	24
	13.0	18	0.072	砕波せず	24	41	365	50	不安定	—	—	—	36~41	17
中空ブロック No.3 (大)	7.0	15	0.064	砕波せず、遡上する	30	46	105	23	一部動揺	—	—	—	21	31
	13.0	17	0.073	砕波せず、水量が多い	32	55	432	60	一部落下	—	—	—	30	36
四面体 1層固定	7.0	14	0.062	強く砕波	85	131	402	89	—	184×10^3	29.4	8.6	25	20
	13.0	18	0.072	強く砕波	39	67	527	73	—	—	—	—	30~35	50

状が図—3の基礎の寸法に等しくなるようにした。この実験はブロックの粗度(凹凸)のみによる消波効果の影響を調べるために行ったものである。

表—3および4における力積は直立壁に働いた砕波の圧力の力積で、これと砕波の全運動量に対する比を求め、これより砕波の全エネルギーに対する直立壁に達した砕波のエネルギーの比を、次のようにして近似的に求めた。

砕波の1周期間における運動量は $\rho Q \omega$ である。

ここに ρ : 水の密度, ω : 砕波の伝播速度; 砕波の水分子の速度, $Q=4h_0^2\sqrt{H/3h_0}$ である。この運動量は構造物に働く全力積 $\int_0^h \int_0^T \rho p dt dh$ に等しい(防波堤に働く砕波の圧力に関する研究参照)。ゆえに一般に直立壁における力積と砕波の運動量との比は次式で表わされる。

$$\frac{\int \rho p dt dh}{\rho Q \omega} = \alpha, \quad 0 < \alpha \leq 1$$

$$\therefore \int \rho p dt dh = \alpha \cdot \rho Q \omega$$

ここに $\omega = \sqrt{2.28 gH}$ であるから、

$$\iint p dt dh = \rho \times 4 h_0^2 \sqrt{\frac{2.28 g}{3 h_0}} \times \alpha H$$

ゆえに直立壁に衝突した有効運動量 $\alpha \cdot \rho Q \omega$ は波高が αH なる砕波の運動量に等しい。この波のエネルギー $E_e = \frac{1}{8} \rho g (\alpha H)^2$ であるから、砕波の全エネルギー E に対して、直立壁に衝突した波のエネルギー E_e の比は

$$\frac{E_e}{E} = \frac{\frac{1}{8} \rho g (\alpha H)^2}{\frac{1}{8} \rho g H^2} = \alpha^2$$

である。

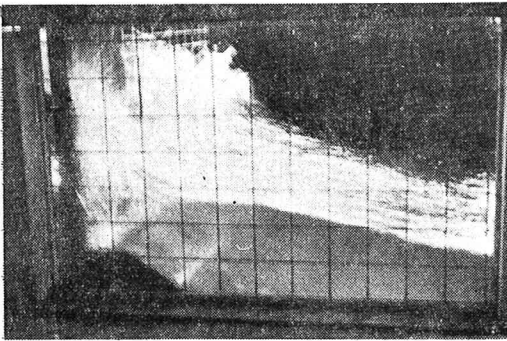
表-3 および 4 によるとテトラポッドおよび中空ブロックを用いた場合には、 $p_{\max}$ および P が減少しているが、その減少の割合は $h_1=13$ cm のときの方が大きい。一般に異形ブロック上の水深が浅い場合には、ブロックの凹凸すなわち粗度が大きく影響するが、水深が深くなると粗度よりも透過性が大きく影響してくる。それゆえ、異形ブロックの消波効果はブロック上の水深がある程度以上深くなったときにいちじるしくなる。また中空ブロック No. 1 は中空ブロック No. 2 および No. 3 ならびにテトラポッドの上層が正および倒の場合のいずれよりも $p_{\max}$ および P の減少率が大きい。特に $h_1=13$ cm のときの P の値は、中空ブロック No. 1 の場合にはテトラポッドの場合の 1/2 あるいはそれ以下に減少して、中空ブロック No. 1 が他のブロックに比して非常に大きな消波能力をもっていることを示している。

斜面におけるブロックの安定性は、テトラポッドの上層を逆さに置いた場合は、非常に安定度が悪いので問題にならないが、上層を正すなわち上向に置いた場合には、中空ブロック No. 1 とほとんど同程度の安定性をもっている。中空ブロック No. 2 は重量が小さいため、中空ブロック No. 3 は間げきが過大であるため No. 1 より安定性が悪い。

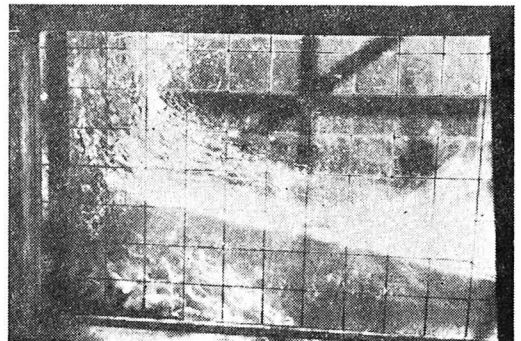
直立壁における遡上高および反射率は中空ブロックとテトラポッドとは大差がないが、遡上高は中空ブロック No. 1 の方が一般に小さい。図-7 は $T \approx 1.5$ sec, $H=15 \sim 17$ cm, $H/L=0.056 \sim 0.062$ の砕波における直立壁に沿うた遡上高を各種ブロックについて比較したものの1例である。この写真でもわかるように中空ブロック No. 1 を用いた場合の遡上高は他の場合に比してかなり小さい。

