

中空三角および中空三脚ブロックの安定 および消波効果に関する実験的研究

田 中 茂*・杉 本 修 一**

要 旨 この研究は混成防波堤の直立壁に作用する砕波の衝撃圧を模型実験により明らかにし、捨石部に消波ブロックを置かない場合、同部に中空三角ブロックを置いた場合、同部に中空三脚ブロックを置いた場合について、比較検討して消波効果を吟味し、さらに、これらのブロックの波に対する安定性に関しても調査したものである。

1. 緒 言

波が防波堤の直前で砕波状態となって堤壁に衝突し、跳波となって高く空中にとび上がる場合には非常に大きい圧力が堤体に作用する。捨石部をおおって消波ブロックを置かぬ場合は上述のようにはげしく砕波が鉛直壁に衝撃を与え、このような時の同壁に作用する波圧分布などに関しては今日までに模型実験による研究が行なわれ、さらに実際の防波堤についても実測が行なわれ、多くの実験式や経験式や半理論半実験式が提唱されている。この場合、波圧時間曲線はいわゆる「腰掛型」のまず最初のきわめて短時間に大きい圧力が作用し、それからさき是比较的小さい圧力がかなりの時間続くことを明らかにしている。ところが、捨石部上を消波ブロックでおおい、かつ直立壁の前面には特に念入りにブロックを設置した場合は、かなり砕波のエネルギーが減殺され、このような時には鉛直壁に作用する圧力が上記の時とはかなり異なることは容易に考えられる。このような時に、ブロックの種類や積み方、砕波の性質などにより、どのように鉛直壁に作用する圧力やその分布状態が異なるかを明らかにすることが大切で、跳波状況などの観測と相まって、ブロックの消波効果の判定に大きく役だつものと考えられる。ここでは、中空三角と中空三脚の両ブロックをとりあげ、これらについての消波効果を上述のような立場から検討し、さらにこれらの安定性についても検討を行なった。

2. 消波ブロックとその消波効果および安定性

波が構造物の直前で砕波して、これが構造物、特に鉛直壁に衝突したときには、これに非常に大きい衝撃力が作用する。これは、砕波が波ではなくはげしい流れとし

ての性質を有し、その有する大きな運動量が壁体の鉛直面に衝突した瞬間に力積に変わるために生じたものである。したがって、この砕波の大きな運動量をなんらかの方法で吸収もしくは消耗されることを得れば、それだけ砕波が壁体におよぼす衝撃力を減少させるわけである。このような方針に沿うものとして近年各種の消波ブロックが考案され、実際に各所で使用されている。各種ブロックの消波効果や安定性に関しては捨石部や海岸の特性や波の特性などによりそれぞれ長短があり、またあまり大きな差がないようである。消波ブロックとして好ましい具備すべき条件は周知のことながらつぎのようである。

(1) 砕波の運動量を可能なかぎり多く吸収するか、またはその運動のエネルギーを極力多く消耗させる。このためには、流れに対して障害となる突起や邪魔物の流れに直角な面に投影した面積が一応大きいことと同時にまた、ブロック層内に適当にしゃへいせられた空げきが存在し、かけ上ってくる流れともどり流れとがうまく干渉し合ってエネルギーの消耗を助長すること。

(2) 強い波圧を受けてブロックが転倒したり、ぐらぐら動いたりせぬこと。このためには、適当な重量があつてしかも重心が低く、となり合っているブロックとよく接触し合い、全体的にぎっしりと詰っていて、動くすき間が極力ないこと。

(3) ブロックの相互のかみ合わせがよく、段積みをした場合も十分よくかみ合っていて、座りがよいこと。

(4) 並べやすいことならびに積み重ねが容易なこと。

(5) ブロック群全体としてすき間なく捨石部や護岸の前面の海岸の砂部などをおおっていること。

(6) 波高に応じて適当な高さまでブロック積をし、有効にかけ上りをおさえること。

3. 実験目的と実験内容の概略

消波ブロックなどで前面を保護した護岸構造や前面の捨石部を保護した混成防波堤の直立部などが、高波、特に暴風時の砕波に対してどのような安定性および消波効果を有するかを模型実験によって明らかにするため、問題を二次元的に取り扱い、海岸の横断面の代表的な数例に対し、ブロック構造に着眼して、その安定性および消

