

構造物に作用する波力

運輸技術研究所技官 工学博士 浜 田 徳 一
同 上 光 易 恒
同 上 長 谷 直 樹

§ 1. 緒 言

(i) 防波堤等の海岸構造物に作用する波力についてはすでに幾多の研究が行われ、多数の公式が提唱せられている。これ等の公式はあるいは現地観測にもとずき (Stevenson, Gaillard, 広井, Luigi Luigi, D.A. Moliter 等) 又理論的に誘導せられ (Lira, Iribarren, Sainflou, Miche, Gourret 等) 更に又実験の根拠によっている。(Iribarren, Hudson, Bagnold, Minikin 等)

勿論この場合波力と総括せられている作用は極めて複雑なものであり、単純にその内容を論ずることは出来ない。しかし現在迄の分類に従うと波の種類によりそれは重複波、碎波の二つの場合に分けられ、構造物の側からは直立堤、斜面堤 (多くの場合捨石堤により代表せられる) に分けられる。従つて上述の諸公式はこのような波、及び構造物の性質により一応の分類がなされるべきであり、例えば米国では現在重複波公式としては Sainflou 公式、碎波公式としては Iribarren の改良型公式を捨石堤に用いており、その適用限界も厳密に規定している。我国に於いては更に直立堤に対する碎波公式として有名な広井公式があり、一般に用いられている。又新しいものとしては Bagnold, Denny 等の衝撃波力の実験、或いは Rouville 等の観測にもとづいての R.R. Minikin の衝撃波力の公式がある。筆者の今回の実験は特に厳格にこれらの諸公式を意味づけようとしたわけではないが、模型実験の立場から見て重複波公式から碎波公式への過程を求めてゆき、その間の実際の波力の変遷を明らかにしようとしている。但し Bagnold, Denny 等の言う衝撃波力の問題については今回は立入らないこととする。

(ii) 波力の問題に於いて現在迄かく無視乃至は軽視されて来たものとして、揚圧力に関する問題がある。しかしこの揚圧力の存在については我国に於いても既に北海道で貴重な実測が行われ、又各地の工事経験者によりその無視し得ないことが述べられている。又最近の Sweden の実験に於いても波力とともに堤体底面に作用する揚圧力が相当の大きさとなることが示された。今回の実験に於いても特にこの点に注意して測定を行い、後述する如く相当の大きさの揚圧力を得ている。この問題は今後愈々検討の必要があることが認められる。

(iii) 浅海或いは碎波域中に位置したブロックその他の物体に作用する波力の問題は現在迄殆んど考察せられず、普通定常流に於ける抵抗公式を波による周期的な流体運動の場合に応用してその水平力を概算することが行われて来た。しかし波による非定常運動に際しては当然その抵抗係数の変化及び仮想質量の存在を考慮しなければならず、これにより水平力の大きさは定常流の場合とは相当違つたものとなるのである。この報告に於いてはこの問題に対する考察の第一歩として立方体及び直方体型のブロックに関する実験について述べることにする。得られた結果は仮想質量の充分大きなことと、定常流に対しての抵抗係数より大きな値の抵抗係数が得られることを示し、この場合ブロックにかかる水平力は波に対するブロックの相対的な大きさによりその性質を変じてゆくことを知る。

§ 2. 水底ブロックに作用する水平波力

(i) 実験に使用せられた造波水路は延長 22m 巾が 0.6m 一様部の水深 0.35m その一端に 1/10乃至 1/15の勾配の斜面により碎波、磯波領域を生ぜしめている。実験に際しては特に反射波の影響に注意し、その影響が大きいと思われる部分は実験結果の整理に於いて削除した。実験に使用せられた波は次の 4 種である。

使用せられたブロックは一辺 5cm, 10cm の二種の立方体型のものであり、波の進方方向に正対して水底に置かれた。今このブロックの

表-1 実験波の諸性質

波の種類	T (sec)	$H(h=35\text{cm})$ (cm)	$L(h=35\text{cm})$ (cm)	δ_0	H_b (cm)	h_b (cm)	L_b (cm)
II-1	2.65	10.2	526	0.0104	12.8	8.5	240
II-2	2.05	9.8	367	0.02	12.5	12.7	224
II-3	1.43	10.2	249	0.037	11.7	13.5	157
II-4	1.03	10.2	149	0.067	8.8	10.2	96

一辺の長さを $4x$ とすれば前後面に於ける圧力差は $4P$ として次の如く置くことが出来る。

(但し波の進行方向を正の方向とする)

$$\frac{\Delta P}{\Delta x} = \left(\frac{\Delta P}{\Delta x} \right)_1 + \left(\frac{\Delta P}{\Delta x} \right)_2 \dots\dots\dots (1)$$

但し $\left(\frac{\Delta P}{\Delta x} \right)_1$ は波形の進行に伴う水中各部分の圧力変動に関するものとして、 $\left(\frac{\Delta P}{\Delta x} \right)_2$ は水粒子の運動に伴うブロックの形状及び摩擦抵抗に関係するものとする。それ故

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta x} \right)_1 = -\frac{\alpha}{C} \left(\frac{\Delta P}{\Delta t} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta x} \right)_2 = \mp \left(\frac{\rho}{2} \right) C_R \frac{u^2}{\Delta x} \dots\dots\dots (3)$$

(但し (3) 式の右辺の負号は u が正の時、正号は u が負の時に用いる) この二式を用い

$$\frac{\Delta P}{\Delta x} = -\frac{\alpha}{C} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\rho}{2} C_R \frac{u^2}{\Delta x} \dots\dots\dots (4)$$

(2) 式に於けるは主として仮想質量に関係しているものと考えられ、それは $\left(\frac{\Delta P}{\Delta x} \right)_1$ が主として加速度項と結ばれていることから首肯される。又 (3) 式中の C_R は主としてブロックに対する流体の運動の Reynolds 数及び粒子運動が非定常で且つ往復運動を行つていることの影響を受けると考えられる。立方体型のブロックの場合は流速の増大に伴い Reynolds 数の影響は速やかに消失するであろう。実験に際しては次の如く二種の圧力測定方式を用いた。即ち固定ブロックの前後面に設置せられた直径 1cm の受圧面を有する磁歪型圧力計に記録せられた圧力を用いて、(1) 式の $\frac{\Delta P}{\Delta x}$ としたものと、ブロックに若干の水平移動を許し、これを電気抵抗歪計と結合してブロックに作用する水平力を求め、これを $\frac{\Delta P}{\Delta x}$ としたものの二者を用いた。先づ前者の場合から述べてゆく。

(ii) この場合の測定は水深 35cm 一様部及び表一各々の初期碎波点 (i.b.p.) に於いてなされた。但し初期碎波点に於いては水深の不足のため一辺 5cm のブロックのみを用いている。(4) 式に於いて右辺の計算には $\frac{\partial P}{\partial t}$, u^2 , C を必要とする。 u はブロックが存在しない場合のその場所の流速 (これは勿論周期的に変動する) をプロベラ式流速計により測定し、又 $\frac{\partial P}{\partial t}$ はブロック前後面の受圧部に於ける $\frac{\partial P}{\partial t}$ の平均値により代表させることとした。これによる $\frac{\partial P}{\partial t}$ の値が充分信頼し得ることはブロックの側面底面に作用する圧力に関する検討により示された。波速 C はブロック直上及びその沖方 50cm に設置せられた二つの電気抵抗型

表一 2-1 正方形ブロックの α 及び C_R の値 (一様水深部) (圧力差の測定より求めた値)

case	T (sec)	H (cm)	H/h	h/L	$C_R \times 10^3$ (gr-cm 単位)		α	
					5cm ブロック	10cm ブロック	5cm ブロック	10cm ブロック
II-1	2.65	10.2	0.29	0.067	2.0 (1.5)	25 (1.9)	2.8 (2.7)	2.4 (2.0)
						2.3 (1.8)		2.3 (2.0)
					2.2 (1.6)	2.1 (1.6)	2.4 (2.7)	2.4 (2.2)
平均					2.1 (1.6)	2.3 (1.8)	2.6 (2.7)	2.4 (2.1)
II-2	2.05	9.8	0.28	0.095	1.6 (1.7)	2.0 (2.4)	2.3 (2.3)	2.3 (2.3)
						2.1 (2.3)		2.3 (2.5)
						2.1 (2.3)		2.2 (2.3)
					1.7 (1.9)	2.1 (2.3)	2.3 (2.1)	2.6 (2.5)
平均					1.7 (1.8)	2.1 (2.3)	2.3 (2.2)	2.4 (2.4)
II-3	1.43	10.2	0.29	0.140	1.5 (1.3)	2.0 (1.8)	2.4 (2.0)	2.4 (2.3)
					1.5 (1.3)		2.0 (1.7)	2.3 (2.3)
					1.8 (1.5)	1.8 (1.8)	2.3 (2.0)	2.3 (2.2)
平均					1.6 (1.4)	1.9 (1.8)	2.2 (1.9)	2.3 (2.2)
II-4	1.03	10.2	0.29	0.233			2.5 (1.9)	
							2.5 (1.9)	2.2 (2.0)
							2.4 (1.8)	2.1 (2.0)
							2.2 (1.7)	2.3 (2.0)
							2.1 (1.5)	2.4 (2.0)
平均							2.1 (1.8)	2.9 (2.0)
総平均					1.8 (1.6)	2.1 (2.0)	2.4 (2.2)	2.4 (2.2)

波高計の記録により求められている。実験結果はほぼ波頂に於いて u は最大、 $\frac{\partial P}{\partial t} = 0$ であることを示し、波形が静水面を切る点に於いて $u=0$ であることを示している。よつてこの二点に着目して (4) 式から α , C_R を算出出来、得られた結果は表-2 の如くである。