図-7 各種ブロックを用いた場合の砕波状況の比較

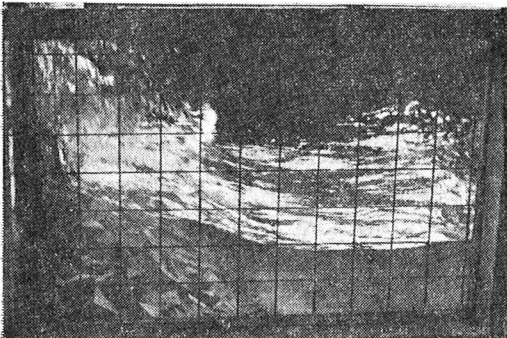
(a) 板 張 り



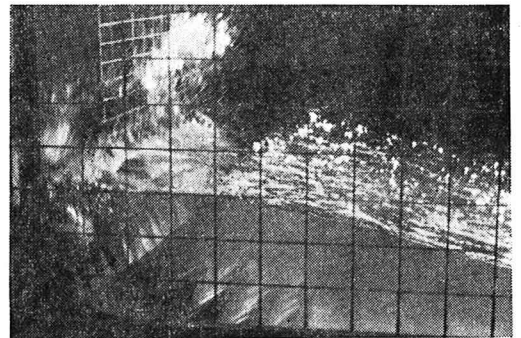
(b) テトラポッド (2 層目倒)



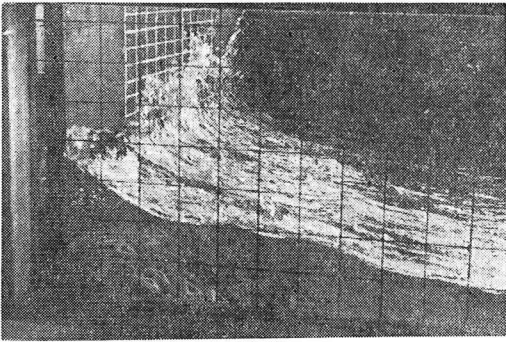
(c) 四面体ブロック (2 層目倒)



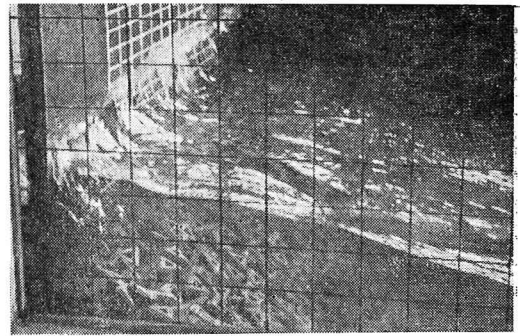
(d) 四面体ブロック (1 層モルタルで固定)



(e) 中空ブロック No. 1 (2 層積)



(f) 中空ブロック No. 2 (2 層積)



つぎに 表-3 および 4 に示した各実験における直立壁に働く最大同時波圧の鉛直分布を示すと 図-8~11 のごとくである。これらの図にははん雑を避けるため、板張り、テトラポッドの正および倒、四面体および中空ブロック No. 1 の場合だけを記入した。