*正会員 工博 神戸大学教授 工学部

**正会員 神戸大学助手 工学部

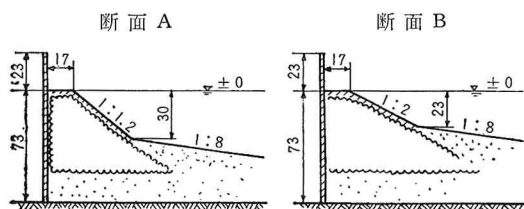
波性を総合的に検討することを目的としている。この場合、捨石部の直立壁前面の天端幅を定め、捨石部の前のり勾配を普通よく用いられるものとし、いく通りかの水位と各種の波について実験を行なった。実験では、ブロックの散乱度、越波状況、ブロックによる鉛直壁に作用する波力の減衰、などの諸項目について、特に波力の減衰に関しては詳細に吟味したのである。

4. 模型, 実験設備および計測装置

(1) 模型

海岸の断面の模型は、実験水槽の大きさと模型ブロック、波の特性などの諸関係を考慮して、水平および鉛直とも 1/20 の縮尺とした。防波堤は混成防波堤とし、その鉛直壁に相当するところは、模型では厚さ 5 mm の鉄板を鉛直に立てた。石積の mound に相当するものは礫および鉄板を用いて造り、そののり勾配を 1:2.0 とした。実験に使用した防波堤とその付近の海底の断面は図-1 に示す断面-A、断面-B である。潮位は mound の天端に相当するところを L.W.L. (± 0 cm) とし、それよ

図-1 模型防波堤基本断面図 (寸法単位 cm)



り外に、模型では +5 cm, +7.5 cm, +10 cm の 4 通りを採用した。海底は粗砂を使用して、沖へ向かう勾配を 1:8 とした。

(2) 実験設備

実験水槽は幅 1.0 m, 高さ 1.2 m, 長さ 23 m の両面ガラス張りの鋼わく製で、その一端に防波堤模型、他端にフラッター式起波機を設けた。この起波機は幅 0.96 m の造波板を 2 馬力の変速機つきモーターによって動かすもので、実験に使用する波は起波機の角速度とフラッターを動かすアームの長さを加減することにより、その高さ、波長、周期などを種々に変えうるのである。

(3) 波圧測定器

波圧計としては共和電業製の半導体式圧力変換器を使用した。受圧板は直径 1 cm で、防波堤鉛直壁の取付部に入るようにアクリライト樹脂製の水密な箱を造り、その 1 側面に中心間隔 3 cm ごとに 5 個の受圧板を取り付けた。

これを増幅器をへて電磁オシログラフに接続して、波圧の時間変化や、鉛直壁に作用する波圧の分布を測定する。波圧計の取付位置は、それらを取り付けた前記の箱ごと鉛直方向に上下しうるので、これらの高さをかなり

自由に調節しうるのである。波高計は最下位のものから順次上に向かって、No. 1, No. 2, No. 3, No. 4, No. 5 とし、L.W.L. より No. 1 の中心までの高さで、これらの位置を示すこととした。測定中の電圧を一定にするために stabilizer を使用した。

5. 実験方法

(1) 実験に使用したブロックとその配列

模型の消波ブロックはセメントモルタルに番線を入れて造ったものである。公称重量 2 t の中空三角および中空三脚ブロックを縮尺 1/20 に縮小して製作した。これらのブロックは写真-1, 2 に示すように、各ブロックともに 2 層積とし、前述の模型 mound 上を被覆した。消波ブロックの有無やその種類などにより、防波堤断面の状態をつぎの 3 種類とする。

- I 消波ブロックを置かない状態
 - II 中空三脚ブロックを 2 層積とした状態
 - III 中空三角ブロックを 2 層積とした状態
- 写真-1, 2 は II, III の状態をそれぞれ示す。

