

混成防波堤直立部の滑動および底面に働く揚圧力

大阪市立大学工学部 教授 工学博士 永 井 莊 七 郎

同 上 助手 玉 井 佐 一

同 上 助手 久 保 直

1. 緒 言

「防波堤に働く砕波の圧力に関する研究」(土木学会論文集, 第 65 号別冊 (3-3), 昭和 34, 12) において, 「防波堤に働く砕波の強大な衝撃圧力は作用時間が $1/100 \sim 1/500$ sec 前後という極めて瞬間的に作用するので, 直立壁の底部から天端まで同時に一律な圧力が働くのではなく, 各高さにおける圧力の最大値は底部から順次に上方に僅かな時間ずつ遅れて作用する。したがって直立部に働く最大の波圧は, 各高さの圧力の最大値 (p_{peak}) のうちで最も大きい圧力 (p_{max}) が作用する瞬間における同時波圧, すなわち最大同時波圧の合力 (P_{max}) である。この P_{max} が直立部の摩擦抵抗力より大きくなつた瞬間に滑動する。」ということを発表した。このことが果して正しいか否かを実証するために, 混成堤の直立部を 3 種類のモルタル製ブロックで造り, 種々な砕波を衝突させてブロックの滑動状況を調べた。その結果上記の考え方が正しいことを実証した。

また現在までにわが国で築造された多数の混成防波堤においては, 直立部の滑動抵抗を増すために, 直立部の下部を基礎捨石堤内に埋め, その前後に根固め用の直方体コンクリート・ブロックあるいは捨石を置いたものが多いが, このような直立部の底面における滑動摩擦係数については, ただ経験的にコンクリート・ブロックあるいはコンクリート・ケーソンと捨石との間の摩擦係数は $f=0.60$, 捨石相互の $f=0.80$ にとつているが, 種々な構造の場合について実験を行い, 摩擦係数の値を検討した。

つぎに砕波が防波堤に衝突したとき, 直立部底面に働く揚圧力について実験を行つた。

2. 混成堤直立部の滑動

(1) 実験設備および実験方法

実験設備は「防波堤に働く砕波の圧力に関する研究」に使用したものを用いた。すなわち水槽は長さ 25 m, 幅 2 m, 深さ 1 m のコンクリート水槽で防波堤設置場所の片面はガラス張りに造つてある。

混成堤の基礎捨石堤は木造と砕石の 2 つの場合について行つた。直立部は水槽の中央部から半分の 1 m (ガラス張りの側) はモルタルの直方体ブロックで, 他の半分の 1 m はブロックとほぼ同高の木板の直立壁で造り, モルタル・ブロックには背面に上 (ブロックの天端から下方 3 cm), 中 (天端から下方 9 cm) および下 (ブロックの下端から上方 3 cm または 7 cm) の 3 箇所ブロックの水平移動を測定するための移動計 3 個 ($\frac{1}{10}$ mm 読み) を取付け, 木板の直立壁には図-2 に示す高さに 5 個 (直径 4 cm) の孔を開けて波圧計を取付けた。移動計と波圧計は同一の連続撮影用電磁オシログラフに連結して同時に記録するように造つた (図-1 参照)。

図-1 波圧および移動記録装置

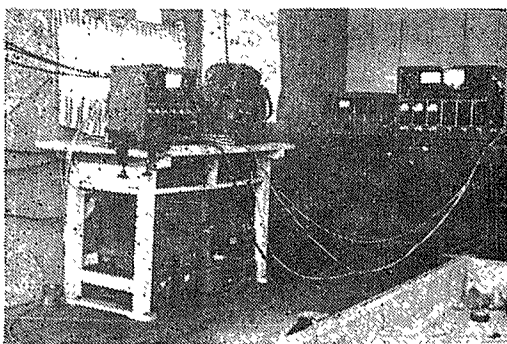


図-2

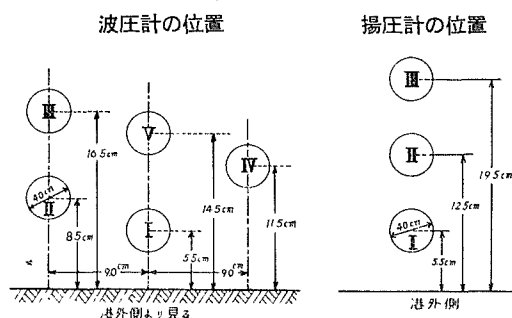


図-3 ブロック No. 1

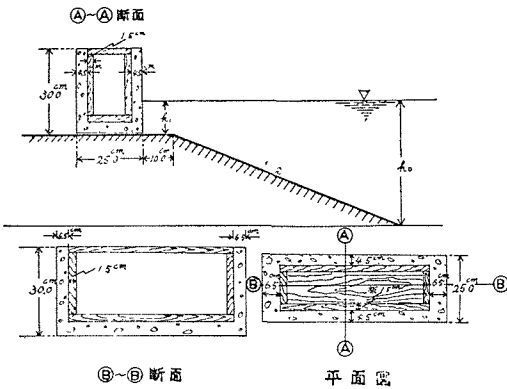


図-4 実験-I

波を起す前、左方はブロック、右方は木の壁



図-5 実験-I(a)

$h_1 = 14 \text{ cm}$, $T = 1.33 \text{ sec}$ の砕波が防波堤に衝突したとき

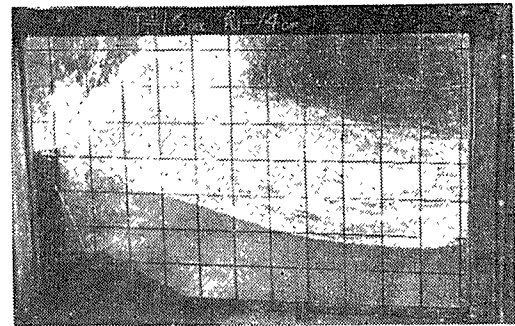


図-6 実験-I(a)

直立部に働く砕波の最大同時波圧

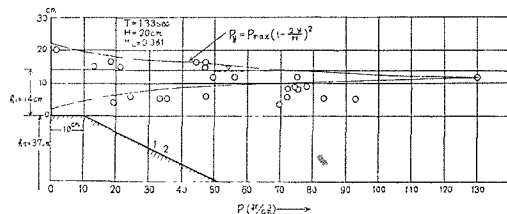
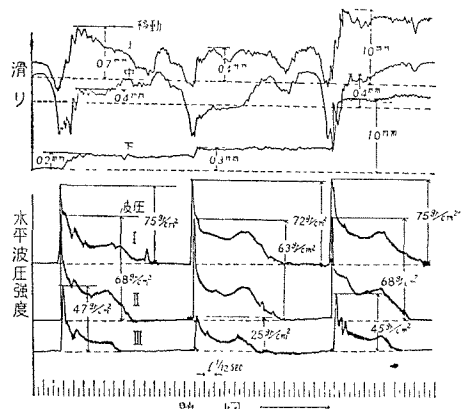


図-7 ブロックに働く砕波の圧力とブロックの滑動



(2) 実験-I

直立部モルタル・ブロックは外側寸法が高さ 30 cm, 幅 25 cm, 長さ 78.5 cm で内側に図-3 に示すように木の枠を挿入して中空に造った。これはブロックの重量を軽くするためである。このブロックが十分水を吸った状態における空気中の重量は 77.6 kg である。

基礎捨石堤は木板製で、直立部前面の水平部の幅 $B = 10 \text{ cm}$, 外法の勾配 1:2, 捨石堤の高さ $h_a = 37 \text{ cm}$ である。このブロックと木版との間の水中における摩擦係数は数回の実験の結果、平均して $f = 0.81$ であった。基礎捨石堤を木の板で造ったのは、砕石や玉石などで造った場合はブロック底面と捨石堤天端との間の摩擦係数がブロックの置き方、捨石堤の石の積み方、しまり方などの僅かの相違によつて実験の度に僅かずつ変化するばかりでなく、滑動に際してブロックの 1 部が捨石堤に食いこんだりする。そのほか、直立部底面に揚圧力が作用するから、瞬間的に作用する砕波の最大同時圧力によるブロックの滑動を正確に測定して、計算値と実験結果とを厳密に比較検討することが困難であるからである。

(a) 波の周期 $T = 1.3 \text{ sec}$, 直立部前面の水深 (基礎捨石堤天端上の水深) $h_1 = 14 \text{ cm}$ の場合, $T = 1.33 \text{ sec}$, 波高 $H = 20 \text{ cm}$, 波長 $L = 248 \text{ cm}$, $H/L = 0.081$ なる波を防波堤にあてると、図-5 に示すように砕波して強く直立部に衝突し、数 10 cm から 1 m 前後の跳波を生じた。この砕波の最大同時波圧の鉛直分布は図-6 に示すごとくで、A 型分布である。

$$h_1 \frac{h_1}{h_0} \cdot \frac{H}{L} = 14 \times \frac{14}{51} \times \frac{20}{248} = 0.311 \text{ cm}, \text{ 故に 図-31}$$