なおこの場合の Reynolds 数は夫々の場合の u の最大値とブロックの代表的長さとしての辺長をとる時 $(1 \sim 4) \times 10^4$ であり、その形状からすれば抵抗係数は C_R は Reynolds 数に殆んど無関係と予想され、得られた結果も又よくそれを示している。但し表-2-1の () の内の数字は $\frac{dP}{dx}$ には実測値を用い、右辺の $\frac{\partial P}{\partial t}$, u^2 , C には夫々微小振巾波としての計算値を用いたものであるが、得られた結果は右辺の計算に実測値を用いたものと大きな差異はない。

表-2-2 正方形ブロックの α 及び C_R の値
(i.b.p.) (圧力差の測定より求めた値)

波の種類	T (sec)	H_p (cm)	H_b/h_b	$(h/L)_p$	$C_R \times 10^3$ (gr-cm 単位)	α
1	2.67	12.5	1.56	0.034	2.9 2.1	1.9 2.7
平均					2.5	2.3
2	2.01	12.4	1.0	0.056	1.6 1.8 1.7	2.4 3.0 1.9
平均					1.7	2.4
3	1.41	11.2	0.82	0.088	1.6 1.9 1.9	2.4 2.1 2.2
平均					1.8	2.2
4	1.07	9.4	0.90	0.10	2.2 1.9 1.6	2.1 2.0 2.1
平均					1.9	2.1
總平均					2.0	2.3

表-3 正方形ブロックの α 及び C_R の値 (一樣水深部) (全水平力の測定より求めた値)

Case	T (sec)	H (cm)	H/h	h/L	$C_R \times 10^3$ gr-cm 単位)		α			
					5cm ブロック	10cm ブロック	5cm ブロック		10cm ブロック	
1	2.92	9.2	0.26	0.069	0.9	1.2	u 3.4	d. 3.1		
					0.7	1.2				
					0.6	1.5				
					0.6	1.7				
					0.6	1.5				
平均					0.7	1.4	3.0	2.7		
2	2.25	9.7	0.28	0.096	1.3	1.3	2.3	2.1	2.1	2.7
					1.0	1.3	2.1	2.0	2.3	2.5
					1.0	1.4	2.3	1.9	2.3	2.7
					1.5	1.8	2.5	2.0	2.2	2.4
					1.6	1.5	2.6	1.9	1.7	2.4
平均					1.4	1.5	2.4 ~ 2.0		2.1	2.5
3	1.42	11.0	0.31	0.154	1.1	1.3	2.4	2.0	1.9	2.4
					1.6	1.4	2.6	1.9	2.2	2.3
					1.6	1.3	2.7	1.8	2.3	2.2
					1.3	1.6	2.6	2.0	2.0	2.2
					1.7	1.4	2.5	2.0	2.1	2.2
					1.6	1.8	2.5	2.2	2.1	2.1
					1.1	2.1	2.5	2.2	2.1	2.1
						2.0			2.1	2.2
平均					1.4	1.6	2.5 ~ 2.0		2.1 ~ 2.2	
4	1.06	8.9	0.25	0.246	1.2	0.6	2.1	1.8	1.7	1.9
					1.5	0.9	2.3	1.7	2.2	2.1
					2.2		2.3	1.7		
					1.5	2.0	2.2	1.7	2.3	2.2
					1.6		2.2	1.7		
					1.9	0.4	2.0	1.7	2.1	2.3
					1.9		2.3	1.8		
					1.1	0.4	2.3	1.7	2.1	2.2
					1.5	1.5	2.3	1.8	2.3	2.5
					1.8					
平均					1.6	1.0	2.2 ~ 1.8		2.1	2.2
總平均					1.3	1.4	2.3		2.2	

(iii) 次にブロック全体に作用する全水平力について (4) の左辺は測定値を用い、その右辺は夫々微小振巾波としての計算を用いて算出したものが表-3である。

表-2, 表-3を比較すれば α についてはその値はほぼ同じく得られ、この場合の仮想質量のための係数は平均して 2.2 附近にあると考えられる。

最近の T. E. Stelson 及び F. T. Mavis の仮想質量測定のための実験によれば、もし充分広い流体中に立方体が位置している時、仮想質量からのみ α が成立する時は α の値は 1.67 となるべきことが示されている。今回の実験結果はこの値よりも大きい。それは勿論水底面にブロックが接している影響が含まれているためである。次に抵抗係数 C_R が波による往復運動中に於いて定常運動の場合に較べて増大することは既に球に関する M. P. O'Brien 及び J. R. Morison の実験中に指摘されて居り、測定値は Reynolds 数 1×10^4 の附近において定常流の場合の約 1.7 倍となつている。今回の実験ではブロック前後面中央の各受圧板による記録を用いた場合 1.6~2.0 (C.G.S. 単位) と得られブロックに作用する全水平力を用いた場合 1.3~1.4 と得られている。

前者の場合は圧力勾配がやゝ過大となつていることと推定せられているから、後者に近い値を用いほぼ 1.5 となるべきであろう。正方形板が垂直に定常流にさらされた場合の抗力から求められた $C_R = 1.16$ (C.G.S. 単位) と比較して 1.3 倍以上に達しており、球の場合と同様の傾向を示すこととなる。

(iv) 次にこの実験に於いて得られた C_R, α の値がより Reynolds 数の大きい実際の海面に於いて適用し得るものと考えて見よう。形状の抵抗を主とする立方体ブロックにつき既述の様な Reynolds 数で行われたこの実験は、その原型への応用に於いて充分信頼してよいものとする。

今 (4) 式に、求められた C_R, α を入れて

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{2.2}{C} \frac{dP}{dt} + \frac{\rho}{2} 1.5 \frac{u^2}{dx} \dots\dots\dots (5)$$

と置き表-2-1の結果を参照して微小振巾波としての計算を行えば (但し計算には底流速を使用するものとする)

(5) 式の第 1 項と第 2 項との比は

$$K = \frac{\frac{2.2}{C} \frac{dP}{dt}}{\frac{\rho}{2} 1.5 \frac{u^2}{dx}} = \frac{2.2 \rho \frac{\partial u}{\partial t}}{\frac{\rho}{2} 1.5 \frac{u^2}{dx}} = 2.94 \frac{dx}{a} \sinh \frac{2\pi h}{L} \frac{\cos \frac{2\pi}{T} t}{\left(\sin \frac{2\pi}{T} t\right)^2} \dots\dots\dots (6)$$

時間的平均値をとれば

$$\bar{K} = 2.94 \times 1.28 \frac{dx}{a} \sinh \frac{2\pi h}{L} \dots\dots\dots (7)$$

となる。表-4 はその計算値を示している。

表-4 によればブロックに作用する進行波による水平力についてはほぼ次の如く言い得ることがわかる。即ち

A. ブロックの大きさが波高と比肩し得る時はそのブロックの位置如何にかゝらず常に加速度項を考慮しなければならぬ。

B. ブロックの大きさが波高の 1/10 の程度の場合に於いても極く浅い海の場合を除き加速度項を省略することは出来ない。

C. ブロックの大きさが波高の 1/100 の程度になれば極く深い場合 (即ち底層の粒子運動が微弱な場合) を除き一般に加速度項を無視してよい。

これは重要な結果であり大体に於いて港湾及び海岸工事に用いられる水中のブロックの大きさは $\frac{dx}{a} = 1 \sim 0.1$ の間にあるから、これに作用し移動させようとする水平力に関しては常に (5) 式の右辺第一項を考慮しなければならぬこととなる。この傾向を実験に於ける実測値について示せば表-5, 表-6 の如くである。茲に表-5 は水深 35cm 一様部につき又表-6 は初期砕波点について $\left(\frac{dP}{dx}\right)$ の項の最大値及び u が最大となり加速度項が消失した場合の $\left(\frac{dP}{dx}\right)$ の値 (何れも波の進行方向に向う水平力を負、逆方向に向う水平力を正とすることとなる) を示し、更にその比を求めてある。

$\frac{dx}{a}$ の値は表-5, 表-6 の両者においてそれほど大きな変化はなく、この場合の $\left(\frac{dP}{dx}\right)_{\max} \left/ \left(\frac{dP}{dx}\right)_{\text{by } u}\right.$ の値は主としてその h/L の値により支配されることがわかる。そして砕波点においては加速度項の抵抗中に占める割合は減少して行き、その程度は波長の長い波において甚しいわけであるが、尚その大きさは

表-4 正方形ブロックに作用する波力
(加速度項と抵抗項との比)

h/L dx/a	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5
1	1.18	2.52	5.90	12.0	43.4
0.1	0.118	0.252	0.590	1.20	4.34
0.01	0.0118	0.0252	0.0590	0.120	0.434

全抵抗中の数十パーセントは占めている。そして表-5, 6の結果は表-4の計算値の傾向と完全に一致している。

又この場合特に注意すべきは波の進行方向及び逆方向における $\left(\frac{dP}{dx}\right)$ の最大値の関係である。表-5によれば水深 35cm の一様部では両者ほぼ相等しいことを示し、波長の長い波では進行方向への水平力が逆方向のそれにより僅かに大であり、波長の短い波ではその反対となっている。これに対し初期砕点では進行方向へのそれは逆方向へのその3~4倍に達し、且その値も水深 35cm 一様部のそれと比較し著しく大きくなっている。この傾向は砕点附近に於ける波形の変形、特にその前傾により導かれたものと考えられる。しかし使用した波の initial steepness. が0.0104より0.067の範囲にあり特に長いうねりの場合を除きほぼ一般の海面波を含むに拘らず、水深 35cm 部の波高を $H/L=0.28$ と限定したこの実験で水深 35cm 一様部に於いては言う迄もないが砕波点に於いても得られた波の進行方向への水平力の最大値が波の性質によりそれほど異つていない $\left(\left(\frac{dP}{dx}\right)_{\max} \left/ \left(\frac{dP}{dx}\right)_{\text{by } u: \max}\right.\right)$ の値の変化は明らかに一定の傾向を持っているに拘らず) と言うことは注意されなければならない。