写真-1 中空三脚ブロックの 2 層積状態

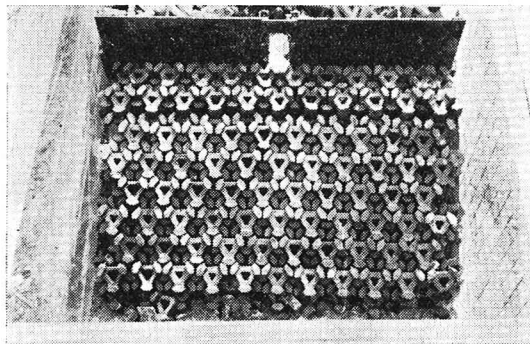


写真-2 中空三角ブロックの 2 層積状態

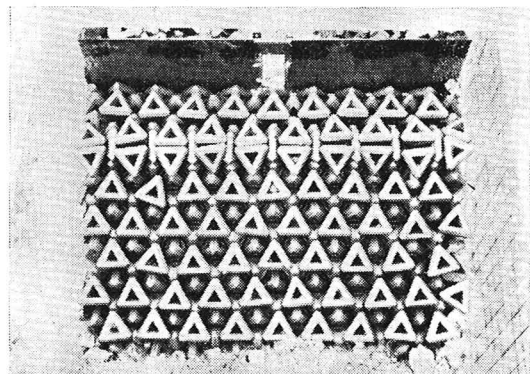


図-2 は中空三角ブロックの形状とその寸法を各部の長さの比率で示したものである。重量 2 t のブロックの場合、基準寸法の 1 は実物では 25 cm, 模型では 1.25 cm である。一方、中空三角ブロックの形状は図-3 に示すとおりで、重量 2 t ブロックの場合、図に示した寸法 d は実物で 145.7 cm, 模型では 7.3 cm である。

図-2 中空三角ブロックの形状寸法

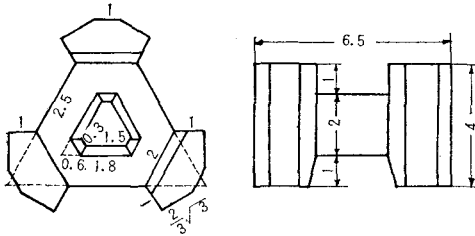
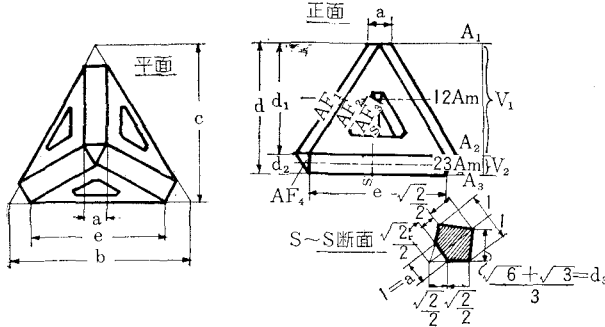


図-3 中空三角ブロックの形状寸法



(2) 実験に用いた波

実験に使用した波の特性を Froude の相似律により、実際の海の波のそれに換算したものと対照して、表-1, 2 に示す。

表-1 断面 A で使用した波

水位 h_1		波高 H		周期 $T(\text{sec})$	
実験 cm	実地 m	実験 cm	実地 m	実験	実地
0 (1)	0	16~18	3.2~3.6	2.7	12
5 (1)	1.0	27~28	5.4~5.6	"	"
5 (2)	1.0	24~26	4.8~5.2	"	"
7.5 (1)	1.5	25~27	5.0~5.4	"	"
7.5 (2)	1.5	21~23	4.2~4.6	"	"
10 (1)	2.0	21~23	4.2~4.6	"	"

表-2 断面 B で使用した波

水位 h_1		波高 H		周期 $T(\text{sec})$		波長 L		H/L
実験 cm	実地 m	実験 cm	実地 m	実験	実地	実験 cm	実地 m	
0 (1)	0	12	2.4	2.7	12	610	122	0.020
5 (1)	1.0	27~26	5.4~5.2	"	"	670	134	0.041
5 (2)	1.0	19~21	3.8~4.2	"	"	750	150	0.028
7.5 (1)	1.5	27	5.4	"	"	670	134	0.041
7.5 (2)	1.5	20~22	4.0~4.4	"	"	720	144	0.031
10 (1)	2.0	25~27	5.0~5.4	"	"	720	144	0.037
10 (2)	2.0	20~23	4.0~4.6	"	"	750	150	0.031