(「防波堤に働く砕波の圧力に関する研究」, 土木学会論文集, 第 65 号, 別冊 3-3, 29 頁) より $p_{max} = 100 \sim 130 \text{ gr/cm}^2$ 。今回の実験においても $p_{max} = 130 \text{ gr/cm}^2$ が生じているので, $p_{max} = 130 \text{ gr/cm}^2$ をとると, 最大同時波圧の合力 P は

$$P = \frac{1}{3} p_{max} \cdot H = \frac{1}{3} \times 130 \times 20 = 867 \text{ gr/cm} \cdots \cdots (1)$$

である。このブロックの水中における重量は 50, 125 kg であるから, 単位長さの水中重量 $W' = 638.5 \text{ gr/cm}$ 。

ゆえに滑りに対する摩擦抵抗力 R は

$$R = f \cdot W' = 0.81 \times 638.5 = 517 \text{ gr/cm} \quad \dots\dots\dots (2)$$

(1), (2) 式より $P > R$ であるから、ブロックは最大同時波圧が作用したときに滑ることになる。実際に実験においては第5波の p_{max} が働いた丁度その瞬間に滑っている。図-7 は波圧と滑動とを同時に記録したオシログロマイドを示す。

(b) $T=1.3 \text{ sec}$, $h_1=12 \text{ cm}$ の場合, $T=1.33 \text{ sec}$, $H=19 \text{ cm}$, $L=244 \text{ cm}$, $H/L=0.078$ の波を防波堤にあてると、図-8 に示すように砕波して直立部に激しく衝突し、図-9 のような最大同時波圧を及ぼす。

$h_1 \frac{h_1}{h_0} \cdot \frac{H}{L} = 12 \times \frac{12}{49} \times \frac{19}{244} = 0.229 \text{ cm}$ であるから前記論文図-31 から $p_{max}=100 \sim 130 \text{ gr/cm}^2$, 実験では $p_{max}=130 \text{ gr/cm}^2$ 。A 型分布であるから、最大同時圧力の合力は

$$P = \frac{1}{3} \times 130 \times 19 = 823 \text{ gr/cm} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ブロックの摩擦抵抗力は

$$R = f \cdot W' = 0.81 \times 689 = 558 \text{ gr/cm} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ゆえに $P > R$ であるからブロックは滑る。実験においては、 $p_{max}=130 \text{ gr/cm}^2$ のときは計算どおりブロックは滑動したが、 $p_{max}=70 \text{ gr/cm}^2$ のときは上部が傾くだけでブロックは全体的には動かなかった。そのときの P は

$$P = \frac{1}{3} \times 70 \times 19 = 443 \text{ gr/cm}$$

であるから、 $P < R$ である。したがってこの実験ではブロックは毎回とも滑るわけではなく、ときには滑らないこともあった。

(c) $T=1.3 \text{ sec}$, $h_1=6 \text{ cm}$ の場合, $T=1.34 \text{ sec}$, $H=14.0 \text{ cm}$, $L=234 \text{ cm}$, $H/L=0.060$ の波をあてると、砕波して図-10 に示すように直立部に衝突するが、最大同時波圧は図-11 に示すようにかなり小さく $p_{max}=49 \text{ gr/cm}^2$ であつて、何回実験を行つてもブロックは決して滑らなかった。

$h_1 \frac{h_1}{h_0} \cdot \frac{H}{L} = 6 \times \frac{6}{43} \times \frac{14}{234} = 0.050 \text{ cm}$ であるから、前記論文 (30頁) の (32) 式または 図-31 から $p_{max}=45 \text{ gr/cm}^2$ である。今度の実験における $p_{max}=49 \text{ gr/cm}^2$ を用いると

$$P = \frac{1}{3} \times 49 \times 14 = 229 \text{ gr/cm} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ブロックの摩擦抵抗力は

$$R = 0.81 \times 839 = 679 \text{ gr/cm} \quad \dots\dots\dots (6)$$

であるから、 $R > P$ であつて絶対に滑らないわけである。参考までに広井式を用い、在来の経験的方法によつてブロックに働く全波圧を求めると

$$P = 1.5 \times 1.03 \times 14 \times 30 = 649 \text{ gr/cm} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となり、 P は R に近いから、ブロックは滑動の限界にあつて、滑つたり、滑らなかったりすることになるが、すでに記したように、この実験では何回実験を繰返しても、ブロックは決して滑らなかった。

(d) $T=1.9 \text{ sec}$, $h_1=18 \text{ cm}$ の場合、波の周期を大きくし $T=1.92 \text{ sec}$, $H=14.5 \text{ cm}$, $L=398 \text{ cm}$, H/L

図-8 実験-I (b)

$h_1=12 \text{ cm}$, $T=1.33 \text{ sec}$, $H=19 \text{ cm}$ の波が砕波して防波堤に衝突したとき

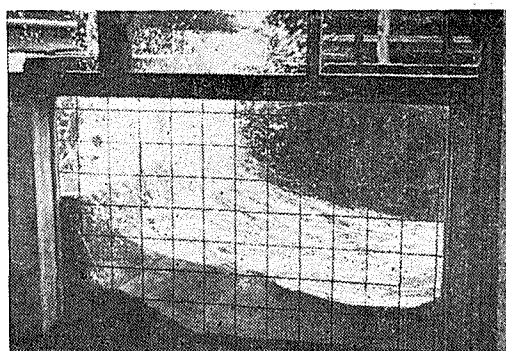


図-9 実験-I (b)
直立部に働く砕波の最大同時圧力

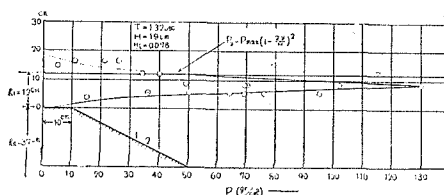


図-10 実験-I (c)

$h_1=6 \text{ cm}$, $T=1.33 \text{ sec}$, $H=14 \text{ cm}$ の波が砕波して防波堤に衝突したとき

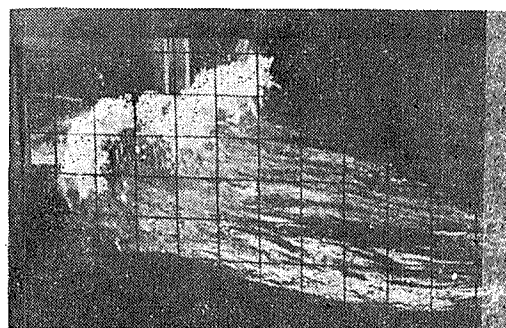
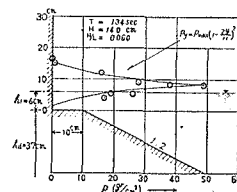


図-11 実験-I (c)
砕波の最大同時波圧



=0.036 の波を防波堤にあてると、比較的ゆるやかに砕波して衝突し、40~50 cm くらいの跳波を生ずる。また相当量の波がブロックの天端を越して内側に流入した。防波堤直立部に働く砕波の最大同時波圧の分布は前記論文の図-29(c) (26頁)と同様の分布をなし、図-13 に示すごとくである。この場合の最大同時波圧の合力は

$$P = \frac{1}{2} \times p_{max} \times 2.5H = \frac{1}{2} \times 27 \times 2.5 \times 14.5 \\ = 489 \text{ gr/cm} \dots\dots\dots (8)$$

ブロックの摩擦抵抗力は

$$R = 437 \text{ gr/cm} \dots\dots\dots (9)$$

であつて両者は非常に近い。実験の結果によると、上および中の移動計の点では第5波のとき最大 0.8 mm 内側に滑り、下の移動計では最大 0.1mm 滑つたが、その後上、中の点では振幅 0.6 mm くらいの大きな横振動をなし、第11波目に全体的に大きく滑動した。(8)、(9) 式の計算結果と非常によく合致していると考えられる。

(3) 実験-II

実験-Iに用いたブロックの中空部をモルタルで詰めたブロックについても実験を行った。このブロックの空気中の重量は 116.2 kg である。基礎捨石堤は実験-Iのものと同じである。 $h_1=18 \text{ cm}$ にして、 $T=1.38 \text{ sec}$ 、 $H=21 \text{ cm}$ 、 $L=258 \text{ cm}$ 、 $H/L=0.081$ の波をあてた場合の砕波の最大同時波圧の分布は図-14 に示すごとく B 型分布である。その合力は

$$P = \frac{1}{3} \times 130 \times 21 = 910 \text{ gr/cm} \dots\dots\dots (10)$$