(5) 式を用いた水底ブロックにかかる水平力を計算する場合浅海波としては微小振巾波理論を用いて大差ないことは既に表-2において示めされている。しかしこれによつて初期砕波点附近に見られる正負の水平力の不均衡を現わすことは出来ない。例えば表-2-2の初期砕波点に於ける C_R, α の算出には $\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)$, C_u の実測値を用いているが、若し之を微小振巾波との仮定のもとに計算を用いて求めれば α については、波の進行方向につき3~5, 逆方向に対し、0.6~1.3の値を得て波形前傾の影響が明瞭に現われてくる。微小振巾波としての計算に補正係数を乗じて(5)式を、用いることも可能ではあるが、より厳密には初期砕波点附近に於いては孤立波理論乃至は非線型浅海波理論により導かれる(5)式の右辺の値を用い $\frac{dP}{dx}$ の値を算出しなければならない。

この問題については今後磯波帯に於ける同様の問題と併せて検討を進めて行く予定である。尚この場合には斜面勾配の程度も影響してくることとなり今回の実験は1/15勾配で行われているがその結果は1/5~1/4等の急勾配の場合には更に補正を必要とするであろう。

(v) (4) 式に於ける加速度項の係数 α 及び抵抗係数 C_R の性質を更にはつきりさせるために次表に示す如き立方体でないブロックを使用して今迄と同様にこれに作用する波の水平力を測定した。

立方体ブロックの場合と全く同様に測定されたブロックにかかる全水平力と微小振巾波として計算された

表-5 正方ブロックに作用する波力
(一様波部における測定値)

波の種類	H/h	h/L	$\left(\frac{dP}{dx}\right)_{\max} \text{ gr/cm}^2$	$\left(\frac{dP}{dx}\right)_{u: \max} \text{ gr/cm}^2$	Ratio
1	0.28	0.0607	-0.22	-0.08	2.75
			-0.19	-0.07	2.72
			0.19	0.06	3.16
			0.17	0.05	3.40
2	0.28	0.095	-0.25	-0.05	5.00
			-0.23	-0.06	3.84
			-0.17	-0.06	2.84
			0.18	0.06	3.00
3	0.28	0.140	0.20	0.06	3.33
			0.23	0.05	4.60
			-0.21	-0.04	5.25
			-0.22	-0.05	4.40
4	0.28	0.233	-0.22	-0.04	5.50
			0.20	0.04	5.00
			0.23	0.05	4.60
			-0.16	-0.0	∞
4	0.28	0.233	-0.16	-0.01	16
			-0.16	-0.0	∞
			0.22	0.02	11
			0.20	0.01	20
4	0.28	0.233	0.20	0.03	7

表-6 正方形ブロックに作用する波力
(i, b, p , に於ける測定値)

	H/h	h/L	$\left(\frac{dP}{dx}\right)_{\max} \text{ gr/cm}^2$	$\left(\frac{dP}{dx}\right)_{u: \max} \text{ gr/cm}^2$	Ratio
1	0.28	0.0607	-1.08 +0.5	-0.88	1.2
2	0.28	0.095	-0.87 +0.2	-0.65	1.4
3	0.28	0.140	-0.71 +0.17	-0.40	1.8
4	0.28	0.230	-0.75 +0.27	-0.32	2.98

Case	ブロックの形状 cm	設置方向
1	5 × 5 × 10	← 波の進行方向 
2	10 × 10 × 5	← 
3	10 × 10 × 3	← 

その値とを比較して求めた α 及び C_R の値は (表-7) 及び (表-8) に示した。この表に於ける各数値は平均値を示し比較のため (表-3) に於ける 5cm 及び 10cm の立方体ブロックについて得られた値もまとめて記入した。一方前に (iii) に於いて述べた如く α は仮想質量 (virtual mass) と密接に関係しており或いは仮想質量からのみ成立するとも考えられる。そして仮想質量からこの α が成立するものとすれば次の様な関係式が簡単に導かれる。

$$\alpha = 1 + \frac{\rho V'}{\rho V}$$

ここに ρ は水の密度、 V はブロックの体積、 $\rho V'$ は附加質量 (added mass) を表わす。従つて附加質量 $\rho V'$ の値を理論的に又は実験的に決定すればかかる考え方による α の値は求まる事になる。表-7 の最下段の値は附加質量を実験的に求めて前式より算出した α の値である。なお附加質量はブロックの空中に於ける固有振動数 (強い板パネで支持された状態に於ける) 及び波力測定時と同一の状態に水底面に設置した場合の固有振動数 (同上) とを測定して両者の値を比較して求めた。

(表-7) よりわかる如く波力の測定より求めた α の値は仮想質量に関する実験より導かれる α の値よりわずかに大きい傾向があるが大体に於いて一致している。勿論波力測定より求めた α の値には波の性質が仮定した微小振巾波と異つているための影響も含まれているが前に示した (表-2-1) 及び (表-3) にした結果を比較すれば様水深部ではその影響は微弱である。従つて立方体型のブロックの場合には加速度項の係数 α は仮想質量より成立するものと考え得るであろう。

表-7 加速度係数 α のブロックの形状による変化及び附加質量との関係

Case	T	α						
		ブロックの 状態 cm	5×5×10 cm ³	5×5×5	10×10×10	10×10×5	10×10×3	半 球 ($r=5$)
II-1	2.92	u^*	1.8	3.0	—	2.8	4.3	1.6
		d	1.8	2.7	—	3.2	4.8	1.5
II-2	2.25	u	1.8	2.4	2.1	3.0	4.2	1.7
		d	1.4	2.0	2.5	2.8	4.1	1.8
II-3	1.43	u	1.7	2.5	2.1	2.8	3.6	1.6
		d	1.4	2.0	2.2	2.3	3.5	1.6
II-4	1.06	u	1.6	2.2	2.1	2.7	3.8	1.6
		d	1.4	1.8	2.2	2.6	3.4	1.9
總 平 均			1.6	2.3	2.2	2.8	4.0	1.7
$\alpha \left(= 1 + \frac{\rho V'}{\rho V} \right)$			1.4	2.3	2.0	2.3	3.5	1.5

* u 及び d の意味は表-3 の欄と同じ

次に C_R の値についてみると (表-8) に示す如く波の進行方向に向つて長いブロックでは値が小さく短いもの、即ち板状のブロックを波方向に面を向けて設けた場合には大きくなる傾向がある。 C_R の値を求める際には波の性質が微小振巾波のそれとは異つている事の影響が

表-8 抵抗係数 C_R のブロックの形状による変化

Case	ブロックの 形状 c	$C_R \times 10^3$ (gr-cm 単位)				
		5×5×10	5×5×5	10×10×10	10×10×5	10×10×3
II - 1		1.0	0.7	1.4	1.4	1.8
II - 2		1.0	1.4	1.5	1.4	1.8
II - 3		0.8	1.4	1.6	1.1	1.6
II - 4		1.5	1.6	1.0	2.4	1.8
總 平 均		1.1	1.3	1.4	1.6	1.8

極めて敏感にきいているので厳密な値については、更に精密な実験が必要である。しかし実用上は大体 (表-8) に示す如き値を使用してよいであろう。

§ 3. 初期碎波点近傍に於いて垂直壁に作用する波圧

(1) 表-1 に示される波の初期碎波点は $h_b = 13.5 \sim 8.5$ cm の間にあるから、これ等の波を用い 1/15 勾配の斜面上に於いて静水面よりの水深 1 cm の点に設けられた直立壁に作用する水平波力を求めることとする。受圧計としては受圧板直径 1 cm の磁歪型圧力計を用いている。この実験に於いては直立壁からの多少の反射波の発生は免れ得ないため、反射波が造波板に返り再び受圧面に達するまでの時間域を用いて波形及び圧力の測定を行つている。

なお受圧計の特性としては 200 サイクルまでの周波数の圧力変動は正確に測定可能であるが、200~1000 サ

イクルの間の圧力変動については著しく不正確乃至は測定不能であり、従つて Bagnold, Denny 或いは Minikin 等の意味に於ける衝撃圧力についてはこの実験においては立入ることが出来ない。

垂直壁面上の波圧分布は下記の如く分類して測定した。

写真—1, 2 は実験状況を示している。

図—1 は Case (a) に属する場合の最大圧の垂直方向の分布であり静水時の圧力よりの増加量により示されている。図に於いて○印は重複波的な性質の強いもの、△印は半碎波時性質を有するもの、×印は碎波的性質の強いものを示している。

これによれば特に波長が長く且重複波的傾向の示される周期 2.65sec の波の場合は静水面下 8cm, 2cm の両位置における最大圧はほぼ同じく、静水面上 4.5cm においては最大圧は減少している。しかし周期 2.05sec の波の場合は状況は著しく異なりその殆んどは碎波的な性質を示して静水面上 4.5cm にある受圧面の受ける波力が最も大きい。しかも測定値の散乱の程度も同位置に於てもつとも甚しく、これは重複波的傾向を示すものから完全な碎波に至るまで多様の波形を含むがためである。即ち重複的な性質を帯びる時は静水面下

(a) 越波を許さぬ場合	堤体下面は斜路と接着	堤体底面より受圧計迄の鉛直距離 静水面よりの距離		
		4	10	16.5(cm)
(b-1) 越波を許す場合 (堤体天端高 +3cm)	堤体下面は斜路と接着	同	上	4 10 —
		同	上	-8 -2 —
(b-2) 越波を許す場合 (堤体端高 +4cm)	堤体下面と斜路との間 隙 1cm	同	上	4 10 —
		同	上	-7 -1 —