ただし、(1), (2) は起波機のアームの長さによる区別

波高は電気式波高計と金属スケールとを併用して、防波堤の鉛直壁から、5.7 m, 7.2 m の位置で測定した値の平均値である。また、波長は波の峰が 1 440 cm 進行するに要した時間を stop watch で測定し、 $L=CT$ (C は波速) なる関係より計算した。さきの表において示した波長および波形勾配は消波ブロックをおかぬときに測定した値である。実験では所定の波高、周期を持つ波を

与えて各時刻におけるつぎの諸量を測定した。

a) ブロックの散乱度 水槽の上から鉛直壁前面のブロックの写真を撮り、これを比較検討することにより、ブロックの回転または移動した個数を調べて、ブロックの散乱度を測定するという方法をとった。

b) 越波状況 この実験装置では鉛直壁に衝突してとび上がった水塊は鉛直壁の背後にはほとんど落下せず、大部分は壁の前面に落下する。実地では壁の天端より高く巻き上げられた水塊は当然実際には越波するものとみてよいので、この実験では写真撮影により、越波の程度を推定する方法をとった。

c) 波圧の測定 前述の波圧計で個々の波の波圧を同時測定して、電磁オシログラフで記録した。表-1, 2 に示した各種の波に対して、波圧計の位置を水位や波高に応じて鉛直方向に上下に移動させて、普通は 8 点について波圧を測定した。

6. 実験結果とその考察

(1) ブロックの安定性

ブロック相互の「かみ合わせ」のよさからみれば、中空三角ブロックよりは中空三脚ブロックのほうがすぐれているようである。このことは写真-1 から明らかなように、ぎっしりすき間なくつめて、2 段積にした場合は非常に上下、前後、左右の各ブロックはしっかりとかみ合っているのであるが、写真-2 のほうはやはり、上層の中空三角錐間の接触はわずかで、むしろ第 1 層との接触およびかみ合わせに依存してくるという感じである。実験波高 27 cm の波 (実地では 5.4 m の波) に対しては、中空三角ブロックのほうは mound の斜面の 1/2 以上のブロックはほとんどはねとばされたのに対して、中空三脚ブロックのほうは同じ波が長時間作用してもほとんど動かなかった。したがって波圧測定の実験では中空三角ブロックのほうは mound を形成する表面に鉄板をおいて、その表面にブロックをボンドで貼りつけたのである。実験波高 23 cm 程度以下の波であれば、中空三角ブロックも割合に安定しており、中空三脚ブロックに対してあまり遜色はなかった。

(2) 跳波の状況

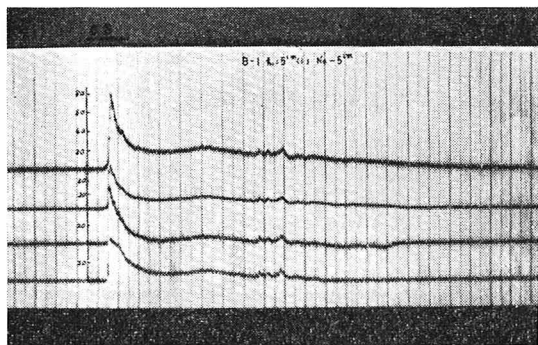
消波ブロックを置かない場合 I のときのほうが、消波ブロックを置いた場合 II, III のときよりも、跳波の上昇高がはるかに大きい。このような一般的な関係も、海底の断面、水位、波の特性などにより、様子を異にする。断面-A においては、水位 5 cm, 7.5 cm の場合、断面-B においては、水位 5 cm, 7.5 cm, 10 cm の場合が一般に跳波が上昇する傾向が強いが、断面-A の場合で、水位 0 cm, 10 cm の場合、および断面-B では水位 0 cm の場合は跳波がみられず、ほとんど碎波していない