ブロックの摩擦抵抗力は

$$R = 0.81 \times \frac{80875}{78.5} = 835 \text{ gr/cm} \dots\dots\dots (11)$$

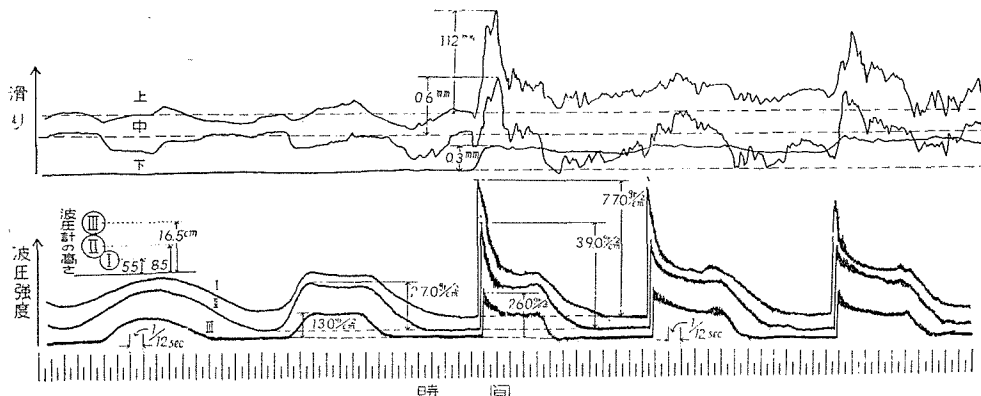
であつて $P > R$ である。実験においては第7波で全体的に滑つた。

(4) 実験-III

実験-IIに用いたブロックの中には1部木枠が残っていたので、それと同一寸法で全容積をモルタルで造つた空気中の重量 119.0 kg のブロックを直立部に用いて、実験-IIと同一の条件で実験を行った。 $h_1=18 \text{ cm}$ のときのこのブロックの摩擦抵抗力は

$$R = 0.81 \times \frac{83675}{78.5} = 864 \text{ gr/cm} \dots\dots\dots (12)$$

図-15 ブロックに働く砕波の圧力とブロックの滑動



で (10) 式の P に非常に近いが僅かに小さい。実験-IIと同一の波をあてると、ブロックは第5波が衝突した瞬間に全体的に滑動した。この実験結果は、 P の計算値がブロックの摩擦抵抗力の僅か5%大きくてもブロックは必ず滑動することを示すもので、計算値の精度を実証する好例と考え、図-15 に波圧と滑動の同時記録を示した。

図-12 実験-I(d)

$h_1=18 \text{ cm}$ 、 $T=1.92 \text{ sec}$ の波が砕波して直立部に衝突したとき

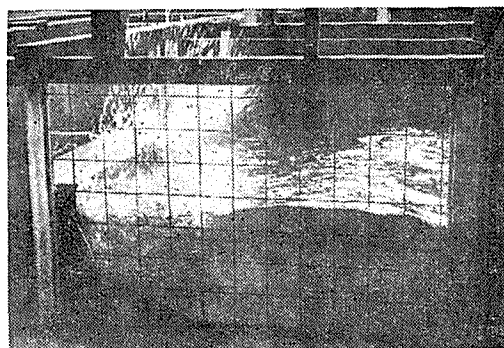


図-13 実験-I(d) 砕波の最大同時波圧

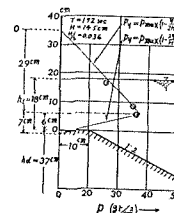
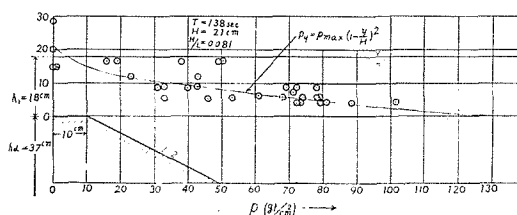


図-14 実験-II, III 直立部に働く砕波の最大同時波圧



以上の外に基礎捨石堤を碎石で造つた場合についても数回の実験を行ったが、すでに記したように、ブロックの横振動によつてブロックの基部が碎石堤内に食いこんだり、ブロック底面に接した碎石の配列の違いによつて摩擦係数が僅かずつ変化して、ブロックの摩擦抵抗力を正確に定めがたいので、最大同時波圧によるブロックの滑動を厳密に検討するには適当でなかった。

3. 混成堤直立部の摩擦係数

混成防波堤直立部の滑りに対する安定計算においては、コンクリート・ブロックあるいはコンクリート・ケーソン底面と基礎捨石堤との間の滑りに対する摩擦係数 f は一様に $f=0.60$ に、捨石相互間における $f=0.80$ にとられていた。また直立部基部に置かれた根固めブロックあるいは根固め捨石の高さが直立部の高さの $1/3$ 以上である場合には、この部分を直立部の 1 部と考えて安定計算を考えるように定められている。

以上のことは主として経験によつて定められたようであるので、この際、種々の構造の混成堤について、その直立部の滑りに対する抵抗力を測定してみた。

(1) 実験—I 根固めブロックおよび根固め捨石がない場合

碎石および玉石で造つた基礎捨石堤の上に高さ 28 cm、幅 25 cm、長さ 78.5 cm のモルタル・ブロックを置いた場合、ならびにそのブロックの上に高さ 8 cm、幅 10 cm、長さ 15 cm のモルタル・ブロックを 2~38 個積んだ場合のブロック底面における摩擦係数 f を測定した。

ブロックには 図-16 に示すように 3 箇所に $\phi 6$ mm 鉄筋を 3 本ずつ埋めこみ、これをブロックの正面に 3 cm 突出し、これに 3~5 cm 間隔に小孔を開けた、厚さ 5 mm、幅 3 cm、長さ 24 cm の帯鉄を熔接し、3 箇の帯鉄の同高の孔に針金を通して水平に引張つて、ブロックが滑動したときの引張り力を測つた。実験の初めにおいて、ブロックを水平に滑動させるのに最も適した孔の位置を調べたところ、ブロック底面(この場合は基礎捨石堤の天端と同高)から 5 cm 上方の孔を用いて水平に引張るのが最も良いことが明らかになったので、摩擦係数測定の実験においては常にブロックの底面から上方 5 cm の高さにおいて水平に引張つた。

(a) 基礎捨石堤を碎石で造つた場合

大型ブロックの空気中の重量 $W_B=124.0$ kg (鉄筋を含む)、小型ブロックの空気中の重量 $W_b=2.48\sim 2.76$ kg である。基礎捨石堤(碎石の直径はほぼ 3~8 cm、比重 2.67)の形状寸法は 図-17 に示すように、大型ブロック背面の天端幅は 20 cm、内側法の勾配は 1:2 である。

実験は基礎捨石堤上の水深を $h_1=14$ cm (捨石堤底面からの水深 $h_0=51$ cm) を一定にして、小型ブロックを 2 個、4 個、8 個、12 個、16 個、24 個および 38 個積

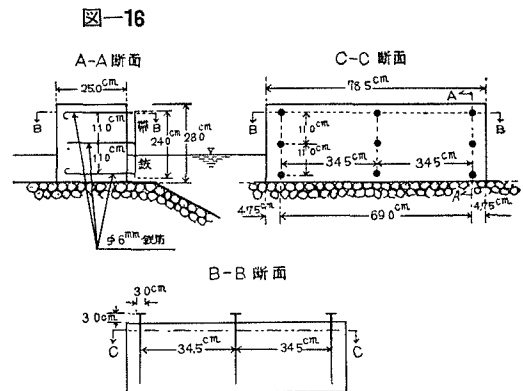


図-17 摩擦係数測定のための混成堤の形状

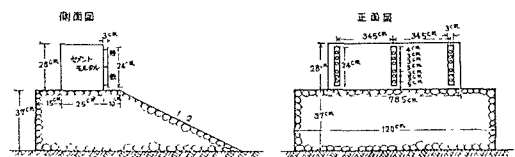
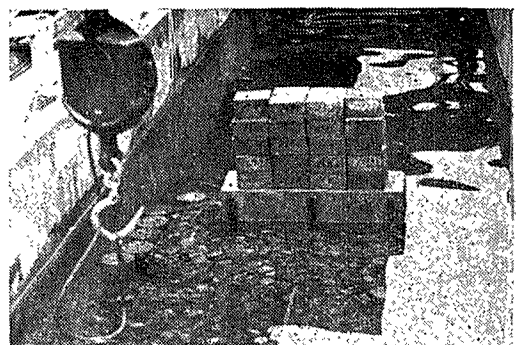
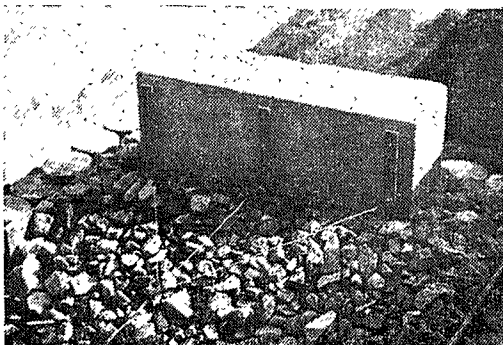