図-8 最大同時波圧

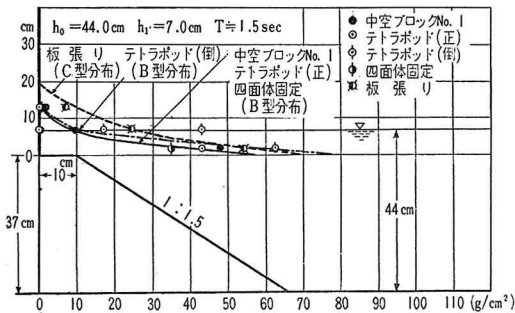
 $T=1.5 \text{ sec}, h_1=7 \text{ cm}$


図-10 最大同時波圧

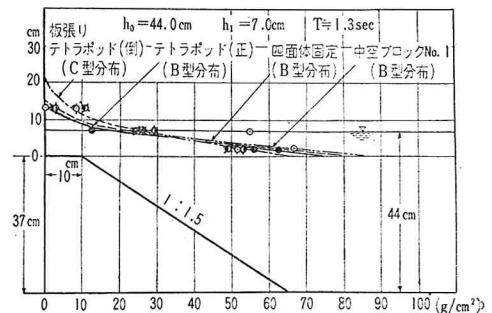
 $T=1.3 \text{ sec}, h_1=7 \text{ cm}$


図-9 最大同時波圧

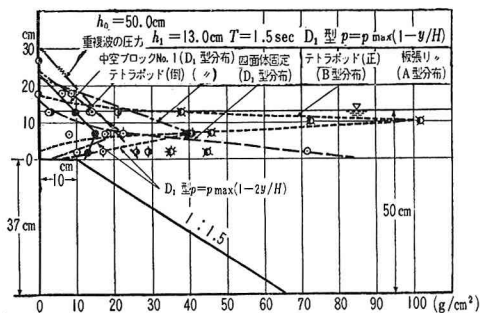
 $T=1.5 \text{ sec}, h_1=13 \text{ cm}$


図-11 最大同時波圧

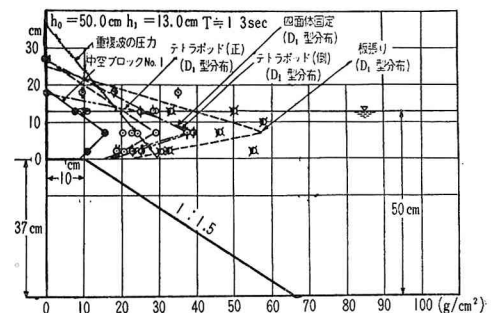
 $T=1.3 \text{ sec}, h_1=13 \text{ cm}$


図-9 および 11 によると、直立壁前面の水深 $h_1=13 \text{ cm}$, $h_1/H=0.87\sim0.72$ になると、異形ブロックの消波効果は非常にいちじるしくなり、 $p_{\max}$ および P も急に減少している。特に中空ブロック No. 1 の場合は波圧の減少がいちじるしく、重複波の圧力よりはるかに小さい。

(2) 混成防波堤の形状およびブロックの配置が 図-4 の場合

この実験は直立壁下部の前面を異形ブロックで被覆した場合に、被覆された直立壁の部分における碎波の圧力の減少、直立壁基部の根固めとしてブロックを配置した場合 (図-3 の場合) との碎波の最大同時圧力の比較を行うために行ったもので、この実験結果を総括すると 表-5、直立壁における最大同時波圧を示すと 図-12~20 のごとくである。

表—5 中空ブロックと No. 1 テトラポッドの消波効果および安定度の比較

 $T_m \approx 1.5 \text{ sec}$ ($T_p \approx 6.7 \text{ sec}$)

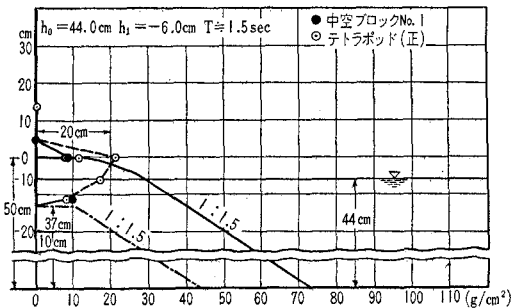
(図—12~20 の場合)

基礎捨石堤 の 構 造	h_0 (cm)	h_1 (cm)	H (cm)	H/L	砕 波 状 況	最大波 圧強度 $k_{\max}$ (g/cm^2)	比率 (%)	最大同時 波圧の合 力 P (g/cm)	比率 (%)	ブロックの安定度	崩上高 Ru (cm)	反射率 (%)
中空ブロック No. 1 (天端 3 層積 法面 2 層積) $h_d = 50 \text{ cm}$	44.0	-6.0	13	0.048	天端付近で砕波し、跳波 30 cm 以下	10	50	146	78	安 定	5~10	21
	50.0	0.0	15	0.050	大きく砕波し、直立壁基部へ突込む、跳波 1.5 m	75	100	774	97	不安定 (動揺して、10個転落)	10~15	35
	57.0	+7.0	20	0.068	天端上 10 cm くらいで砕波し、跳波 2 m くらい	85	85	1735	87	不安定 (わずかに動揺、4 個転落)	30~35	36
	63.0	+13.0	22	0.067	天端上 15 cm くらいで砕波し、跳波 2 m くらい	90	95	1935	85	不安定 (わずかに動揺、3 個転落)	37~42	43
	67.0	+17.0	24	0.072	波頂が崩れ波のまま砕波し、跳波 2 m くらい	75	88	1785	86	不安定 (わずかに動揺、一部転落)	—	42
	70.0	+20.0	23	0.068	崩れ波の部分的砕波、跳波 1 m	75	83	1748	76	不安定 (動揺して、5 個転落)	—	54
テトラポッド (正) (天端 3 層積 法面 2 層積)	44.0	-6.0	13	0.049	直立壁基部で巻いて砕ける、跳波 15 cm	21	100	188	100	安定 (上層数個わずかに動揺)	10~15	23
	50.0	0.0	16	0.055	完全砕波し、天端上 10 cm の所へ突込む、跳波 1 m	75	100	794	100	安定の限界 (上層わずかに動揺、数個転落)	20~25	35
	57.0	+7.0	20	0.064	大きく砕波し、天端上 15 cm の所へ突込む、跳波 2 m	101	100	2000	100	不安定 (上層 10 個くらい動揺、3 個転落)	25~30	46
	63.0	+13.0	24	0.081	砕波し、天端上 15 cm の所へ突込む、跳波 2 m	95	100	2290	100	不安定 (全体的に多数転落)	30~35	51
	67.0	+17.0	24	0.080	砕波し、天端上 20 cm の所へ突込む、跳波 1 m	85	100	2065	100	非常に不安定 (多数動揺して転落)	—	51
	70.0	+20.0	26	0.080	砕波し、天端上 25 cm の所へ突込む、跳波 1 m	90	100	2302	100	不安定 (多数動揺して、10 個転落)	—	48