いようであった。

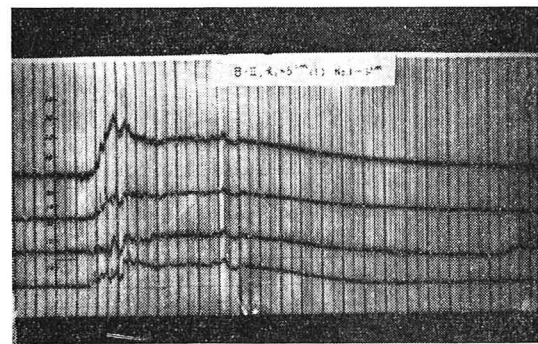
(3) 波圧時間曲線

写真—3 は B-I, $h_1=5\text{ cm}$ (1), No. 1—5 cm のとき, すなわち, 断面—B の場合で, ブロックを置かぬときで, 水位 $h_1=5\text{ cm}$ の場合について, 波圧計 No. 1 の中心位置が $\pm 0\text{ cm}$ から -5 cm の場合, における波圧を 4 個 (最上部 No. 5 は故障) の波圧計がとらえた記録である。写真—4 は B-II, $h_1=5\text{ cm}$ (1), No. 1—1 cm のとき, すなわち, 断面—B の場合で, 中空三脚ブロックを 2 層積としたときで, 水位 $h_1=5\text{ cm}$ の場合について, 波高計 No. 1 の中心位置が $\pm 0\text{ cm}$ から -1 cm の場合における波圧を 4 個の波圧計がとらえた記録である。なお, これらの記録は下より No.1, No.2, No.3, No.4 の各波圧計のとらえたものである。

写真—3 波圧—時間曲線



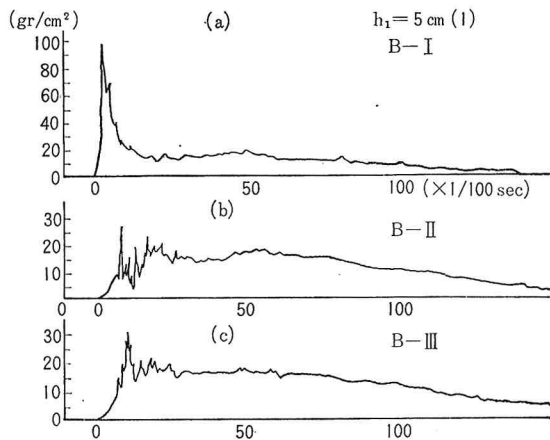
写真—4 波圧—時間曲線



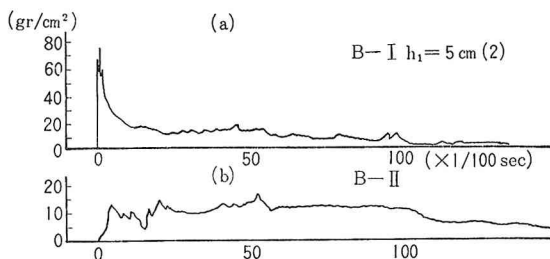
また, 図—4 は断面—B につき, $h_1=5\text{ cm}$ (1) の場合, 図—5 は断面—B につき, $h_1=5\text{ cm}$ (2) の波に対する, 波圧計の位置 5 cm の場合, No. 4 の波圧計がとらえた波圧—時間曲線である。図で (a) はブロックのない場合 I, (b) は中空三脚ブロックを 2 段積にした場合 II, (c) は中空三角ブロック III の場合の観測例である。

これらをみれば, 最大波圧は II, III の場合は, いずれも I の場合の $1/3$ 以下の値を示し, かつ, 波圧が作用し始めてから, I の場合がもっともすみやかに波圧のピークに達し, さらに, 波圧の作用時間は I の場合が最短である。すなわち, ブロックのないときでは, 初期のきわめて短時間に, 非常に大きな衝撃力が作用するのに対