図-18(b) 大型ブロックの上に小型ブロックを 38 個積んだ場合

図-18(a) 大型ブロックだけの場合



んだ場合について、大型ブロック底面における摩擦係数 f の値を測定した (図-18 参照)。その結果を示すと表-1 のごとくである。引張り力 T の値は 3~13 回繰返し測定した値の平均値である。

表-1 によると、小型ブロックの数を増しても f の値はあまり変化せず、0.77~0.89 で、平均 0.82 でほぼ一定であると思ふ。

(b) 基礎捨石堤を玉石で造つた場合

基礎捨石堤を直径ほぼ 3~8 cm の玉石 (比重 2.62) で造つた場合に (a) と全く同一の実験を行つたが、その結果は表-2 のごとくである。

表-1 ブロック底面の摩擦係数 (実験-I(a) の場合)

実験 番号	W_B' (kg)	ΣW_b (kg)	$W_B' + \Sigma W_b$ (kg)	T (kg)	f	小型ブ ロックの 数 (個)	備 考
No. 1	96.52	0	96.52	75.0	0.78	0	直立部の上部に おいた小型 ブロックの寸法 8 cm × 10 cm × 15 cm
No. 2	96.52	5.23	101.75	80.8	0.80	2	
No. 3	96.52	10.47	106.99	88.2	0.83	4	
No. 4	96.52	20.96	117.48	94.4	0.81	8	
No. 5	96.52	31.57	128.09	108.5	0.85	12	
No. 6	96.52	42.05	138.57	110.7	0.80	16	
No. 7	96.52	63.05	159.57	142.4	0.89	24	
No. 8	96.52	99.57	196.09	151.0	0.77	38	
総平均					0.82		

表-1 附図

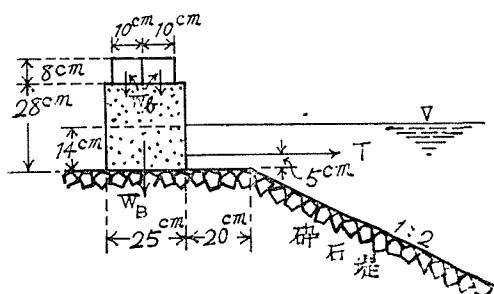


表-2 附図

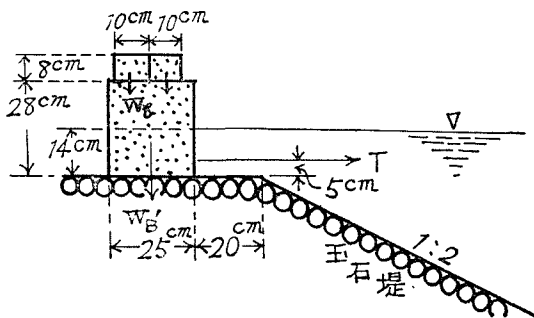


表-2 ブロック底面の摩擦係数 (実験-I(b) の場合)

実験 番号	W_B' (kg)	ΣW_b (kg)	$W_B' + \Sigma W_b$ (kg)	T (kg)	f	小型ブ ロックの 数 (個)	備 考
No. 1	96.52	0	96.52	62	0.64	0	直立部の上部に おいた小型 ブロックの寸法 8 cm × 10 cm × 15 cm
No. 2	96.52	5.23	101.75	66	0.65	2	
No. 3	96.52	10.47	106.99	79	0.74	4	
No. 4	96.52	20.96	117.48	81	0.69	8	
No. 5	96.52	31.57	128.09	92	0.72	12	
No. 6	96.52	42.05	138.57	98	0.71	16	
No. 7	96.52	63.05	159.57	120	0.75	24	
No. 8	96.52	99.57	196.09	135	0.69	38	
総平均					0.70		

表-2 によると、 f の値は小型ブロックの数を少し増すと増大するようであるが、4 個以上では $f=0.69\sim0.74$ でほぼ一定し、その平均は 0.72 である。小型ブロックがない場合および 2 個積んだときの $f=0.64\sim0.65$ をも加えた平均値は 0.70 であるから、玉石堤とブロックとの $f=0.70\sim0.72$ と見做してよいであろう。この値は碎石堤における $f=0.82$ よりかなり小さい。

(2) 実験-II, 根固めブロックおよび根固め捨石がある場合

(a) 基礎捨石堤を碎石で造つた場合

混成堤の基礎捨石堤を碎石で造り、直立部の背後に小型モルタル・ブロックを 1 列 (4 個)、2 列 (8 個)、2 段積 (12 個) に置いた場合、および直立部の下部を捨石堤内に埋めこんで前記と同様に直立部背後に根固め用の小型ブロックを置いた場合について滑りに対する摩擦係数を測定した。その結果を纏めたものが表-3 である。

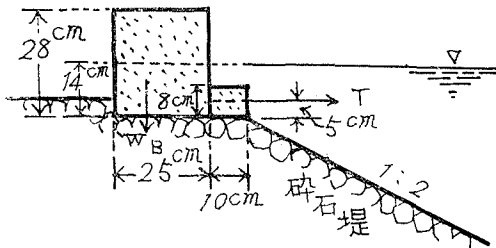
この実験に用いた直立部のブロックの水中重量 ($h_1=14$ cm のとき) $W_B'=96.52$ kg であるから、その背後に根固め用の小型ブロックを置いた場合には、実験 No. 1 の場合 (直立部を捨石堤内に埋めこまず、背後に小型ブ

表—3 根固めブロックおよび 根固 捨石がある場合の摩擦係数の値 (砕石堤)

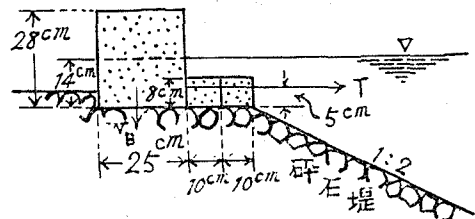
 W_q' : 根固め捨石部玉石の水中重量

実験 番号	B (cm)	h (cm)	WB' (kg)	$\Sigma W_b'$ (kg)	W_q' (kg)	$WB' + \Sigma W_b' + W_q'$ (kg)	T (kg)	Σf	f_b	根固めブ ロックの 数 (個)
No. 1	10	8	96.52	5.67	0	102.19	91	0.89	2.13	4
No. 2	20	8	96.52	11.47	0	107.99	103	0.96	2.10	8
No. 3	10	16	96.52	18.46	0	114.98	110	0.96	1.68	12
No. 4	10	13	96.52	5.67	4.92	107.11	104	0.97	2.36	4
No. 5	20	13	96.52	11.47	8.19	116.18	115	0.99	1.83	8
No. 6	10	21	96.52	21.46	8.19	126.17	127	1.01	1.62	12

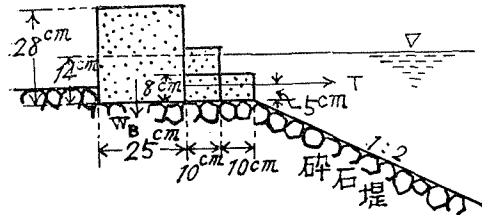
表—3 附図 (1)



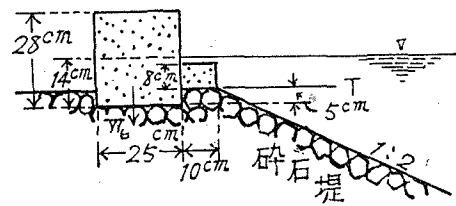
表—3 附図 (2)



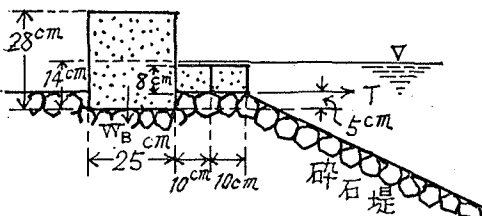
表—3 附図 (3)



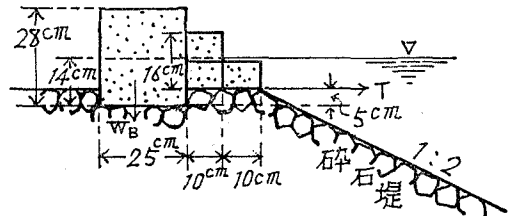
表—3 附図 (4)



表—3 附図 (5)



表—3 附図 (6)



ックを1列に置いた場合)を除けば、滑動限界の引張り力 T の値はつねに WB' より大である。すなわち直立部ブロックのみにて滑り摩擦係数を求めると $f_b = 1.07 \sim 1.32$ である。根固め用小型ブロックおよび直立部背後の捨石の重量を考慮して摩擦係数を求めると、表—3 に示すごとく、 $f = 0.89 \sim 1.01$ であつて、直立部ブロックだけを捨石堤天端に置いた場合の $f = 0.82$ よりかなり大きい。特に直立部の下部を捨石堤の中に埋めこんだ場合には $f = 0.97 \sim 1.01$ で大きくなり、直立部の滑りに対する抵抗力を増すのに有効であることがわかる。