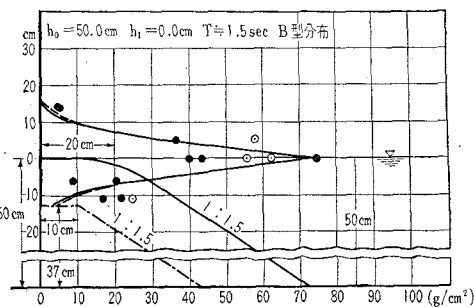
 $T_m \approx 1.3 \text{ sec}$ ($T_p \approx 5.8 \text{ sec}$)

中空ブロック No. 1	44.0	-6.0	16	0.034	法脊付近で波砕し、跳波 10 cm	19	106	205	93	安 定	13~18	26
	50.0	0.0	18	0.078	巻波で砕波し、跳波 20 cm	65	100	780	94	安定の限界 (2 個転落)	15~20	24
	63.0	+13.0	22	0.086	完全砕波し、跳波 2 m	75	141	1650	147	不安定 (わずかに動揺して、6 個転落)	40~45	30
テトラポッド (正)	44.0	-6.0	15	0.066	法脊付近で巻いて砕け、跳波 10 cm	18	100	221	100	安定の限界 (7 個転落)	10~15	23
	50.0	0.0	19	0.079	砕波して直立壁に強くぶつかる、跳波 1~1.5 m	65	100	832	100	不安定 (上層動揺して、数個転落)	18~23	30
	63.0	+13.0	20	0.085	部分的砕波し水面上 15 cm の所へ突込む、跳波 1 m	53	100	1121	100	不安定 (上層動揺して、多数転落)	40~45	44