図—4 波圧—時間曲線



図—5 波圧—時間曲線

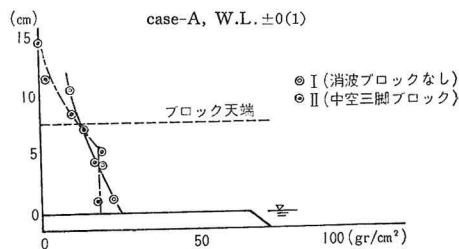


し, II, III のときでは, これらがほとんどないことである。これはブロックのために, 特に最初の大きな衝撃力が減殺されることを示す。

(4) 最大波圧の鉛直分布

波圧計を鉛直に上下方向に移動することにより, 普通鉛直壁上 8 点において測定した波圧の各点における最大値を求めて, これらから鉛直分布曲線を描き, この曲線

図—6 最大波圧の鉛直分布曲線



図—7 最大波圧の鉛直分布曲線

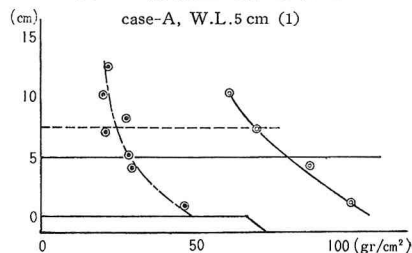


図-8 最大波圧の鉛直分布曲線

case A, W.L. 7.5 cm (1)

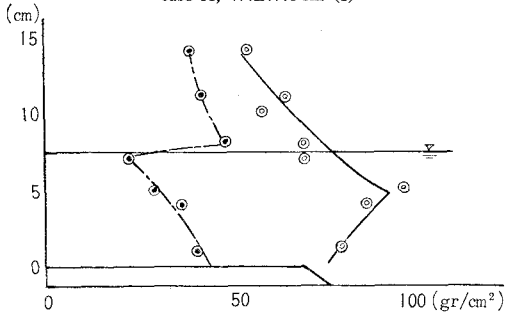


図-10 最大波圧の鉛直分布曲線

case-B, W.L. 5 cm (1)

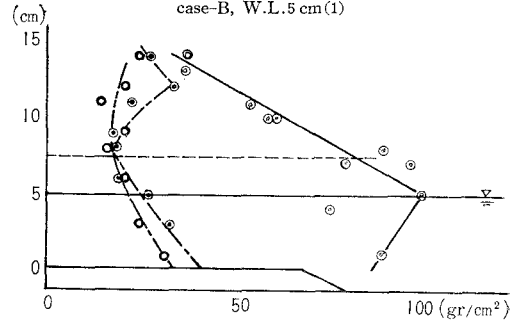
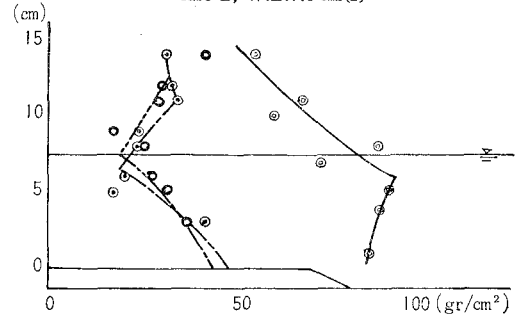


図-11 最大波圧の鉛直分布曲線

case-B, W.L. 7.5 cm (2)



の最大値によって消波効果を比較した。

a) 断面-Aのとき 図-6~8は、このときの各水位と各波高における波圧の鉛直壁上各点の最大値をIとIIの場合を対照的に記したものである。

さらにこれらの測定値により、波圧の鉛直分布曲線を描き、その最大値により、消波効果を一覽的に比較したものが表-3である。

表-3 A-I, A-II の消波効果の比較

	水位 h_1 cm	H cm	T sec	最大波圧 g/cm ²	比率 %	砕波状況
消波ブロック なし I	0 (1)	18	2.7	26	100	砕波せず
	5 (1)	28	"	109	100	砕波、強く激突
	5 (2)	26	"	77	100	砕波
	7.5 (1)	27	"	90	100	砕波、跳波 2m
	7.5 (2)	23	"	39	100	弱く砕ける
	10 (1)	23	"	35	100	砕波せず
中空三脚 ブロック II	0 (1)	16	2.7	18	69	砕波せず
	5 (1)	27	"	50	46	砕波、激突
	5 (2)	24	"	35	46	砕波
	7.5 (1)	25	"	47	57	砕波、激突
	7.5 (2)	21	"	30	77	弱く砕ける
	10 (1)	21	"	30	86	砕波せず