写真—1 碎波点附近に設けた垂直壁に作用する波（越波を許さぬ場合）

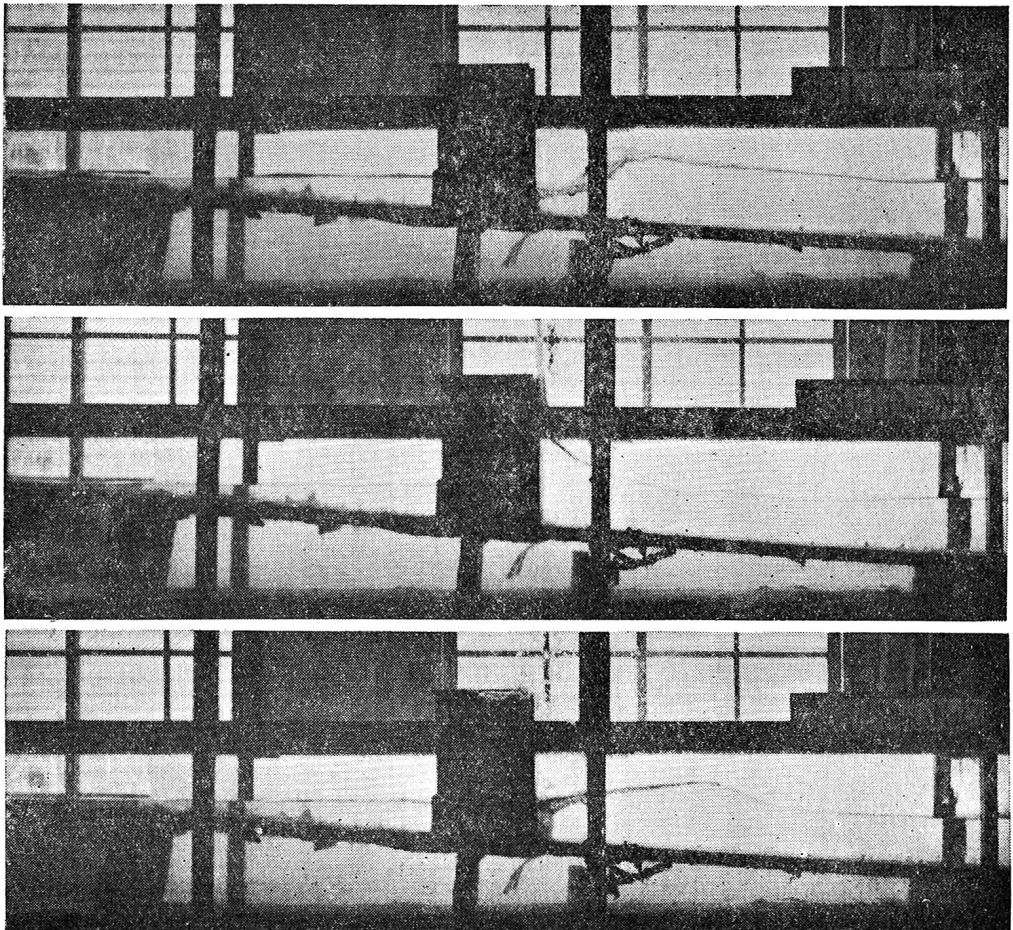


写真-2 砕波点附近に設けた垂直壁に作用する波（越波を許す場合）

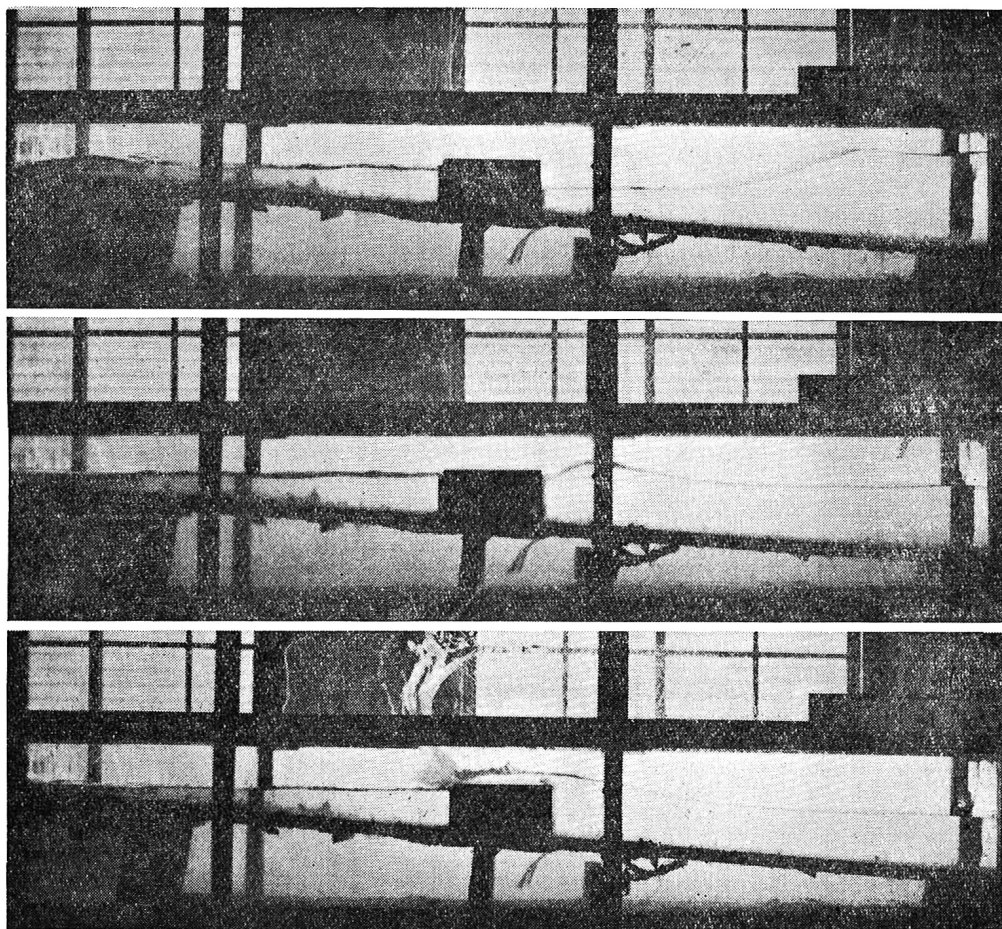
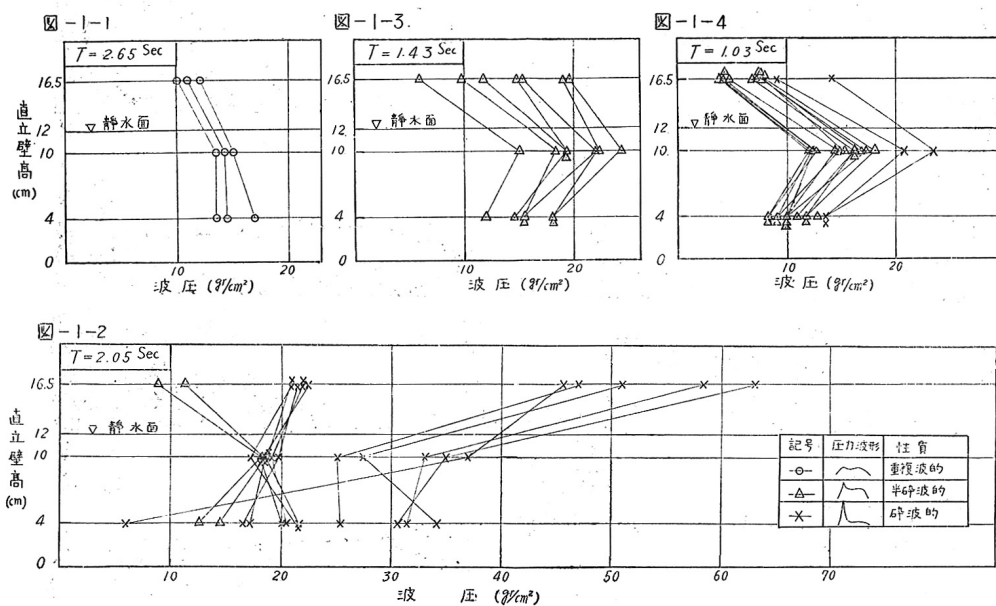


図-1 直立壁圧力分布図。1/15勾配斜面上、水深12 cm に設けた直立壁に作用する最大波圧



2cm の圧力が最大、同 8cm の圧力が之に次ぎ、静水面上 4.5cm の圧力が最小であるが、碎波的性質が強い場合は静水面下 2cm、同 8cm の圧力の大きさは似たもので静水面上 4.5cm の圧力は極めて大きく水深 35 cm 部の波高（これはほぼ沖波波高と一致する）の 5～6 倍に達している。又両者の中間的な場合には垂直方向にほぼ一様な波力（いわば広井式で仮定せられるが如き）求められる。Bagnold, Denny 等の衝撃波力の実験においても衝撃圧が強力に現われるのは静水面上の部分であり今回の測定値の大きさは波高の数十倍と云う彼等の実験値と比較すれば遙かに小であるが同様の性質を示している事となる。周期 1.43 秒、1.03 秒の二つのタイプの波においては重複波から碎波への過程にある波の波圧が現われていると見る事が出来る。特に周期 1.03 秒の波において静水面上 4.5cm、静水面下 8cm の 2 点ではその圧力は非常に低くなっている。これは碎波的な場合においてさえ認められ、その原因は波長が極めて短かいが故である。

沖波々高 10cm の進行波に対し水深 12cm の点に設けられた直立壁に作用する波圧はその大きさ、性質ともに、その周期の変化に伴いこの様に変化する。勿論この水深は極めて浅く、通常波高の 1.7～2.0 倍以浅の水深の直立壁の場合は碎波公式を使用すると云う現在の一般的な取扱いからすれば広井公式その他の碎波公式が用いられるべきである。しかも実情において図-1 の如く極めて多様且複雑な波圧形式ならびにその大きさが見られるわけである。この点について更に詳細に検討して見よう。図-2 は (a) の越波を許さない場合 (b-1) の越波を許す場合の兩者について縦軸に測定圧力（個々の場合の最大値） gr/cm^2 、横軸に周期 sec. をとつたものである。記入された各記号の持つ意味は既に述べた通りであるが、之によりほぼ一定の沖波々高