図—12 直立壁における最大同時波圧



図—13



図—14

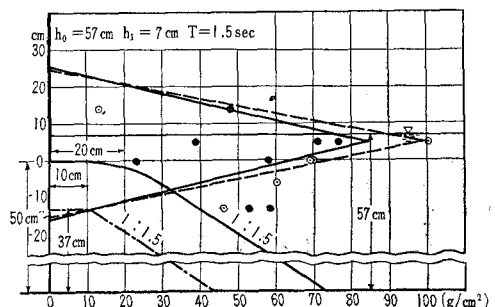


図-15 直立壁における最大同時波圧

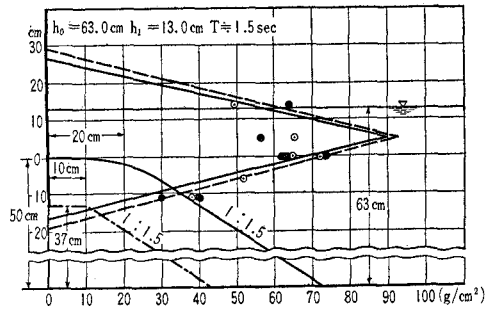


図-16

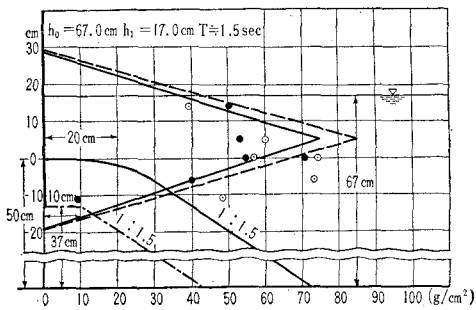


図-17

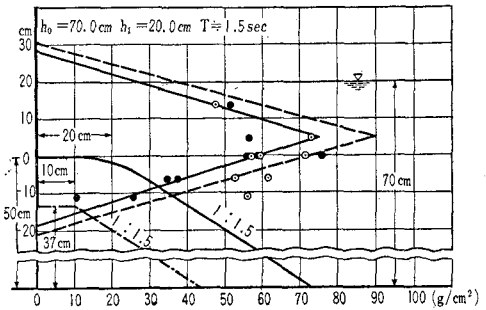


図-18 直立壁における最大同時波圧

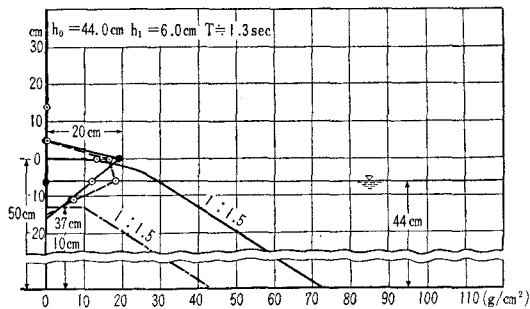


図-19

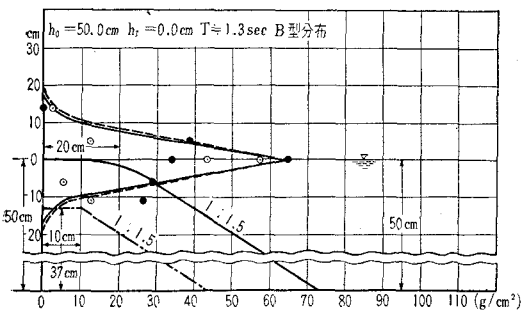


図-20

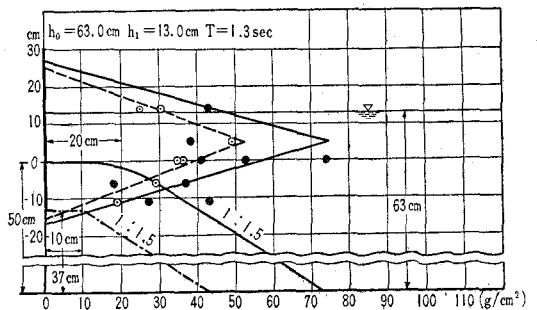


図-12, 13, 18 および 19 は 図-8, 9, 10 および 11 の基礎捨石堤の表面に天端は3層, 斜面は2層に中空ブロック No. 1 あるいはテトラポッドを置いた場合である。これを対照比較すると,

(a) $h_0=44$ cm の場合 $h_d=37$ cm の捨石堤の外側を異形ブロックで被覆したために, 直立壁下部における最大圧力は 60 g/cm^2 であったものが $7\sim 8 \text{ g/cm}^2$ に減少しているが, 水面から上部は反対に増大している。最大同時波圧の合力 P は中空ブロック No. 1 では 60% に, テトラポッドでは 64% に減少している。

(b) $h_0=50$ cm の場合 $h_d=37$ cm のときには, $h_1=13$ cm, $h_1/H=0.72\sim 0.87$ で, 波のエネルギーは異形ブロックによって非常によく吸収され, 弱く衝突するだけである。特に中空ブロック No. 1 のときは全く砕波しない。したがって波圧は非常に小さく, 重複波圧よりもさらに小さくなるが, これに反し $h_d=50$ cm に高くした場合には, そのために波は大きく砕波して激しく直立壁に衝突するようになり, 波圧合力 P は中空 No. 1 では 216 g/cm が 794 g/cm に, テトラポッドでは 441 g/cm が 794 g/cm に増大する。特に中空ブロックの場合には, ブロックで被覆した直立壁の下部においてさえ波圧はわずかではあるが増大し, せっかく捨石堤を高くし, 直立壁前面をブロックで被覆してもその効果は全くなく, 工費を増してかえって逆に非常に悪い結果をうるということを示している。このことは 図-23 および 26 の場合においても同様であって, 非常に興味ぶかいことである。

図-14, 15, 16 および 17 の場合には, 中空ブロック No. 1 とテトラポッドを用いたときの波圧合力 P の比は $85\sim 76\%$ であるが, h_1 を 20 cm 以上に増すと, 中空ブロックの消波効果は急に増大し, 両者の比はさらに小さくなると考えられるが, 水槽の深さの関係で $h_1>20$ cm にすることができなかった。

ブロックの安定度については, 水深 h_0 が h_d より小さく, 砕波が斜面上で起る場合には, 両者の安定度はほぼ同じくらいであるが, $h_0>h_d$ になり, 砕波が直立壁に直接衝突するようになると, テトラポッドは引き波の吸上げ圧力で浮揚し, 転落しやすくなるので, 中空ブロックより不安定になる。

(3) 混成防波堤の直立壁の天端までブロックを積んだ場合(図-5 の場合)

図-5 のように直立壁の天端まで中空ブロック No. 1 またはテトラポッドを2層積にした場合に, 直立壁に働く砕波の圧力, ブロックの安定性および越波の状況を測定した。これらの実験結果を総括したものが 表-6 である。直立壁に働く最大同時波圧の分布を示すと 図-21~26 のごとくである。

表-6 および 図-21~26 によると, この場合においても (1) および (2) の場合におけると同様, 波が斜面上で砕けると, あるいはブロック上の水深が浅いときには, 中空ブロック No. 1 の最大同時波圧の合力 P お

表-6 中空ブロック No. 1 とテトラポッドの消波効果および安定度の比較

$T=1.5$ sec

(図-21~26 の場合)

基礎捨石堤の構造	h_0 (cm)	H (cm)	H/L	砕波状況	最大波圧強度 $P_{\max}$ (g/cm^2)	比率 (%)	最大同時波圧の合力 P (g/cm)	比率 (%)	ブロックの安定度
中空ブロック No. 1	44.0	13	0.047	天端下 10 cm の所で砕波し, 跳波 10 cm	11	65	156	93	安定
	47.0	15	0.053	天端より 1~2 cm 下で砕波し, 跳波 30 cm	24	104	274	101	安定
	50.0	17	0.056	テトラより砕波の高さ低く天端にぶつかる, 跳波 60 cm	37	63	407	51	やや不安定(上層の法肩より 2,3 列目が動揺して 3 個転落)
テトラポッド (正)	44.0	14	0.049	天端下 10 cm の所で砕波し, 跳波 20 cm	17	100	169	100	不安定(砕波点の付近が大きく動揺して 7 個転落)
	47.0	16	0.056	天端付近へ突込み砕波の大部分は堤内地へ入る, 跳波 50 cm	23	100	270	100	やや不安定(法肩より下 2 層目 2 列目がわずかに動揺して 3 個転落)
	50.0	17	0.057	天端で砕波, 跳波 80 cm	59	100	793	100	大体安定(頭部がわずかに動揺する程度, 転落しない)