この表より、 $h_1=10$ cm, $h_1=7.5$ cm(2), $h_1=0$ などのように砕波しないか、または弱く砕けるときにはブロックを置いた場合の最大波圧のブロックを置かぬ場合のそれに対する比率はかなり大きい。

b) 断面-Bのとき

図-9~11は、このときの各水位と各波高とにおける波圧の鉛直壁上各点の最大値をI, II, IIIの各場合につき、対照的に記したものである。

図-9 最大波圧の鉛直分布曲線

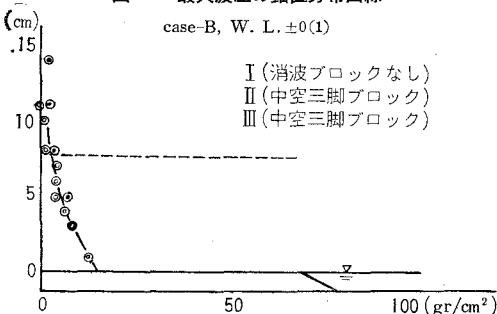
case-B, W. L. ± 0 (1)

表-4 B-I, B-II, B-IIIの消波効果の比較

	h_1 cm	H cm	T sec	L cm	最大波圧 g/cm ²	比率 %	砕波状況
消波ブロック なし I	5 (1)	27	2.7	670	98	100	砕波、強く激突
	5 (2)	21	"	750	68	100	砕波
	7.5 (1)	27	"	670	101	100	砕波、強く激突
	7.5 (2)	22	"	720	90	100	砕波、激突
	10 (1)	27	"	720	104	100	砕波、跳波
	10 (2)	23	"	750	61	100	砕波、跳波 1m
中空三脚 ブロック II	5 (1)	26	2.7		40	41	砕波、激突
	5 (2)	19	"		27	40	砕波
	7.5 (1)	27	"		60	59	砕波、激突
	7.5 (2)	20	"		48	53	砕波
	10 (1)	25	"		70	67	砕波、激突
	10 (2)	20	"		37	61	砕波、激突50cm
中空三角 ブロック III	5 (1)	26	2.7		34	35	砕波、激突
	5 (2)	20	"		33	49	砕波
	7.5 (1)	27	"		57	56	砕波、激突
	7.5 (2)	20	"		44	49	砕波
	10 (1)	25	"		66	63	砕波、激突
	10 (2)	20	"		45	74	砕波

(5) 同時波圧の時間的変化

4個の波圧計により鉛直壁に作用する砕波の圧力を同時刻に測定した記録より、同時波圧の時間的変化曲線を描いた。図-12は断面-B, $h_1=7.5$ cm(2), に対するものである。

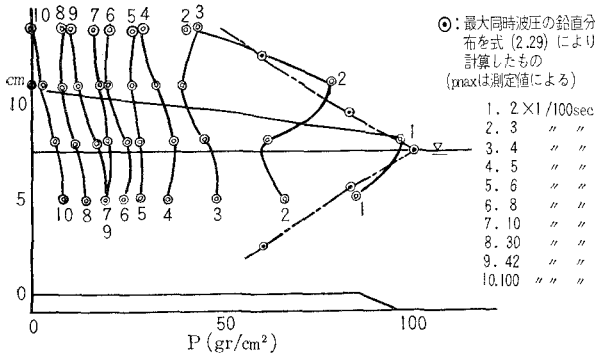
これらの曲線は波圧がピークになるところとか、急に変化するところとかを選び出し、時間は4個の波圧計の

うち波圧が一番すみやかに働き始めた瞬間を0としたものである。

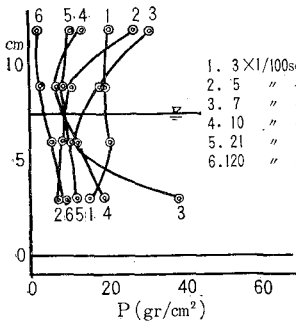
のときの最大同時波圧の分布曲線を求めて、図-12に記入しておいた。

図-12 同時波圧の時間曲線

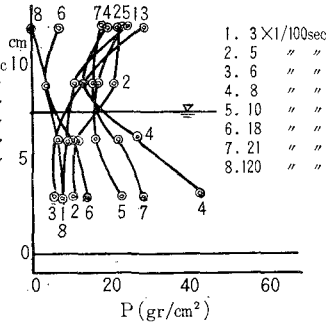
(a) Case-B-I W.L.7.5 cm (2)