図-2-1 碎波点附近の直立壁に作用する波圧
(静水面下 8cm の測定点)

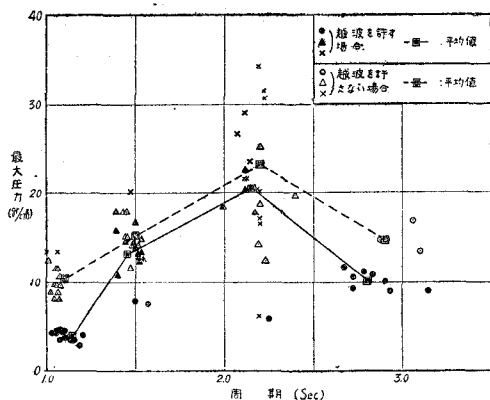
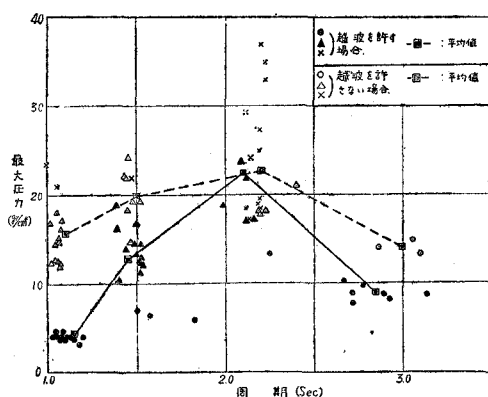


図-2-2 碎波点附近の直立壁に作用する波圧
(静水面下 2cm の測定点)



に対し測定値の乱散は極めて甚しく又越波を許すか許さぬかにより圧力の大きさ、又その性質が相当に変化する事がわかる。図-2 の主要な性質を表示すると右の如くである。

この波の initial Steepness は 0.0104 から 0.067 の範囲に入っているが上表の如く測定圧力は散乱している。但しここに若干の傾向が現われている。即ち (a) 図-2 の平均値曲線から明らかな様に越波を許した場合は測定圧力の平均値は減少している。(b) initial Steepness が中間的な

静水面下-8cm の測定点

波の種類	代表周期 (sec)	測定個数	最大値 (gr/cm^2)	平均値 (gr/cm^2)	最小値 (gr/cm^2)	波圧の性質
(a) 1	2.65	3	17	14.8	13.6	重複波的
(b-1) 1	〃	8	11.7	10.2	9.0	同上
(a) 2	2.05	16	37.8	23.2	6.2	碎波的
(b-1) 〃	〃	8	29.0	20.6	5.8	半碎波的
(a) 3	1.43	7	18.0	15.3	11.7	同上
(b-1) 〃	〃	16	20.2	13.3	7.6	同上
(a) 4	1.03	12	13.5	10.5	8.1	半碎波的
(b-1) 〃	〃	14	4.6	4.0	2.9	重複波的

静水面下-2cm の測定点

波の種類	代表周期 (sec)	測定個数	最大値 (gr/cm^2)	平均値 (gr/cm^2)	最小値 (gr/cm^2)	波圧の性質
(a) 1	2.65	3	15.1	14.3	13.4	重複波的
(b-1) 1	〃	8	10.4	9.1	7.8	同上
(a) 2	2.05	14	37.0	22.8	17.3	碎波的
(b-1) 2	2.05	9	37.8	22.6	13.4	碎波的

場合に測定圧力の平均値は大となつている。(c) 碎波的なもの程個々の波に対する測定圧力の散乱が甚しい。の3項である。このうち(b)は碎波位置と直立壁位置との相関の問題であり之を一般的なものとは云い難いが、(a)・(c)は一般的に成立つものと云い得る。特に(c)の碎波的圧力の測定値の散乱の問題は air cushion を含む衝撃圧力の場合をも含めて考える時、今回の実験におけるものよりも更に甚しくなる事が明かであり、測定圧力が沖波々高の数倍の範囲内に止どまつている現在の取扱いではその散乱程度は寧ろ過小であると云つて良いであろう。次に各々の場合の平均値についてその総平均値を求めて見ると右上表の如くである。又

図-3 は(b-2)即ち直立壁底面が1/15勾配の斜面から 1cm だけ上方にあり、その間の水の流動が許されている場合につき図-2同様の各周期についての測定圧力の平均値曲線を描いたものである。その傾向は図-2(b-1)の場合と殆んど一致しており、上表の如く測定平均値につきその総平均値を求めると右表の如くなる。

以上の場合若し我々が広井公式を用いれば沖波々高 10cm に

対し 15gr/cm² の垂直方向に一樣な水平力を得るわけであるが、この値は我々の実験により、得られた総平均値において(b-1)・(b/2)の場合のそれよりやゝ大きく、越波を許さぬ(a)の場合よりはやゝ小となつており、又その垂直方向の分布は我々の実験では既述の図-1の如くである。以上の様にして個々の測定値の散乱は極めて甚しいものではあるが、その総平均値としては実験結果が極めて広井公式に近い値を示したと云う事は注目すべきであり、第3節に記す揚圧力の性質を考慮する時この問題は更に興味あるものであろう。

(ii) 次にこの実験において直立壁前面の波が重複波的なものから漸次碎波的なものに移つてゆく時、どの様に直立壁への波圧が変化して行くかを考察して見よう。先づ完全に重複波的な場合としては既に光易、長谷により行われた実験結果をあげる事が出来る。そして水深 35cm の一様部において進行波としての波高 4~14.3cm の波を用いて行われたこの実験においてさへ既に Steep な波については、重複波の波圧構成を特徴づける 2倍周波数成分の影響が無視し得ない事が示されている。微小振巾波としての近似計算を用いれば圧力の 2倍周波数成分の基本周波数成分に対する割合は水底において

$$\frac{\pi}{2} \delta \sinh \frac{2\pi h}{L} \cos \frac{4\pi t}{T} \dots\dots\dots (8)$$

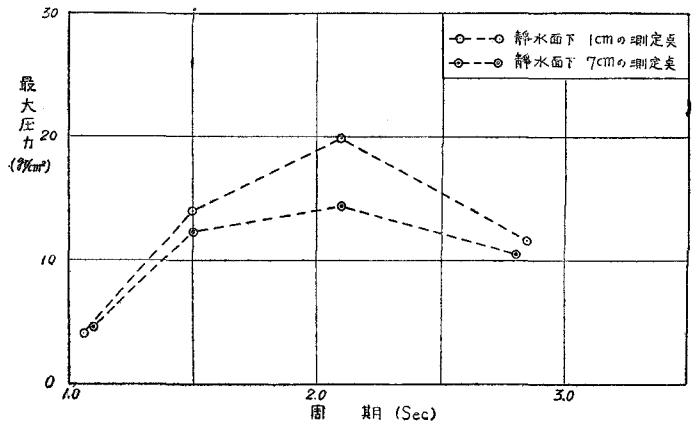
であり、碎波点近傍においては δ の増大とともに 2倍周波数成分の影響は顕著となる。又上式においては周期の大きな波では 2倍周波数成分の影響が余り現われないう事となるが、浅水中における波形の変化を考慮する時は必ずしもそうではない。即ち碎波に近い水深で生じている重複波では常に波峯の集中が見られ決して同じ周期の微小振巾波の様に緩勾配な波峯ではなく、そのため波谷部において 2倍周波数成分を無視し得るとしても波峯部においてはその影響は極めて大きくなつていく。

(8)の近似計算を導いた原式にたちかえり、碎波点近くの大きく変形した重複波に使用し得る直立壁面における圧力変動の近似式を求めると

$$\left. \begin{aligned} \frac{p}{\rho} &= \frac{1}{4} \left(1 - \frac{\sinh^2 2\pi(n+y_1/L)}{\sinh^2 2\pi h/L} \right) \frac{d^2 \eta^2(t)}{dt^2} \\ &+ \frac{\eta(t) g \cosh 2\pi(h+y_1)/L}{\cosh 2\pi h/L} - g y_1 \\ y_1 &= \eta(t) \frac{\sinh 2\pi(h+y_1)/L}{\sinh 2\pi h/L} + y_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

測定位置	-8cm			-2cm		
Case	a	b-1	比	a	b-1	比
総平均値 gr/cm ²	16.0	12.0	1.33	18.2	12.2	1.49

図-3 碎波点附近の直立壁に作用する波圧(平均値)
(越波を許し下面に 1cm の間隔がある場合)

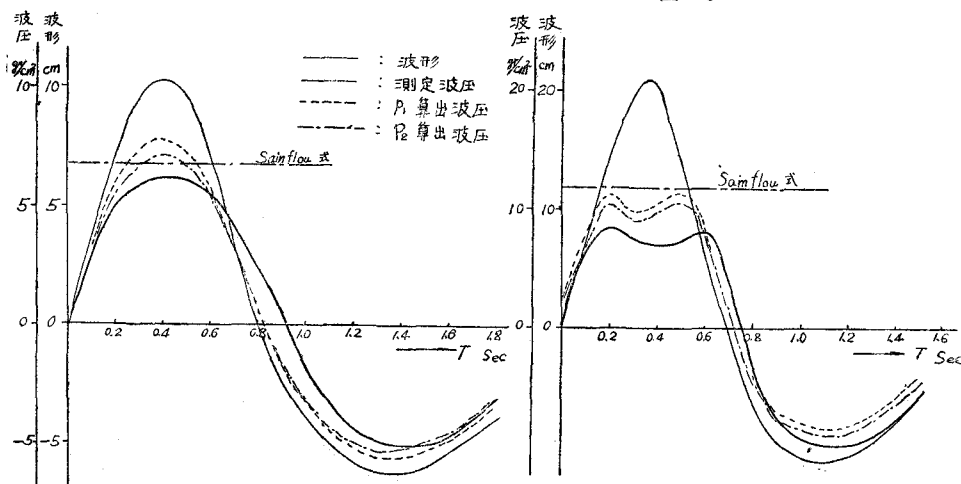


測定位置	-7cm	-1cm
総平均 gr/cm ²	10.4	12.4

図—4, 5, 6, 7 直立壁に作用する波圧変動及表面波形 (圧力変動の実測値と計算値との比較)