$T=1.3$ sec

中空ブロック No.1 (大)	44.0	15	0.063	直立壁前面 15 cm の法面で完全砕波, 跳波 30 cm	14	88	105	46	不安定(上層の 2,3 列目が動揺して 6 個転落)
	47.0	17	0.068	天端下 3~5 cm くらいの所で砕波が突込む, 跳波 30 cm	28	93	328	95	やや不安定(上層の 2,3 列目が動揺して 3 個転落)
	50.0	18	0.075	堤内地(天端より 10 cm)で巻いて砕波, 跳波 40 cm	42	53	363	51	大体安定(上層わずかに動揺して転落なし, テトラのときより越波量少ない)
テトラポッド (正)	44.0	16	0.069	直立壁前 15 cm の所で砕波, 跳波 15 cm	16	100	230	100	大体安定(わずかに動揺して 3 個転落)
	47.0	18	0.078	天端で完全砕波, 跳波 50 cm	30	100	346	100	不安定(上層の 2 列目が大きく動揺して 19 個転落)
	50.0	19	0.080	堤内地(天端より 15 cm)で砕波, 跳波 50 cm	80	100	712	100	安定(砕波が天端を越える)

図-21 直立壁における最大同時波圧

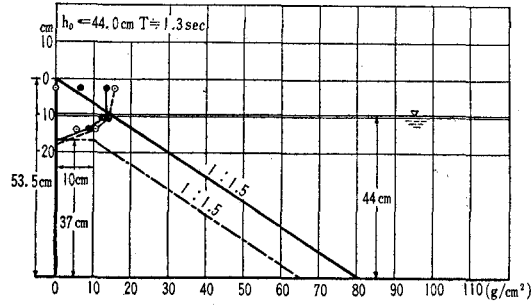


図-22

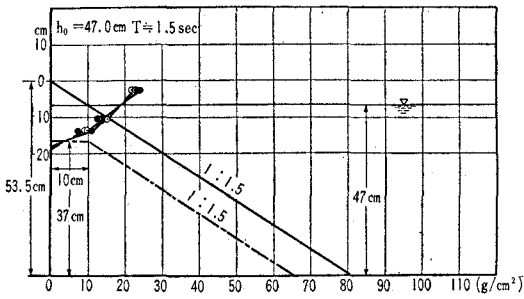


図-23

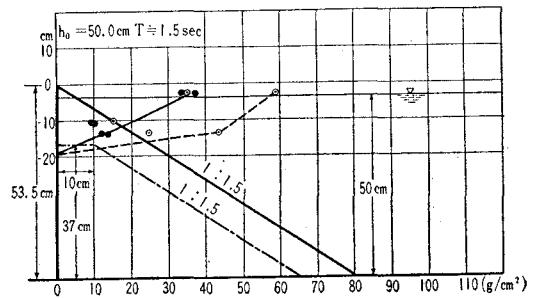


図-24 直立壁における最大同時波圧

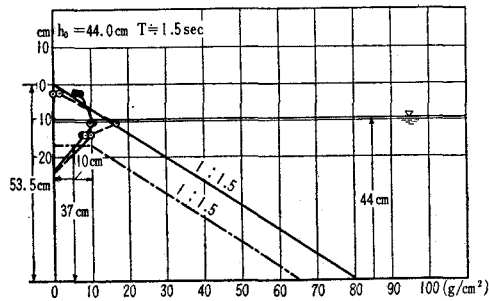


図-25

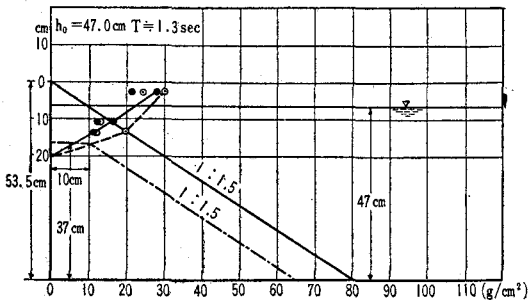
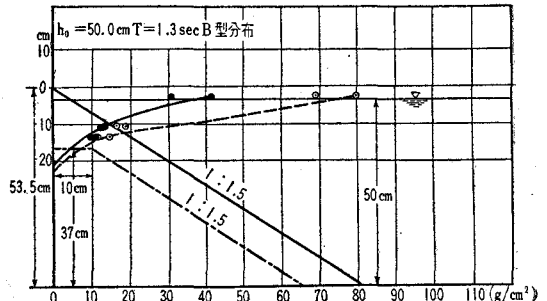


図-26



よび最大波圧強度 $p_{\max}$ はテトラポッドの場合よりわずかに小さいだけであるが、 $h_0=50$ cm に増大して、砕波の圧力が増大すると、 P および $p_{\max}$ と中空ブロック No. 1 のときの値はテトラポッドのときの値の約 $1/2$ に減少し、中空ブロック No. 1 の消波効果は非常に顕著になる。

図—21~26 の場合のようにブロックがつねに水面にある場合、すなわち直立壁前面のブロック上の水深が浅い場合には、中空ブロックの安定度はテトラポッドとほぼ同程度である。越波の量は中空ブロックを用いた場合の方が一般に少ない。