(b) 基礎捨石堤を玉石で造つた場合

玉石で造つた捨石堤の天端に直立部ブロックおよび根固めブロックを置いた場合について (a) と全く同じ種類の実験を行つた結果は表—4 のごとくである。

玉石堤の場合には滑動限界の T の値は、背後のブロックおよび捨石の重量が相当大きい No. 3, 5, 6 の場合は WB' より大きい、それ以外のときはやや小さい。根固め用のブロックおよび背後の捨石の重量を考えた場合の摩擦係数の値は $f = 0.78 \sim 0.92$ で、直立部だけを捨石堤の天端に置いた場合の $f = 0.70$ よりかなり大きい。この実験においても、直立部の下部を捨石堤内に埋めこんだ場合には $f = 0.89 \sim 0.92$ で特に大きい。

つぎに直立部背後の捨石部の高さ h と幅 B が f の値に及ぼす効果を調べた結果は表—5 のごとくである。

表—5 によると、背後の捨石の高さが直立部の高さのほぼ $\frac{1}{2}$ 以上になると、 f は増大するように思われる。ま

表-4 根固めブロックおよび根固め捨石がある場合の摩擦係数の値(玉石堤)

B : 直立部前面における捨石堤の天端幅
 WR' : 根固め捨石部砕石の水中重量

実験番号	B (cm)	h (cm)	WB' (kg)	$\Sigma W_b'$ (kg)	WR' (kg)	$WB' + \Sigma W_b' + WR'$ (kg)	T (kg)	Σf	f_b	根固めブロックの数(個)
No. 1	10	8	96.52	5.67	0	102.19	79	0.78	2.02	4
No. 2	20	8	96.52	11.47	0	107.99	90	0.83	2.06	8
No. 3	10	16	96.52	18.46	0	114.98	100	0.87	1.75	12
No. 4	10	13	96.52	5.67	5.25	107.44	95	0.89	2.50	4
No. 5	20	13	96.52	11.47	8.74	116.73	105	0.90	1.87	8
No. 6	10	21	96.52	21.46	8.74	126.72	116	0.92	1.60	12

表-4 附図(1)

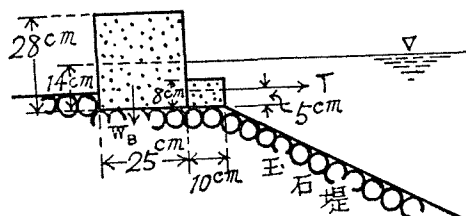


表-4 附図(2)

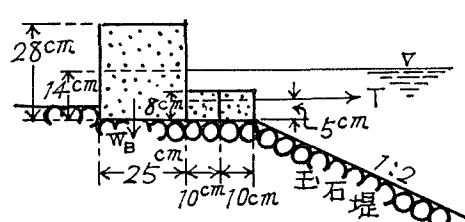


表-4 附図(3)

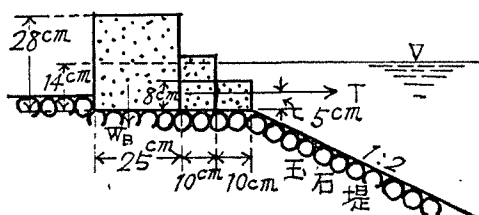


表-4 附図(4)

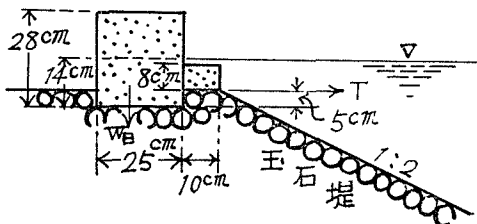


表-4 附図(5)

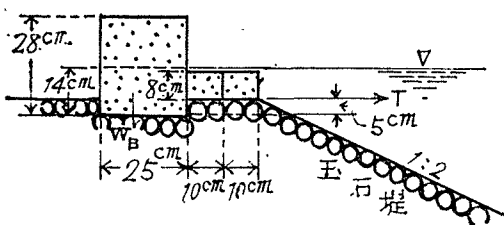


表-4 附図(6)

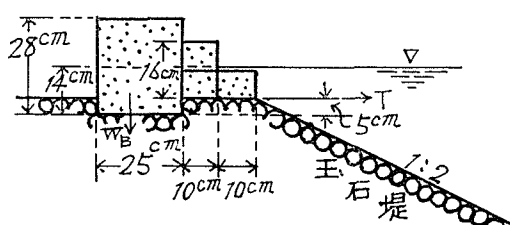
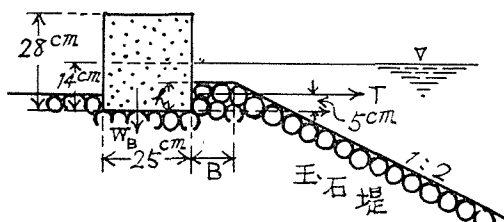


表-5 直立部背後の捨石の高さおよび幅と摩擦係数との関係

実験番号	B (cm)	h (cm)	WB' (kg)	$\Sigma W_b'$ (kg)	WR' (kg)	$WB' + \Sigma W_b' + WR'$ (kg)	T (kg)	Σf	f_r
No. 1	10	5	96.52	0	5.25	101.77	83	0.82	
No. 2	10	8	96.52	0	10.07	106.59	94	0.88	1.30
No. 3	10	13	96.52	0	20.91	117.43	109	0.93	1.33
No. 4	10	16	96.52	0	30.13	126.65	123	0.97	1.40
No. 5	10	21	96.52	0	50.67	147.19	143	1.01	1.23
No. 6	20	8	96.52	0	15.67	112.19	103	0.92	1.41
No. 7	20	13	96.52	0	30.00	126.52	133	1.05	1.73

表-5 附図



た背後の捨石の幅を増すと f は増すが、幅とともに高さも増さないと f は大して増さないことがわかる。

以上の実験結果によつて明らかなように、混成堤直立部の滑動抵抗力を増すには、直立部の下部を基礎捨石堤内に埋めこみ、背後に根固めブロックを置くのが効果的である。その場合の滑動抵抗力の計算には、従来行つて来たように、直立部と根固め部とを別々に計算せず、両者の水中重量を加えたものに摩擦係数をかけて算出すべきである。その場合の f の値は玉石堤における実験値（限界値の $f=0.89\sim0.92$ ）を安全率で割つたものを用いたらよからうと考えられる。ただし背後の捨石部（根固めブロックをも含む）の重量を考慮するのは、従来行つて来たと同様、捨石部の高さが直立部の高さの $1/3$ 以上のときに限るべきである。

4. 混成堤直立部の底面に働く揚圧力

(1) 実験—I 根固めブロックがない場合

(a) 強い砕波が衝突する場合

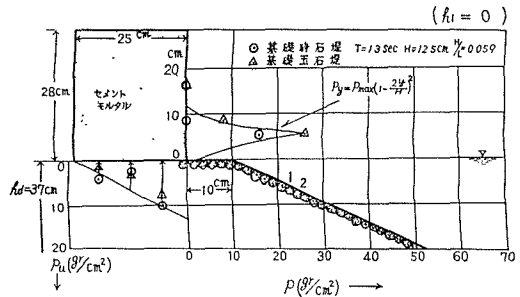
砕石および玉石で造つた外法勾配 $1:2$ の基礎捨石堤（よく詰めて積み、外側は波によつて破壊されないように直径数 cm の大きい石を置いた）の天端に $25\text{ cm}\times 28\text{ cm}\times 78.5\text{ cm}$ のモルタル・ブロックだけを置いた混成堤に、 $T=1.3\text{ sec}$ 、 $H/L=0.06\sim0.08$ の急な波をあてると、巻き波あるいは崩れ波の砕波の状態で直立部に強く衝突し、数 10 cm から 1.5 m 前後の大きな跳波を生じ、直立部前面水深 $h_1\geq 12\text{ cm}$ の場合には多量の波が天端を越した。このような強い砕波が直立部に衝突したときの直立部底面における揚圧力を測定した結果は図一19～23 および表-6のごとくである。

図一19～23によれば直立壁に働く最大同時圧力および底面に働く揚圧力は、砕石堤においても玉石堤においてもほとんど変わりがなと言つてよい。

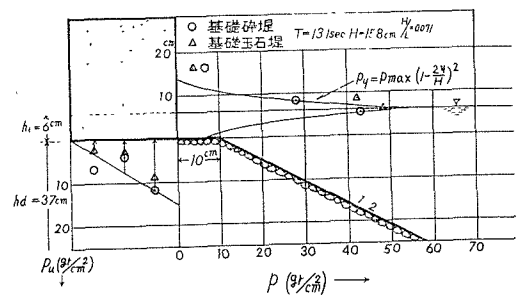
これらの実験結果によると、底面における揚圧力の強度 p_u は底面の外側端（港外側の端）で最大、内側端で最小でほぼ零に近く、近似的に三角形分布をしていると見做してよい。このように考えて求めた $(p_u)_{max}$ の値は図一19～23より明らかなように、直立壁における最大圧力強度 p_{max} には関係なく $(p_u)_{max}=13\sim15\text{ gr/cm}^2$ で、平均して $(u p)_{max}=14\text{ gr/cm}^2=const.$ と見做してよい。いま図一22（ $T=1.33\text{ sec}$ 、 $h_1=14\text{ cm}$ ）の場合における直立壁に働く砕波の圧力と底面に働く揚圧力とを同時に記録したオッシロ・ブローマイドを示すと図一24のごとくである。