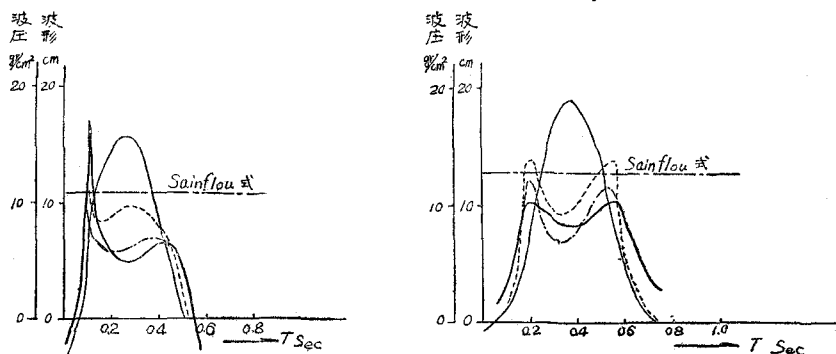
図—4 $T=1.94$ sec

図—5 $T=1.55$ sec



図—6 $T=3.07$ sec

図—7 $T=1.48$ sec



但し $\eta(t)$ は垂直壁前面における静水面からの水位変動量を示している。上式では近似計算のため基本周期に関する波長 L を用いているが使用に際しては波形各部の時間的変化の程度に応じその周期を適当に調節して波形各部に応じた L の値を算出し、基本周期に関する L を用いない方がより測定値に近い値を得る事が出来る。図—4, 5, 6, 7 は波形、波圧の実測値とこの様にして計算せられた計算値とを比較したものである。但し波形は垂直壁前面 1cm の点において測定せられた値をもつて代表している。

今これ等について説明すると図—4, 5 の波は前述光易、長谷の報告中第5図 a. b-1 に登載せられた波形、波圧に関するものであり、その波の性質は水深 35cm の一様部において次の如くである。(上表)

図—4, 5 とともに波形、直立壁底部 (—35cm) における波圧の実測値、及び (9) 式による計算値2種 (周期を基本周期のみにとつたもの; p_1 , 及び波峯部、波谷部に対して異なつた周期を用いたもの; p_2), 更に Sainflou 簡略公式による波圧計算値を記入してある。図—4 の平坦な波に対しては2倍周波数成分の影響は少なく Sainflou 式による計算値は (9) 式による計算値よりも寧ろ実測最大値に近い値となつている。しかし図—5 に示される波においては実測、計算ともに2倍周波数成分の影響は明確に現われ、実測波圧の零点のずれを訂正すれば (9) 式による計算値との一致は極めて良好と考えられる。又 Sainflou 式による値は実測値、(9) 式による計算値のいずれよりも大きく、既にこの場合の計算には2倍周波数成分を加算する事なしには波圧の実情を説明し得ない事を知る。

(8) 式より $y=-h$ における波圧の2倍周波成分 (p') と基本周波成分 (p) の両者の振巾の比は

$$\frac{p'}{p} = \frac{2\pi^2 H}{g T^2} \cosh \frac{2\pi h}{L} = \frac{\pi H}{L_0} \cosh \frac{2\pi h}{L} \dots\dots\dots (10)$$

により表わされる。但し L_0 は沖波の波長である。

L (cm)	T (sec)	H (cm)	δ_0	重複波高 (cm)
(図—4) 348	1.94	8.4	0.017	16.4
(図—5) 266	1.55	14.3	0.0448	32.4

$\frac{h}{L}=s, \frac{H}{L}=\delta$ とおき、 p'/p の値は次表の如く得られる。(表-9)

本表により全体として波圧の2倍周波数成分の影響の傾向を知る事が出来る。 s が大きい時、この影響が大きいのはこの場合波圧の基本周波数成分は水深増加とともに減少してゆくが2倍周波数成分は変化しないが故である。上に述べた図-4, 5の結果は上表によりよく説明する事が出来る。

次に図-6, 7は今回の1/15勾配の斜面上、水深12cmの位置に設けられた直立壁面にて水深 $y=-7$ cmの点で測定せられた波圧に関するものである。その波の性質は

L (c.m) T (sec) 重複波高

330 3.07 23.8(静水面上最大18.7cm) 図-6

165 1.48 21.3(静水面上最大15.6cm) 図-7

水深12cmの点においては理論的にはこの様な重複波は勿論成立し得ず(理論上の重複波高最大は夫々14.2cm, 15cm)これ等の波は明らかに砕波への過渡状態にある。しかし図-6, 7いずれも直立壁前1cmの波形は対称的であり水深が極めて浅い進行波について見られる波形の前傾の傾向は殆んどない。勿論これは越波を許してないが故であり個々の来襲波の異つた実際の海面ではこの様な対称波形を得る事は容易でないであろう。図-6によれば実測及び計算の両波圧ともに極めて強力な2倍周波数成分の影響を受けている。実測値に較べ計算値にその影響が強くているのは図式計算途中の誤差によるものであろう。

しかしこの波の波圧型式は図-5の場合から砕波への過渡にあるものである。更に図-7に至つては波形は比較的対称ではあるが実測波圧には既に動圧部分が現われ、波圧の二つの頂部のうち前方のもの即ち水位上昇時に生ずる強圧部ではそのPeakはSaintflou公式による値を遙かに超えたものとなつてい。しかもこの波についての(9)式による計算値は実測値より小ではあるが傾向としては実測値同様の急激な圧力上昇が前頂部で見られる事を明らかにする。そして測定波圧と計算値とを比較する時このPeakの部分を除いて両者はほぼ相似た値を示し、2倍周波数成分はこの場合も極めて大きく波圧の全体的構成に関与している。そして前頂部のPeakの部分では実測最大値は17gr/cm²であるが、計算値は9.8gr/cm²でありその差7.2gr/cm²は(9)式によつては説明し得ない。これは明らかに動水圧であり、この場合の波は重複波から砕波への過程において愈々砕波の様相を強く示して来たものにほかならない。そしてこの場合に、水位変動 $\eta(t)$ は峯の前面において急勾配部を持つてい。即ちこの場合の波はその峯の前面においてある程度直立壁に崩れかゝる性質を持つてい。

この様にして図-4, 5, 6, 7により古典的な重複波とも云うべき性質のものから漸次砕波的なものへ波形及び波圧が遷移してゆく過程を示したわけであるが、次には波としては全く同性質のものをを用いる時直立壁が越波を許す場合と許さぬ場合とではどの様に波圧性質が異つていのかを示す事とする。波の周期は2.05秒, 1.43秒の2種即ちCase 2, 3の波をとり越波を許さぬ場合、直立壁堤高を静水面上3cmとして越波を許した場合との二つの場合につき壁前面1cmの点の波形と直立壁面において静水面下夫々2cm, 8cmの2点における波圧と変動を示したものが図-8, 9, 10, 11である。同一の沖波波高に対し直立壁前面での波高が越波を許す場合と許さぬ場合とでは非常に異なり、その静水面上の水位上昇量を比較すれば前者は後者の0.63~0.65倍となつてい。しかも越波を許さぬ場合の波形が比較的対称であるのに較べ、越波を許す場合には波形は極めて前傾し、直立壁のない場合の斜面上の砕波形状に類似してい。これ等の諸性質を綜合して、越波を許す場合は進行波的な性質が強いが越波を許さぬ場合は重複波的な性質が強く現われている事がわかる。測定された波圧について之を検討する時、この二つの特徴は愈々明らかとなり越波を許す時は波峯前面の急勾配部に対応する強い動圧が見られるがその後の波圧は緩やかに減少し波峯後面部に見られる第2の頂部は僅かにその勾配の変化に痕跡を止めるのみである。これに対し越波を許さぬ場合には明瞭な第2頂部が存在し、その値は静水面からの距離により変化して、これが重複波圧としての性格を持つ事を示してい。他方、波峯前面に見られる波圧のPeakの値はいずれの場合も静水面下の距離によつての変化は余り見られず、又越波を許した場合のその尾部の圧力値も水深方向に左程の変化はない。この様にして進行波の性質の強い砕波(それは又強い動水圧による波圧より特徴づけられるものであるが)と、重複波の性質の強い砕波(それは顕著な2倍周波数成分を含む重複波的な波圧と、動水圧によるPeakとの合成した波圧をもつてい)とが同一の波の性質、同水深の直立壁の場合においても生じ、その差異は越波許容の程度によつて生ずる事が知られる。

表-9 基本周波数成分に対する2倍周波数成分の振巾の比

s	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.05
0.01	0.36	0.19	0.10	0.05	0.021	0.010
0.03	1.1	0.58	0.30	0.15	0.064	0.030
0.06	2.2	1.17	0.61	0.30	0.13	(0.060)
0.09	3.3	1.75	0.91	0.45	(0.19)	—
0.12	4.4	2.34	1.21	(0.60)	—	—

図-8 碎波点附近の直立壁に作用する波圧及び表面波形 (越波を許さぬ場合)