最近 Neyrpic 社などの推ししょうによって、図—21~26 の場合のように直立壁の天端まで異形ブロックを 2 層積することが、直立壁に働く波圧を減少し、同時に越波量を減少して有利であると考えられる傾向があるようであるが、この考え方は 図—12, 18, 21, 22, 24, 25 などのように砕波が斜面上で起るような場合には正しいが、砕波が直立壁に直接衝突する場合あるいは 図—23, 26 などのように砕波が直立壁天端に衝突するような場合には、誤りであつて、かえって $p_{\max}$ および P を増大するから、工費をかけて防波堤を危険にさらす結果を生ずる。前者は一般に潮位が低く、砕波が小さい場合で、後者は暴風時に潮位が高く、砕波が大きい場合に生ずることが多いことを考えると、防波堤、海岸堤防の設計者は慎重に考慮する必要がある。参考までに Neyrpic 社ではテトラポッドを使用した場合の砕波の圧力に関する研究は行っていないことを付記しておく。

8. 実験結果の検討

(1) 中空ブロックの消波効果について

多数の実験結果から明らかなように、中空ブロック No. 1 はどのような条件においても常にテトラポッドよりも波力をよく吸収する。例えば直立壁における最大同時波圧の合力は、中空ブロック No. 1 を用いた場合にはテトラポッドを用いた場合に比してほぼ $15\sim 50\%$ 小さい。また直立壁における遡上高および反射率も一般にテトラポッドを用いた場合より小さい。

このように中空ブロック No. 1 の消波効果が特にすぐれているのは、2 層積にした場合および乱積にした場合に、遮蔽された間げきが非常に大きいことおよび、その間げきが波の衝撃やブロックの多少の移動によつては変化しないことによると考えられる。

(2) 中空ブロックの中空の大きさについて

中空ブロックによるすぐれた消波効果は、その中空にあるが、消波上最も有効な中空の大きさは、波の特性によって違つて、波高が小さい波では、ブロック 1 個の間げき率が 35% くらいのものが 25% くらいのものより消波効果がやや大きいようである。

しかし波高が約 3.50 m 以上、波形勾配が 0.07 前後の暴風時の波の場合には、ブロック 1 個の間げき率が 25% のものが消波効果はるかに大きいようである。

またブロック 1 個の間げき率を 35% にすると、稜の厚さが小さくなり、ブロック据付けの際あるいはブロック相互の衝突の際に稜が折損するおそれがある。それゆゑ水理学的条件およびブロックの強度上の条件より、ブロック 1 個の間げき率は 25% くらいが適当であると考えられる。表—1 に示したように、このような中空ブロックを 2 層積および乱積にした場合の間げき率はほぼ 66% および 60% である。

(3) 中空ブロックの安定性について

防波堤あるいは海岸堤防に種々の砕波を衝突させた多くの実験における観測の結果によると、斜面上に 2 層積された異形ブロックが砕波によつて斜面上を転落せられるのは、大別して次の 2 つの場合である。

(a) 中空ブロックおよびテトラポッドの場合において、砕波によつて最初に移動させられるのは上層のブロックであつて、下層のブロックは互いに相接し、あるいはかみ合っているのと、上層のブロックによつて被覆されているので、なかなか動かない。下層ブロックの間げきにかみ合った上層のブロックが波によつて斜面上を転動させられるのは、少なくともその重心が下層ブロックの頂面上に押上げる必要がある。この押上げる力すなわち吸上げ圧力は引波によつて起るわけで、引波の吸上げ圧力がブロックの水中重量より大きければ、ブロックは浮上し、引波の動水圧によつて斜面上を転落する。

(b) 砕波の衝撃圧力によつて上層ブロックが斜面上に押上げられ、それが引波の動水圧によつて転落させられる。

(a) の場合は一般に水深が深い場合、(b) の場合は水深が浅くて、砕波が斜面上のブロックに直接突込む場合に起る。以上より斜面上のブロックが安定であるためには、ブロックに働く引波による吸上げ圧力および引波の動水圧による転倒モーメントが小さいこと、並びに砕波が直接ブロックに衝突したときの衝撃圧力が小さいこと

が必要である。

逆さに置かれた中空ブロックはテトラポッドなどに比して引き波による吸上げ圧力は小さい。また正位置に置かれた場合、中空ブロック No. 1 とテトラポッドとは、引き波の動水圧の受圧面積はほぼ同じであるが、重心の位置はテトラポッドでは底面から高さの約 $1/3$ にあるのに対し、中空ブロックは高さの約 $1/4$ にあるから、引波の動水圧による転倒モーメントが小さい。さらに中空ブロックは間げき率が大いいため、砕波が斜面に直接衝突した場合にも波力をよく吸収する。

種々の砕波の実験において中空ブロック No. 1 の方がテトラポッドより安定であるという結果を示したのは上記の理由によると考えられる。中空ブロックはその特長より直立壁前面の水深が比較的大きいときに特に消波効果がいちじるしく、ブロックの安定性も大きい。