図一24によれば、上中下の3つの波圧計の p_{peak} はほぼ同一時刻に起つているが、揚圧力の最大は外、中、内側の3つの圧力計とも $1/30\sim1/40\text{ sec}$ だけ p_{peak} より早く起つている。このような現象は他の実験においても同様で、揚圧力の最大 $(p_u)_{max}$ は水平波圧の p_{max} より一般に $1/30\sim1/120\text{ sec}$ くらい早く起つている。こ

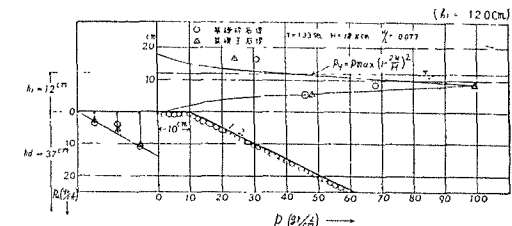
図一19 砕波の最大同時圧力および揚圧力の分布（ $h_1=0$ ）



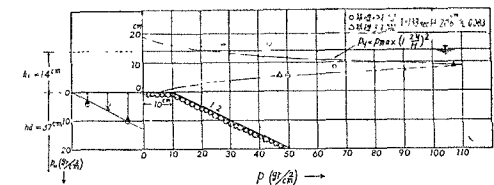
図一20 砕波の最大同時圧力および揚圧力の分布（ $h_1=6\text{ cm}$ ）



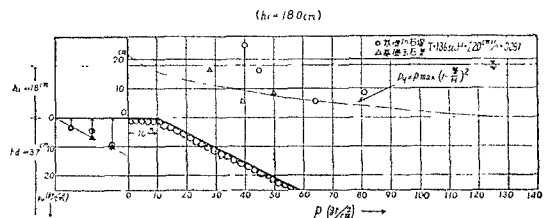
図一21 砕波の最大同時圧力および揚圧力の分布（ $h_1=12\text{ cm}$ ）



図一22 砕波の最大同時圧力および揚圧力の分布（ $h_1=14\text{ cm}$ ）



図一23 砕波の最大同時圧力および揚圧力の分布（ $h_1=18\text{ cm}$ ）



の事実より、揚圧力の最大値 $(P_u)_{max}$ は水平波圧の最大値 p_{max} とは直接関係はなく、主として碎波の状況、すなわち波形勾配が大で強く直立壁に衝突する碎波であるか、波形勾配が小さく、弱く碎波して衝突するかということ、直立部前面にある根固用のブロックあるいは捨石の状況によつて定まるものと考えられる。強大な碎波の水平圧力の p_{peak} は $1/100 \sim 1/500$ sec あるいはそれ以下の極めて瞬間的に作用する衝撃圧力であるから、このような圧力は捨石堤内部で減衰し、直立部の底面には作用時間がもつと長い (図-24 では $1/30 \sim 1/50$ sec), ゆるやかな圧力が伝わつて揚圧力として作用するのであるから、 p_{max} が增大しても揚圧力はそれに比例しては増大しないのであろうと考えられる。

(b) 弱い碎波が衝突する場合

(a) の実験に用いたと同じ混成堤に周期 $T \approx 1.9$ sec, $H/L \approx 0.025 \sim 0.030$ なる波をあてると、弱く碎波して衝突し、直立壁に小さい圧力を及ぼす (前記論文 26 頁)。この場合の碎波の水平圧力と直立部底面における揚圧力の分布を示すと図-25~28 のごとくである。

この場合には水平波圧および揚圧力ともに時間的な変化はゆるやかであるが、(a) の場合と同様、 p_{max} および P (最大同時波圧の合力) が增大しても揚圧力の最大値 $(p_u)_{max}$ および合力 P_u はあまり変化せず $(p_u)_{max} = 7 \sim 10 \text{ gr/cm}^2$ でほぼ一定している。

(2) 実験Ⅱ、根固めブロックが1列の場合

(a) 強い碎波が衝突する場合

直立部の下部を捨石堤の中に埋め、その前面に高さ 8 cm, 幅 10 cm, 長さ 15 cm のモルタル・ブロックを1列並べ、直立部前面の捨石堤先端幅を 15 cm にした混成堤において、直立部前面の水深 $h_1 = 0, 6, 12, 14$ および 18 cm のときに $T \approx 1.3$ sec の波をあてると、波は防波堤で碎波して直立壁に激しく衝突し、数 10 cm から 1.50 m くらい大きな跳波を生じ、 $h_1 \geq 12$ cm のときは多量の越波を生じた。この場合の直立部に働く碎波の最大同時圧力および直立部底面に働く揚圧力を示すと図-29~33 のごとくで、これらの実験結果を纏めた

図-27 弱い碎波における水平圧力および揚圧力の分布 ($h_1 = 12 \text{ cm}$)

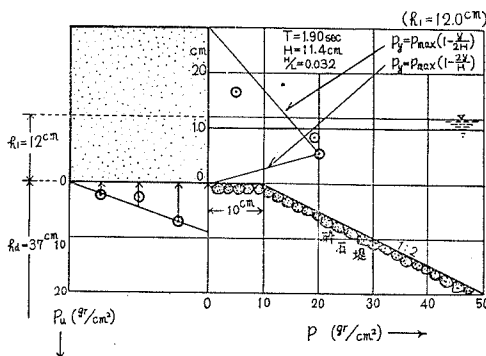


図-24 直立壁における波圧と底面における揚圧力の時間的な変化 (図-22 の実験)

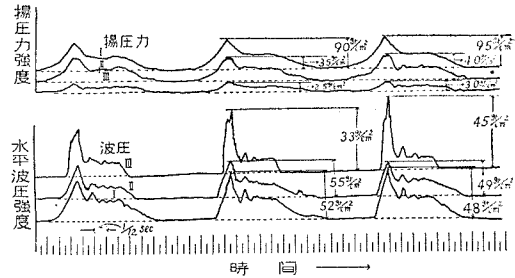


図-25 弱い碎波における水平圧力および揚圧力の分布 ($h_1 = 4.4 \text{ cm}$)

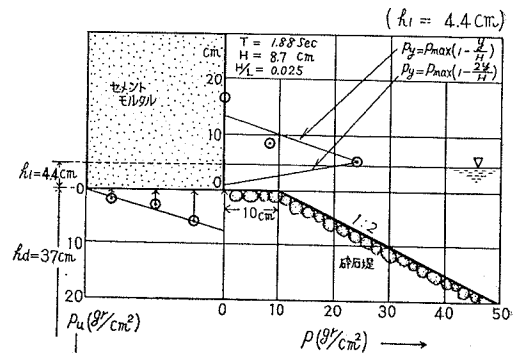


図-26 弱い碎波における水平圧力および揚圧力の分布 ($h_1 = 6.4 \text{ cm}$)

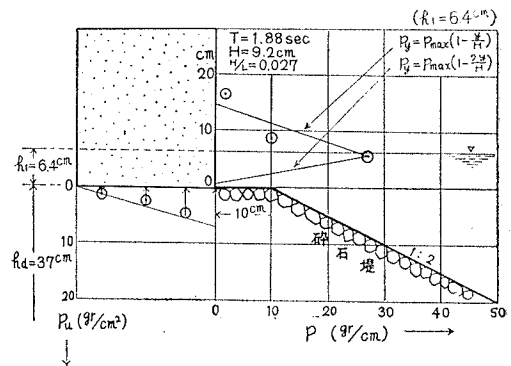
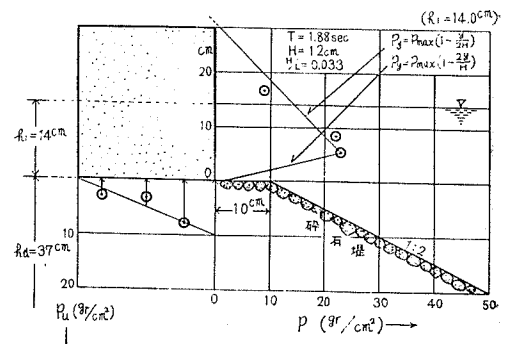


図-28 弱い碎波における水平圧力および揚圧力の分布 ($h_1 = 14 \text{ cm}$)



ものが表-7 である。

図-29~33 によると、この場合には揚圧力は非常に小さくなり、 $(p_u)_{max}=4\sim7\text{ gr/cm}^2$ 、平均 $(p_u)_{max}=5\text{ gr/cm}^2$ で一定と見做しうる。すなわち直立部の下部を捨石堤内に埋め、前面に根固めブロックを置くと、直立部底面における揚圧力の合力 P_u はほぼ $1/3$ に減少し、強い碎波に対しては減衰効果が著しいことがわかる。