1 静水面下 2cm の波圧

2 静水面下 8cm の波圧

周期 1.43 Sec

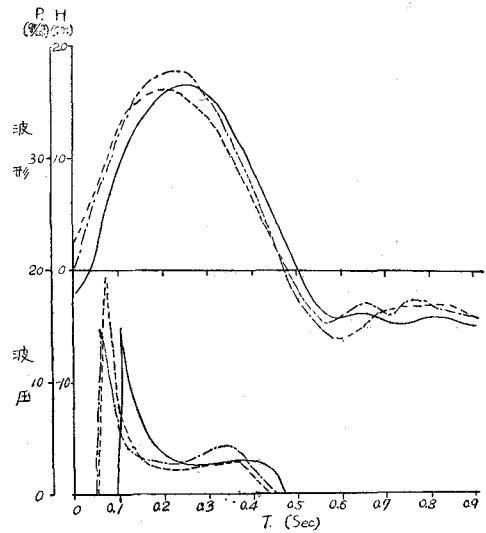
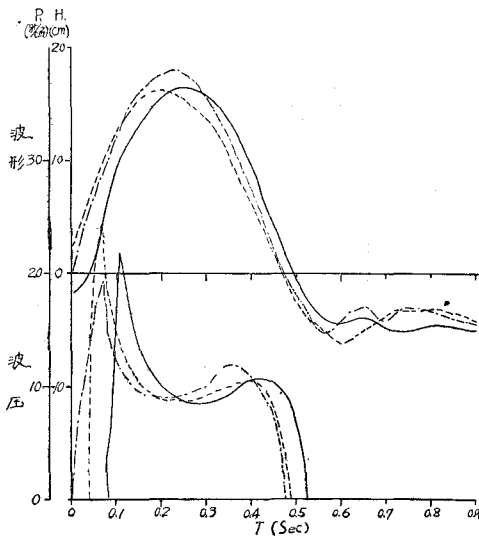
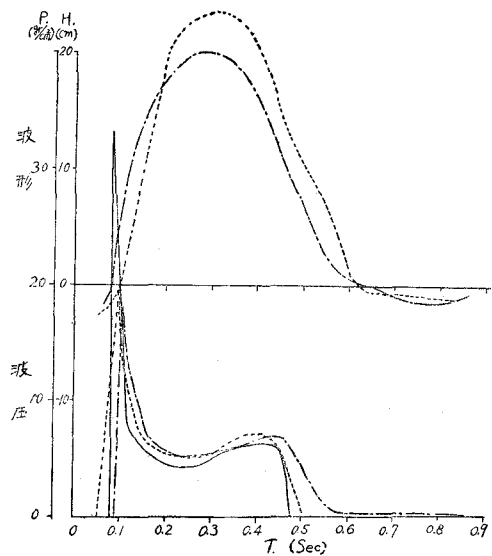
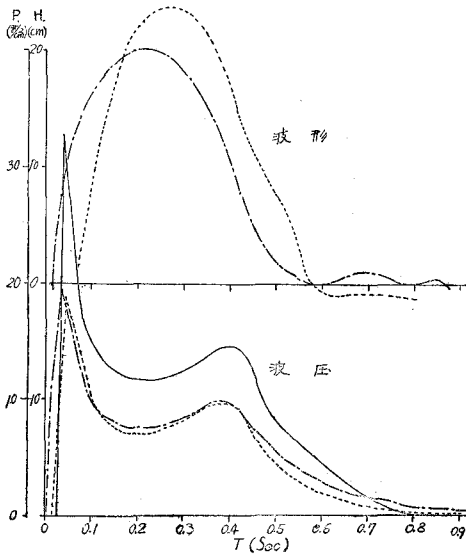


図-9 碎波点附近の直立壁に作用する波圧及び表面波形 (越波を許さぬ場合)

1 静水面下 2cm の波圧

2 軟水面下 8cm の波圧

周期 2.05 Sec



§ 4. 揚圧力の分布

北海道において平尾技師のなされた実験、及び現地観測によると一般に捨石上にある防波堤には堤外の最大圧力から略直線的に堤内水位迄変化している揚圧力が直立堤体に作用している。唯その基礎が極めて不透水性の場合、或いは堤体が数個に分離されその間に適当な間隙が存する場合には揚圧力は堤外部より堤内部に向い急激に減少している。

次に最近 Sweden の Royal Institute of Technology で行われた重複波を用いての模型実験においても堤体底面に作用する揚圧力の分布はかなり大きい事が示され、根固め捨石の存在する場合も揚圧力はそれ程減少していない。今回の実験では表-1に示された4種の波 (但し実験中周期を大きくとつた場合もある) を用い § 3 の直立壁と同様な配置で揚圧力の測定を行つた。この場合堤体の巾は 30cm として1/15勾配の斜面上に位置するわけであるが、その斜面と堤体底面との間隙は揚圧力の大きさ、分布に密接に関係するものと

図-10 碎波点附近の直立壁に作用する波圧及表面波形 (越波を許す場合)

1 静水面下 2cm の波圧

2 静水面下 8cm の波圧

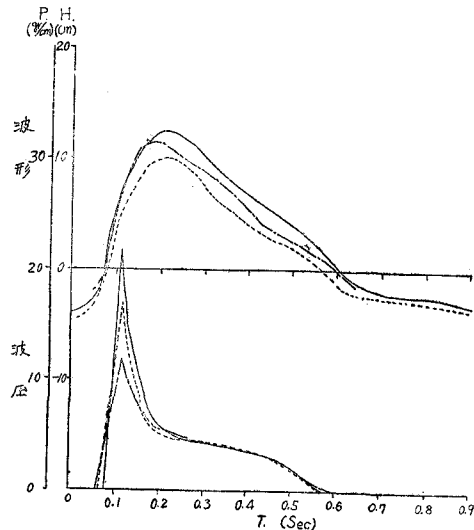
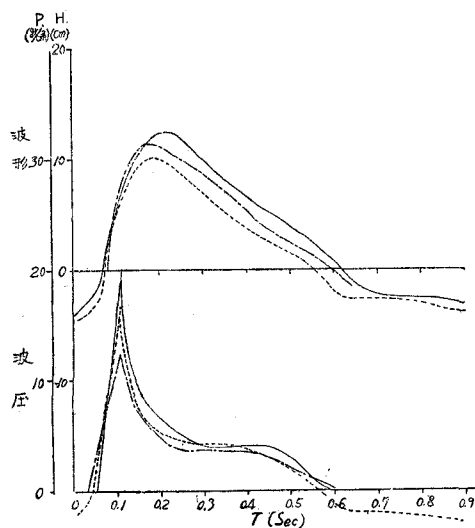
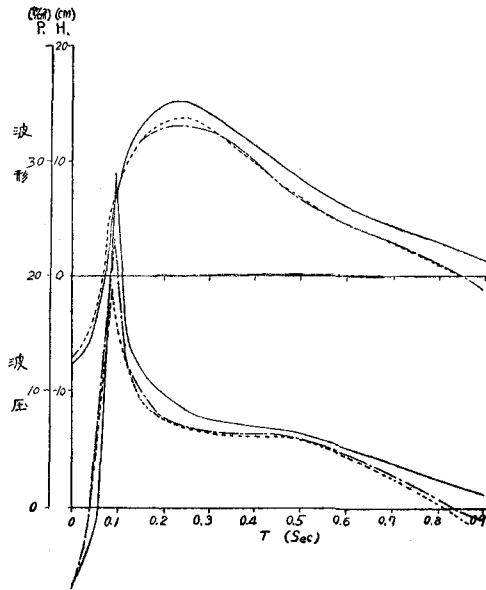
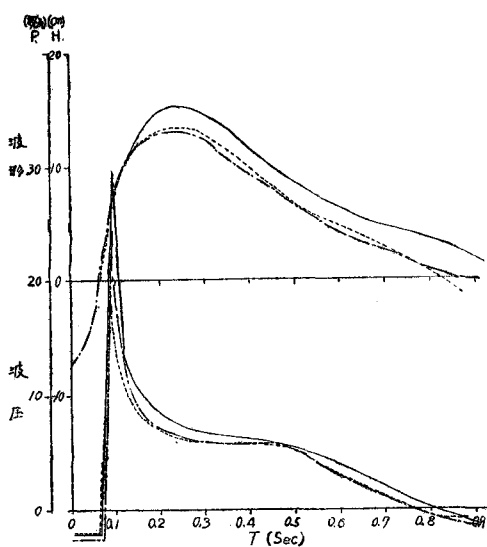


図-11 碎波点附近の直立壁に作用する波圧及び波形

1 静水面下 2cm の波圧

2 静水面下 8cm の波圧

図期A : 2.05 Sec



考えられる。従つてこの実験では (a) 接触している場合 (この場合の間隙は最大 1mm 以内と考えられる)。(b) 間隙部の高さ 1cm の場合。(c) 同 5cm の場合。(d) 同 5cm にて直径 1cm, 及び 1.5cm のガラス球をその間に填充した場合 (空隙率40%)。の4種の場合について揚圧力を測定した。又実験結果の取りまとめに際しては重複的傾向の強いもの及び半碎波的なものを用いている。従つて1/100秒程度の短周期の Peak を含む碎波的な波圧に関する揚圧力の検討は省略した。この様な短時間に見られる強い Peak は測定点による時間の遅れの影響を受けやすく波圧の時間的变化も堤外附近と堤内附近とは相当に異っているからである。

しかしこの場合半碎波的と称される波についても、その波力は相当に大きい事は図-2, 図-3に見られる通りであり、実際海面で通常の碎波公式を用いる場合に充分対応している。

実験結果は図-12, 図-13, 図-14に集約して示されている。図-12において底面の中は 30cm であり堤

外側の端から 5cm. 15cm. 25 cm の 3 点に測定点は設けられ、図中夫々の圧力は p_3, p_2, p_1 で表わされる。但し p_2, p_1 はいずれも p_3 が正の最大圧を示した時の同時圧力であり、特に底面が斜面と接触している場合を除き p_1, p_2, p_3 の最大圧はほぼ同時刻に生じている。図-12によつて p_2/p_3 の値を見ると (a) 波の周期は p_2/p_3 の値に大きく影響しない。(b) 間隙 1cm の場合の総平均は 0.56 同 5cm でガラス球をつめた場合は 0.54 殆んど一致している。(c) 底面接触の場合は 0.40 で小となっている。この (a). (b) の性質は一般に成立すると考えられ、重複波的な波圧の場合も半碎波的な波圧の場合も同様な p_2/p_3 となつている事からもこれは明かである。(c) の性質は底面間隙が非常に小さく、(特に受圧面の周囲において) 波圧受圧面の微量の変位に対する水量の充足に時間を要したためこの様な比較的小さな p_2/p_3 の値を得たのではないかと考えられる。若しこの考えが許容されれば測定装置の変位量を無視し得る程度の底面隙においては総平均値として常に $p_2/p_3=0.55$ 程度の値を得ることが予想される。