(4) 異形ブロックの粗度による消波効果

異形ブロックを斜面に配置した場合に、その表面の凹凸による摩擦抵抗によって波のエネルギーを殺すが、これが直立壁における波圧、遡上高および反射率にどのように影響するかを知るために、板張り基礎の上に四面体を1層積にモルタルで植付けて実験を行った。その結果は表-3 および 4 に示したごとくで、最大同時波圧の合力 P は水深 h_1 が小さいときは減少しているが、 h_1 が大きくなると、凹凸による抵抗の効果はあまり表われていない。遡上高および反射率においてもその傾向は多少あるようであるが、その効果はわずかである。一般に水深が浅く、かつ波高が小さい場合には、底面における摩擦抵抗の影響は大きい、水深が大きく、かつ波高が大きい場合には摩擦抵抗の影響は少ない。これに反し、波の運動量を吸収するブロック層の遮蔽された間げきが大きく影響を与えるものと考えられる。 $h_1=7\text{ cm}$ のときには P の値は中空ブロック No. 1 と四面体1層積とは同じくらいであるのに対し、 $h_1=13\text{ cm}$ のときには前者の場合は後者の場合の約 $1/2$ であること、および直立壁に達する砕波のエネルギーの比も前者は後者の約 $1/2$ であることなどは、この考え方が正しいことを証明している。

すなわち消波用ブロックとしては、最初に記したごとく、表面の粗度よりも波の透過性がより重要である。

6. 結 論

現在まで行った研究の結果を要約すると次のごとくである。

(1) 在来の異形コンクリートブロックの中で四面体と六脚ブロックは透過性が悪く、波力に対する安定性もきわめて悪い。四面体ブロックは2層積にすると、粗度が小さくなるのでかえって悪い。六脚ブロックは波圧を受ける面積が大きい上に重心が高いので、波に対しては特に不安定である。それゆえ両者とも消波用ブロックとしては不適當である。

(2) テトラポッドは波力減殺の効果および波に対する安定性において、在来の異形ブロックの中ではおそらく最もすぐれているといつてよいであろう。その最も有効な配置は2層積で、上層のブロックを正位置においた場合である（この場合は表面の凹凸は大きい、遮蔽された空間は非常に小さい）。上層ブロックを逆さに置くと、間げき率は約 66% になり、消波効果はよいが、上層ブロックが非常に不安定で、その上、引波による吸上げ圧力および動水圧による転倒モーメントが大きいので、小さい砕波によって容易に転倒し、また水深が深くなると引波の吸上げ圧力が大きくなると、斜面上に吸上げられて転落する。

(3) 中空ブロック No. 1 の最も有効な配置は2層積で、その場合の間げき率は約 66% で非常に大きく、しかもその間げきはブロックが砕波によって押しつけられてもあまり変らない。このため波圧減殺の効果は非常に大きく、テトラポッド2層積の場合に比して、最大同時波圧の合力の値は一般に 15~50% くらい小さい。この波圧減殺の効果はブロック上の水深が大きいほどいちじるしい。

(4) 中空ブロック No. 1 の重心の位置は底面から高さの約 $1/4$ (テトラポッドは底面から高さの約 $1/3$) にある。受圧面積はテトラポッドとほぼ同じであるから、波圧による転倒モーメントはテトラポッドより小さい。また2層積の上層ブロックに対する引波の吸上げ圧力も小さい。それゆえ同一の大きさおよび同一の重量のテトラポッドに比して、砕波に対する安定度は大きい。この特長はブロック上の水深が大きいときほどいちじるしい。

(5) 直立壁における波の遡上高および反射率はテトラポッドより一般に小さいが、これらの測定は目測であるから、大体の傾向を知りうるにすぎない。

(6) 中空ブロック No. 1 の体積は同一大きさおよび同一重量のテトラポッドの体積にほぼ等しいが、2層積の場合には、所要個数はテトラポッドより少なくとも約 15% 少い。型わく費および据付費は両者はほぼ同じであるから、同一の消波効果を得るに必要な工事費は、テトラポッドを使用した場合より少なくとも約 15% 安い。

(7) 混成堤の直立壁の前面に天端まで異形ブロックを積むことは、潮位が低く、かつ碎波が小さくて斜面上で碎ける場合には、直立壁に働らく波圧は小さくなり、越波量も少なく有効であるが、潮位が高く、かつ碎波が大きくて、直立壁天端付近または天端上で碎波する場合、あるいは碎波が天端を越して港内に突込むような場合には、直立壁の天端付近に大きな圧力が働らき、直立壁前面に相当の水深がある場合よりかえって大きな最大同時波圧をおよぼす。このような場合は暴風時に起りやすいので、工費を増して逆に悪い結果をもたらすおそれがあるから慎重に考慮する必要がある。

【付記】 この実験は当研究室の助手 玉井佐一君、および四年次学生 上田伸三君が主として行ったもので、ここに記して深く謝意を表する。

考 参 文 献

- 1) 永井荘七郎：防波堤に働く碎波の圧力に関する研究，土木学会第 4 回・第 5 回海岸工学講演会講演集，1957，1958 年

土 木 建 築



設 計 施 行

西 松 建 設 株 式 会 社

取締役社長

西 松 三 好

本 社 東京都港区西久保桜川町 13 番 地
電話 東京 (59) 代表 4101 (10)・8431 (10)
支 店 東京・仙台・名古屋・大阪・福岡・高松・札幌