(b) 弱い碎波が衝突する場合

(a) の場合と同一の混成堤に $T=1.9\text{ sec}$, $H/L=0.025\sim0.030$ のゆるやかな波をあてると、小さく碎波して直立部に弱く衝突する。この場合の最大同時圧力および揚圧力の分布を示すと図-34~37 のごとくである。これらの図により明らかなように、 $p_{max}=14\sim70\text{ gr/cm}^2$ であつて、(a) の場合より遙かに小さいにもかかわらず、

図-29 碎波の最大同時圧力と揚圧力の分布 ($h_1=0$)

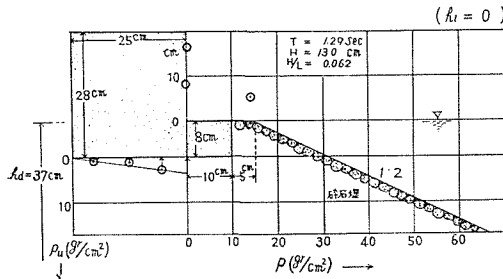


図-31 碎波の最大同時圧力と揚圧力の分布 ($h_1=12\text{ cm}$)

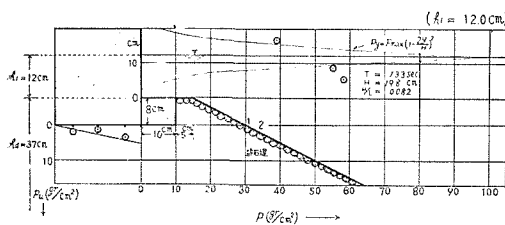


図-33 碎波の最大同時圧力と揚圧力の分布 ($h_1=18\text{ cm}$)

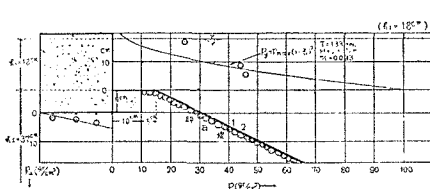


図-35 弱い碎波の最大同時圧力と揚圧力の分布 ($h_1=6.4\text{ cm}$)

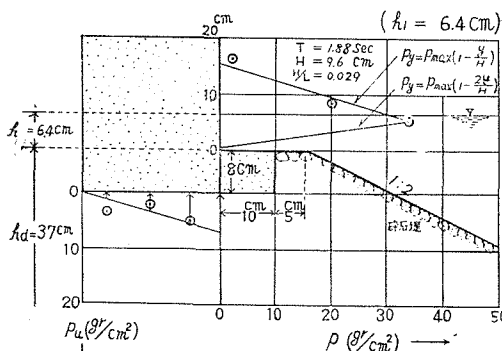


図-30 碎波の最大同時圧力と揚圧力の分布 ($h_1=6\text{ cm}$)

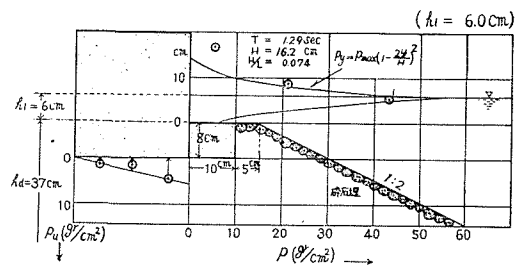


図-32 碎波の最大同時圧力と揚圧力の分布 ($h_1=14\text{ cm}$)

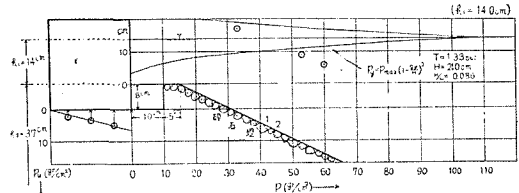


図-34 弱い碎波の最大同時圧力と揚圧力の分布 ($h_1=4.4\text{ cm}$)

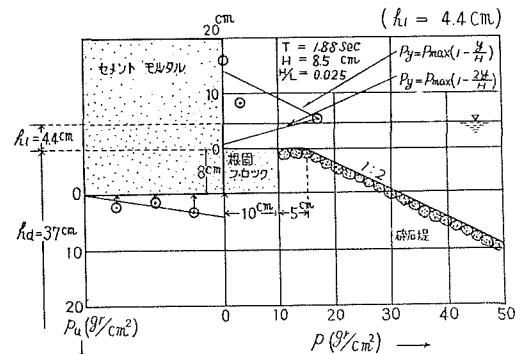
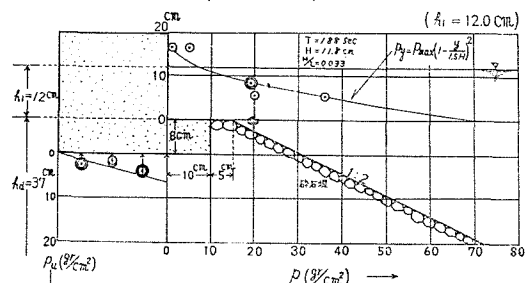


図-36 弱い碎波の最大同時圧力と揚圧力の分布 ($h_1=12\text{ cm}$)



揚圧力の最大値 $(p_u)_{max} = 4 \sim 8 \text{ gr/cm}^2$ 、平均 $(p_u)_{max} = 6 \text{ gr/cm}^2$ で、(a) の場合とほぼ同じである。すなわち周期が長い、弱い砕波に対しては根固めブロックの設置は揚圧力の減衰にはあまり効果がないことがわかる。

(3) 実験Ⅲ、根固めブロックが2列の場合

(a) 強い砕波が衝突する場合

8 cm × 10 cm × 15 cm のブロックを2列に直立部前面に置いた混成堤(直立部前面の捨石堤天端幅 $B = 25 \text{ cm}$)に $T \div 1.3 \text{ sec}$ 、 $H/L \div 0.06 \sim 0.08$ の急な波をあてると、大きく砕波して直立部に強く衝突する。しかし跳波はブロックが1列の場合よりやや小さく、20 cm から 1 m くらいである。この場合の最大同時波圧および揚圧力の分布を示すと図-38~42のごとくで、それらの実験資料を綴めたものが表-8である。

図-38~42によると、 $(p_u)_{max} = 2 \sim 5 \text{ gr/cm}^2$ 、平均して $(p_u)_{max} \div 4 \text{ gr/cm}^2$ で、ブロックが1列の場合より僅かに小さい。

(b) 弱い砕波が衝突する場合

(a) と同一の混成堤に $T \div 1.9 \text{ sec}$ 、 $H/L \div 0.025 \sim 0.030$ のゆるやかな波をあてると、直立部の前面で崩れるように小さく砕けて、弱く衝突する。この場合における直立部に働く最大同時波圧および底面に働く揚圧力の分布を示すと図-43~46のごとくである。

図-43~46によると、 $(p_u)_{max} = 4 \sim 5 \text{ gr/cm}^2$ 、平均して $(p_u)_{max} = 5 \text{ gr/cm}^2 = \text{const.}$ であつて、この場合より p_{max} が遙かに大きい強い砕波の場合とほとんど同じである。

以上の実験Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの結果によると、混成防波堤の直立部の下部を基礎捨石堤に埋めこみ、その前面に根固めブロックを置くことは、直立部の底面に働く揚圧力の減少に非常に効果がある。特に暴風時の波のごとく、周期が 5~7 sec で波形勾配が急な波が砕波して防波堤に衝突するような場合に減衰効果が著しく、ただ単に基礎捨石堤の天端上に直立部だけを置いた場合の約 $\frac{1}{3}$ に減少する。しかし根固めブロックを2列置いても1列置いた場合とほとんど変わりはない。

直立部底面における揚圧力の分布は、港外側の端で最大 $(p_u)_{max}$ で港内側の端で零である三角形分布をする。 $(p_u)_{max}$ の値は、直立壁に働く砕波の水平最大圧力 p_{max} には直接関係なく、主として直立部前面の構造に

図-41 強い砕波の最大同時圧力と揚圧力の分布 ($h_1 = 14 \text{ cm}$)

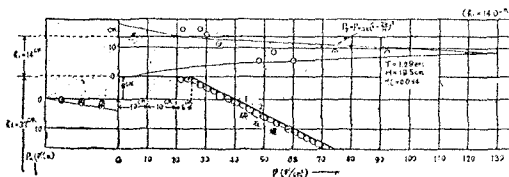


図-37 弱い砕波の最大同時圧力と揚圧力の分布 ($h_1 = 14 \text{ cm}$)