図-12 揚圧力減衰比

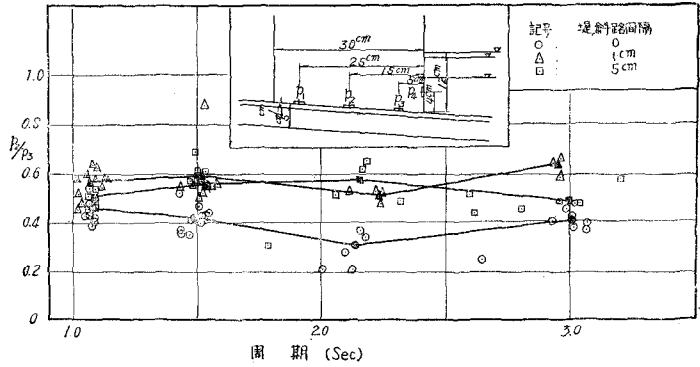


図-13 揚圧力減衰比

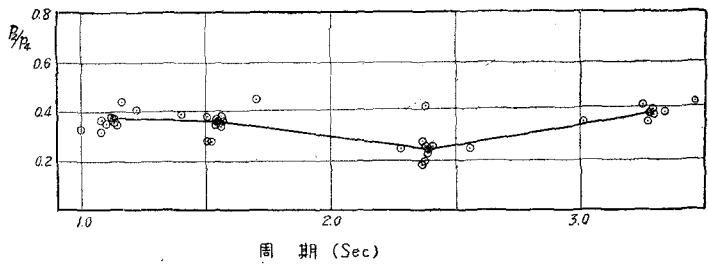
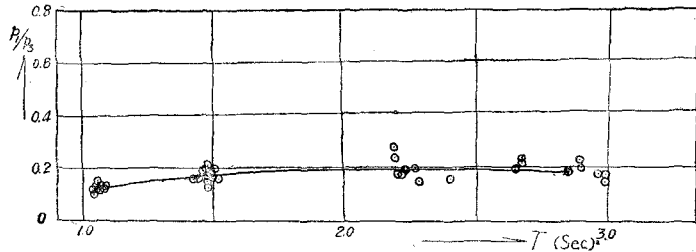


図-14 揚圧力減衰比 (同時圧)

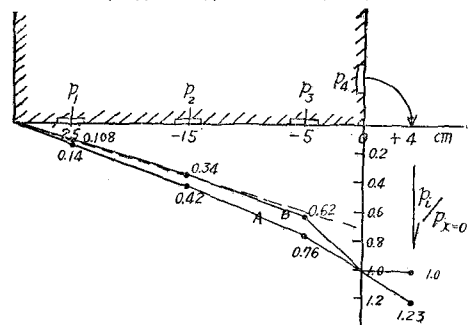


次に図-13は底面間隙 1cm の場合につき堤前面にて静水面より -7cm (即ち堤体下端より上 4cm) の圧力を p_4 としその最大圧に対して図-12における p_2 に相当するものと比を求めたものである。この場合も図-12とは同様の性質が認められ p_2/p_4 の総平均値は 0.34と得られる。

又図-14は底面間隙 5cm, ガラス玉詰めの場合に p_3 の最大圧の時の p_1 の同時圧を求め p_1/p_3 を求めたものであり、これも波の周期、砕け方により p_1/p_3 の値は殆んど影響されず、その総平均値は 0.175と求められる。

底面間隙 1cm 及び同 5cm ガラス玉詰めの場合には p_3, p_1 の最大圧の起時はほぼ一致しているから図-12, 13, 14を併せ用い、夫々の総平均に注目すれば、図-15の底揚圧力分布曲線を求める事が出来る。但し曲線 (A) は p_4 から p_3 に圧力が直線的に減少すると仮定した場合であり、曲線 (B) は直立壁底面迄は一樣な圧力がはたらき、底面においては直線的に圧力が減少すると仮定した場合である。現在の実験では真の分布曲線は (A), (B) の中間に入るものと考えて宜いであろう。これは殆んど直線状に分布する揚圧力を示し、在来の実験結果と傾向をともにしているがその圧力分布は在来のものより更に規則的である。既に述べた如く測定された直立壁面

図-15 揚圧力分布
(堤体壁下端に対する圧力比)



の波圧のうち各々の波についての最大圧の総平均値が広井公式に近い値を示している事からすれば図-15に表わされた揚圧力分布も実用上無視出来ないものと云わねばならぬ。

§ 5. 結 語

この実験による主要な結果を列挙すれば次の如くである。

- (i) 水底に位置するブロックに作用する水平方向の波力は二つの要素からなり、その第1は加速度項によるものであり、第2は速度項によるものである。その結果は(5)式により表わされる。
- (ii) 上述の加速度項はブロックの大きさが波高の寸法と同位数及びその1/10程度の位数の場合考慮しなければならないが、1/100の位数となれば一般に無視し得る。
- (iii) 砕波状態における直立壁への波力の総平均値は広井公式により与えられるものに近い値となり越波を許さぬ場合の総平均値が越波を許す場合の総平均値よりも大である。(図-2)
- (iv) 所謂砕波水深においても、重複波的な波圧は充分認められ、この場合の波圧は重複波特有の2倍周波数成分の影響を強く受けている。又越波を許す場合と許さぬ場合とにおいて、砕波の波形波圧分布曲線は異なるものとなる。
- (v) 直立壁底面が透水性の場合はこれに作用する揚圧力はこの実験における平均値としての図-15の実線により示される。但し堤体前面の下端の波圧を単位圧とする。

附. この実験において得られた直立堤に対する波力の実験結果から次の波圧の計算式が誘導せられる。

即ち水平波力としては沖波波高 (H_0) 10cm, 堤直前の水深 (h) 12cm. ($h/H_0=1.2$) において、若し垂直方向に一樣な波力が作用するものと仮定すれば

- (i) 天端高 静水面上 $0.3H_0$ にて

$$\text{水平波力 } p=1.2wH_0$$

- (ii) 天端高 静水面上 H_0 以上にて

$$\text{水平波力 } p=1.5wH_0$$

【注意：但しこの波力は静水面上 H_0 迄作用するものとして実験値を整理した。表に比較して係数 1.5 は小となつてゐるが、之は静水面上にかかる波力のうち衝撃的なものを除いて整理したが故である。

が得られ、従つて今静水面よりの天端高を h_1 とし $h_1/H_0=x$ とおけば波圧強度は天端高に依り直線的に変化するものとして、

$$p=(1.10+0.4x)wH_0 \quad \text{但し } H_0 \geq h_1 \geq 0$$

を得、これが直立壁面に作用する波圧強度を示す事となる。又底面よりの揚圧力は直立堤の前端において $0.7p$ 後端において 0 でありその間を直線的に変化する。

この計算法による結果 (A) と広井公式によるもの (B) とを比較すれば、水深 5m に位置する直立堤に沖波波高 4m の進行波が作用する場合につき、その滑動に対する安全率を比較して (安全率 1.2, 滑動係数 0.6, 堤体比重 2.3, 海水比重 1.03) 次の値を得る。

天 端 高	0m	1m	2m	3m	4m
堤巾 (A)	9.6m	9.3	9.3	9.6	9.8
堤巾 (B)	9.5	8.9	8.5	8.2	8.0

即ち天端高が高い時広井公式によるより大きい堤巾を必要とする。

又重複波による波圧計算の場合においても、一般に底面よりの揚圧力を考慮しなければならぬ事は云う迄もない。

記 号 表

H : 波高 (cm)	H_0 : 沖波波高 (cm)	H_b : 砕波点の波高 (cm)
a : 波の半振巾 (cm)	L : 波長 (cm)	L_0 : 沖波の波長 (cm)
L_b : 砕波点の波長 (cm)	T : 波の周期 (sec)	h : 水深 (cm)
h_b : 砕波水深 (cm)	C : 波速 (cm/sec)	u : 波動の粒子速度 (cm/sec)
δ : ($=H/L$) Steepnes	δ_0 : ($=H_0/L_0$) Initial Steepness	s ($=h/L$) : Shallowness
ρ : 水の密度	g : 重力加速度 cm/sec ²	x : 横座標
y : 縦座標 (静水面より上が正)	η : 水位上昇量 (cm)	C_R : 抵抗係数
α : 質量係数		

参 考 文 献

- 1) M.P. O'Brien and J.R. Morison : The Force Exerted by Waves on Objects. Trans. Am. Geophy. Union. 1952.

- 2) T.E. Stelson and F.T. Mavis: Virtual Mass and Acceleration in Fluids. Proc. A.S.C.E., Vol. 81, No. 670, 1955.
 - 3) R.Y. Hudson: Wave Forces on Breakwaters. Proc. A.S.C.E., Vol. 78, No. 113, 1952.
 - 4) R.R. Minikin: Wind, Waves and Maritime Structures. 1950.
 - 5) C.W. Ross: Shock Pressures of Breaking Waves. Coastal Engineering, Vol. IV, 1954.
 - 6) 光易恒, 長谷直樹: 波の圧力に関する実験的研究. 運輸技術研究所報告, 1954, 5巻1号.
 - 7) 浜田徳一: 波の理論について. 港湾講演集 1953.
 - 8) 松尾春雄, 新妻幸雄: 波と防波堤. 1943.
 - 9) B. Hellstöm and L. Rundgren: Model Test on Ölands Södra Grund Lighthouse. Bullet. Rog. Inst. Technology. Sweden. No. 39. 1954.
 - 10) E. Balint: Wave Action on Hydraulic Structures. Rogal Melbourne Technical College. 1955.
 - 11) H.A. Kierstead: Bottom Pressure Fluctuation due to Standing Waves in a Deep, Two-layer Ocean. Trans. Am. Geophy. Union. 1952.
-