(b) Case-B-II



(c) Case-B-III



これらの曲線をみて明らかなことは、(1)Iのときは静水面より下のほうが時間的にはすみやかに波圧が作用し始める。(2)ブロックを置いたときはブロックの天端より上のほうが時間的にすみやかに波圧がかかり始める。(3)波圧時間曲線はブロックを置いたときはブロックの天端付近で凹状を呈し、これは全体的にブロックを置かないときの曲線が静水面付近で凸状をなすのに対してである。また、鉛直壁にかかる同時波圧曲線のうちの大きなものとしてブロックの有無の両ケースについて比較すると、ブロックの存在するときはないときに比して、非常に小さい値を示す。(4)鉛直壁に作用する同時波圧の合力は最大波圧の鉛直分布曲線より求めた合力より小さいのは当然であるが、この実験の結果では鉛直壁の測定区間9 cmの間においては、ブロックが存在しない場合につき、最大波圧の鉛直分布曲線の示す最大波圧が各点において出現した時間のずれはおよそ1/100~1/10秒である。

なお、ブロックが存在しないとき、鉛直壁上の最大同時波圧の分布を永井莊七郎教授が示したA-型(最大波圧 p_{max} は静水面に生じ、その上下の波圧分布は対象であるとして、静水面から y だけへだたった点の波圧 $p_y = p_{max} [1 - (2y/H)]^2$ にしたがうもの)として、B-I

(6) 波圧に関する結論

a) ブロックを置いた場合 鉛直壁に作用する波圧のうち最初のごく瞬間的に作用する衝撃圧力は非常に減少する。それに続くいわゆる「腰掛部」に相当する部分の圧力に関しては、ブロックを置いた場合は置かない場合よりごくわずかに小さい圧力になるにすぎない。

b) ブロックを置いた場合 鉛直壁に作用する波圧の分布はブロック天端付近で最小値をとる凹状の分布となり、その上下部より波圧が若干小さい。

c) 波が碎波して鉛直壁に衝突したとみなされるときに限定して、ブロックを置かないときの最大波圧を100とし、ブロックを置いたときのそれを%で表わしたものを表-5に示す。これによると両ブロックともブロックを置かぬときに対する上記の百分率は平均して54%で、ほとんど同じである。

これより、静水面の水位が増すにつれて消波効果が減少することを知る。ブロックの天端7.5 cmよりも静水面が下にある場合は急速に消波効果が上がり、静水面がそれより上にあると消波効果が悪くなる。

表-5 中空三脚と中空三角ブロックの減圧効果

(ブロックがないときの最大波圧を100%とした比率%)

h_1 cm	A					B						
	5	7.5	平均			5	7.5	10	平均			
同上種類	(1)(2)	(1)(2)	(1)(2)			(1)(2)	(1)(2)	(1)(2)	(1)(2)	(1)(2)		
中空三脚ブロック	46 46	52 77	54			41 40	59 53	67 61	53.5			
中空三角ブロック						35 49	56 49	63 74	54.3			

7. 結 語

この実験的研究は中空三脚と中空三角両ブロックについて消波効果を明らかにすることを第1とし、さらに安定度に関しても吟味することをねらったもので、ある程度目的を達することを得た。しかし、鉛直壁に沿ってさらに広範囲に波圧の分布を求めることが望ましく、またさらに広範囲の水位や波高に関する実験を行ないたいと考えている。上述のブロック以外の多くのブロックについても目下ここで取り上げた諸問題につき、さらに目下研究を行なっているので、つぎの機会に報告する。この実験的研究を行なうに際して、終始実験に協力した当時の学生谷本勝利君(現在運輸省運輸技術研究所勤務)の労を多するとともに、神戸大学片山邦康助手その他の諸君に感謝の意を表する。