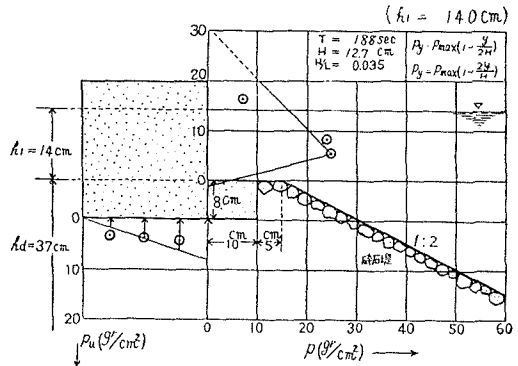


図-38 強い砕波の最大同時圧力と揚圧力の分布 ($h_1 = 0$)

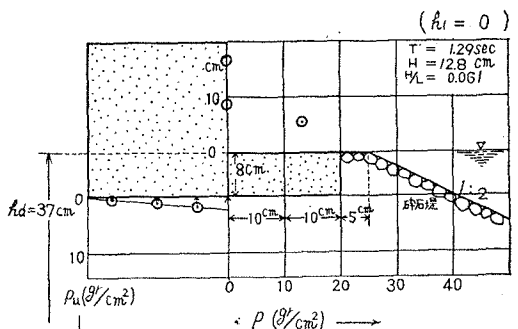


図-39 強い砕波の最大同時圧力の分布 ($h_1 = 6 \text{ cm}$)

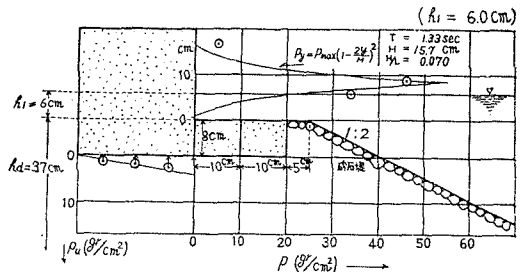


図-40 強い砕波の最大同時圧力と揚圧力の分布 ($h_1 = 12 \text{ cm}$)

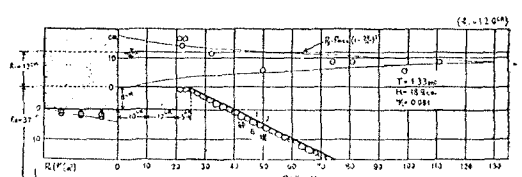


図-42 強い砕波の最大同時圧力の分布 ($h_1 = 18 \text{ cm}$)

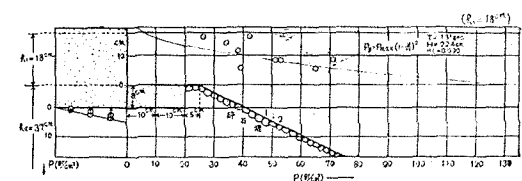


図-43 弱い碎波の最大同時圧力および揚圧力の分布 ($h_1 = 4.4 \text{ cm}$)

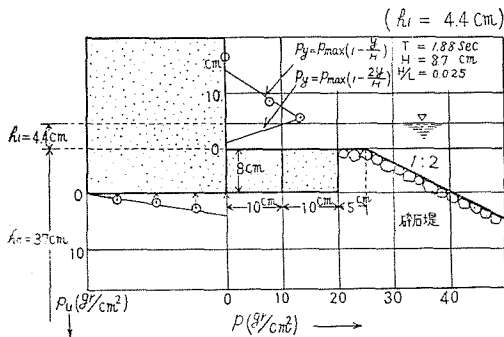


図-44 弱い碎波の最大同時圧力および揚圧力の分布 ($h_1 = 6.4 \text{ cm}$)

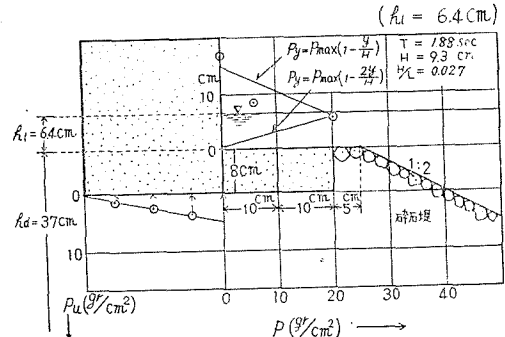


図-45 弱い碎波の最大同時圧力および揚圧力の分布 ($h_1 = 12 \text{ cm}$)

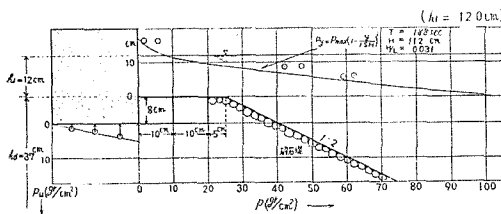
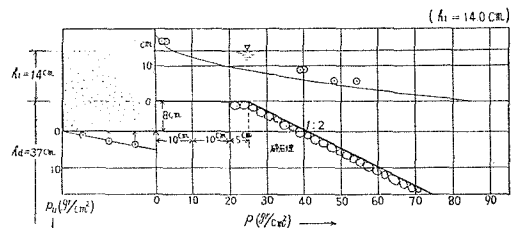


図-46 弱い碎波の最大同時圧力および揚圧力の分布 ($h_1 = 14 \text{ cm}$)



よつて定まる。単に基礎捨石堤天端に直立部を置いただけの場合には、ほぼ $(p_u)_{max} = 2 \sim 3 \text{ t/m}^2$ 、直立部前面に根固めブロックを1列または2列置いた場合にはほぼ $(p_u)_{max} = 1 \sim 1.5 \text{ t/m}^2$ にとればよいであろう。

5. 結 論

(1) 混成堤直立部の滑動について

「防波堤に働く碎波の圧力に関する研究」なる論文において、「混成堤直立部はそれに働く碎波の同時圧力が最大になったときに滑動する」という考え方を発表したのが、今回の実験によつてこの考え方が正しいことが証明された。しかも碎波の最大同時圧力の計算値が直立部の滑動に対する摩擦抵抗力より僅かに大であつても直立部は滑動した。このことは最大同時圧力の計算値の精度が非常に高いことを示すものである。

(2) 混成堤直立部の滑動摩擦係数の値

直立部の滑動に対する摩擦係数 f の値は

(a) 根固めコンクリート・ブロックあるいは根固め捨石がない場合には、

砕石で造つた基礎捨石堤においては、 $f = 0.77 \sim 0.89$ 平均の $f = 0.82$

玉石で造つた基礎捨石堤においては、 $f = 0.69 \sim 0.74$ 平均の $f = 0.72$

である。

(b) 直立部の港内側に根固めブロックおよび根固め捨石がある場合には、直立部を単に捨石堤の天端に置いた場合に比べて f の値はかなり増大する。特に直立部の下部を基礎捨石堤の中に埋めて根固めブロックを置いた場合には f の値は $18 \sim 23 \%$ くらい増大する。根固めブロックを用いず捨石のみの場合には、捨石堤天端上の高さは直立部の高さの $1/4$ 以上として十分の幅をもたせる必要がある。

(i) 基礎捨石堤が砕石堤で、直立部をその中に埋めなかつた場合、 $f = 0.89 \sim 0.96$ 平均の $f = 0.94$

同じく玉石堤の場合、

$f = 0.78 \sim 0.87$ 平均の $f = 0.83$

(ii) 基礎捨石堤が砕石堤で、直立部をその中に埋めた場合

$f = 0.97 \sim 1.01$ 平均の $f = 0.99$

同じく玉石堤の場合、

$f = 0.89 \sim 0.92$ 平均の $f = 0.90$

従来直立部の滑動抵抗力の計算において行つていたように、直立部と根固めブロックあるいは根固め捨石部とを異つた f の値を与えて別々に計算することは不適当で、根固め構造と直立部とを一体と考えて、上記の f の値を用いて滑動抵抗力を計算すべきである。

(3) 混成堤直立部に働く揚圧力

砕波が混成堤直立部に衝突したとき、直立部の底面に働く揚圧力の強度は、直立部に働く砕波の最大水平圧力強度 p_{max} には直接関係はなく、直立部前面に根固めコンクリート・ブロックあるいは根固め捨石を置くか否かによつて定まる。ただ単に基礎捨石堤天端にコンクリート・ブロックを置いただけの場合には揚圧力はやや大きく、港外端における最大揚圧力 $(p_u)_{max} = 2 \sim 3 \text{ t/m}^2$ である。直立部の下部を基礎捨石堤の中に埋め、その外側に根固め用のコンクリート・ブロックを置いた場合には、揚圧力は前者の場合に比べてその $\frac{1}{2}$ ないし $\frac{1}{3}$ に減少し、 $(p_u)_{max} = 1 \sim 1.5 \text{ t/m}^2$ である。揚圧力の分布は一般に外側端で最大 $(p_u)_{max}$ で、内側端で零なる三角形分布である。

混成堤直立部の下部を基礎捨石堤内に埋め、その内外に根固めブロックあるいは根固め捨石を置くことは、直立部の滑動に対する抵抗力を増大するのみでなく、直立部底面に働く揚圧力を減少して、直立部の安定上非常に効果がある。
