

直立壁に働く全波力について

運輸技術研究所 光 易 恒

1. 緒 言

最近、砕波の波力に関する研究が比較的多く行われ、その性質が次第に明らかになってきているが、これまでの研究の多くは、波を種々の方法で壁体に衝突させ、壁体の局部に作用する圧力の測定を行ったものが多い。ところが砕波が壁体に衝突して衝撃的な圧力を生ずる際には、局部的な圧力の強さは場所によって非常に異なるし、圧力の最大になる時刻も必ずしも同一ではない。従って堤体の移動に対して有効に作用する波力を圧力の測定のみから推定することには問題がある*。そこで今回は、これまでの砕波の圧力に関する研究^{1),2)}に引き続いて、壁体のかかなり広い範囲に作用する水平波力の測定を水路内で起した周期性の波を使用していつてその性質を調べた。測定量として広い範囲に作用する水平波力を選んだもう一つの理由は、波力の最大値 peak value を支配する要素を系統的に調べるために便利であったからでもある。すなわち、これまでの研究によると、非常に強大な波圧の発生は砕波の形式と密接に関係していることを示しており^{1),2)}、一方では様な水底勾配上の砕波の性質もかなりくわしく調べられている³⁾。そこで今回の実験では、今までよく行われたように trial に衝撃的な圧力が生ずる条件を求め、その条件で波力の性質を調べるという方法ではなく、系統的に波の性質およびその他の条件（例えば壁体の位置および水底勾配）を変化して波力の測定を行った。なお壁体に作用する水平波力と同時に、壁体前面の水底に作用する局部的な圧力の測定も行った。実験は現在、勾配 1/15 の場合について一部分終わったのみであり、しかも多くの今後追求すべき問題が新たに生じてきているので、まだ一般的な結論をのべる段階ではないが、水路で起したようなほぼ 2 次元的な進行波による波力の性質がかなり明らかになったので主として実験結果について述べる。

2. 実験装置および方法

(1) 造波水路

実験に使用した水路はこれまで波圧の実験に使用したものと同一で、長さ 22 m 巾 0.6 m 水深 0.35 m を有するものである。水路内の造波板と反対側の終端には一様な勾配の斜面を設けて砕波領域を生ぜしめた。今回報告する結果は勾配 1/15 の場合に得られたものであるが、今後の実験ではこの勾配は系統的に変化してゆく予定である。

(2) 実験に使用した波

規則的な一連の波の砕波形式をきめる要素のうちで支配的なものは海底勾配と沖波の波形勾配であるから、今回の実験では表-1 に示すような沖波波高がほぼ等しく（約 10 cm）で波形勾配が異なった 4 種類の波を使用して各波力の測定を行った。

実験の条件を単純化してできるだけ不規則な要素を除くという点より考えれば、孤立波のような波を使用すればより規則的な結果が得られることが予想される。しかしながら、われわれが終局に求めたいものは、一連の進行波（実際には不規則波）

の砕波による波力であり、しかも、孤立波と周期性の波とは砕波形式および生ずる波力にかなり差があることが報告されている^{5),6)}。

このような理由でこの実験では周期性の波を使用した。ただし、できるだけ規則的な条件で測定を行うために、造波板はたえず同じ位相より動かしはじめ、波高が一樣になってから測定をはじめ、第一波の反射波が造波板で再び反射されて返ってくるまに測定をやめた。このような測定を数回くり返して数多くの測定値を得て整理した。

(3) 波 力 計

表-1 実験に使用した波の諸性質

No.	T_{sec}	$L_{h=35}$ cm	$H_{h=35}$ cm	L_c cm	H_0 cm	δ_0
1	2.57	458	10.5	1 030	9.8	0.0095
2	1.90	329	10.4	563	10.5	0.019
3	1.42	232	9.5	315	10.1	0.032
4	1.02	147	10.1	162	10.9	0.067

* この問題について永井博士も最近別の立場から研究⁷⁾を行われ興味ある結果を得ておられる。

壁体の広い範囲に同時に作用する波力を測定するために使用した波力計は受圧面 巾 22 cm, 高さ 30 cm である。この受圧板は 4 隅が鋼製リングで支持されており, 各リングには電気抵抗線ヒズミ計がはりつけてある。4 隅のリングの弾力およびヒズミ計の感度を同一になるように調節し, 受圧板のいずれの点に力が作用しても感度が変わらないようにした。波力計の諸特性は一括して表-2 に示した。計器の固有振動数 $1/T_1$ があまり大きくないので, 次のような方法で測定の精度を検討した。衝撃的に作用する波力は立上りの部分に注目すれば一種のパルス性の力と考えられるので, これを正弦波型のパルスと仮定して, この入力に対する波力計の過渡応答を調べた。計器の固有周期と波力の衝撃的な部分のみかけ上の周期の比 $u=T_2/T_1$ を変化して減衰係数 $h=\epsilon/n=0.04$ の場合についてレスポンスを計算した。その結果は表-3 に示したとおりであり, 波形の一例は図-1 のごときものである。磁歪(わい) 圧力計およびチタンサンバリウムを使用した圧力計で測定された局部に作用する圧力波形をみると, きわめてまれに生ずる非常に強大な shock pressure を除き 大部分は作用時間 $\tau=0.01$ sec すなわち, 周期 $T_2=1/50$ sec 程度である。広い範囲に作用する波力の作用時間はこれより永くなくとは考えられないのでこの値を衝撃的波力の作用時間の下限とすれば, $u=T_2/T_1=4$ となる。従って予想される誤差はせいぜい 20% 程度と考えられる。

(4) 圧 力 計

水底に作用する圧力の測定は磁歪型圧力計(受圧面直径約 10 mm 空中の固有振動数, 約 700 c/sec 磁化電流の周波数 5 kc)を使用した。このほか, 衝撃的圧力の細部の性質を調べるためにチタンサンバリウムを利用した圧力計(受圧面直径 12 mm, 空中固有振動数約 10 000 c/sec)を陰極線オシログラフおよび撮影装置と組合わせて使用した。

(5) 記 録 器

波力および水底圧力の記録は横河製電磁オシログラフ(H 型振動子つき)を使用した。この振動子の固有振動波は 1 000 c/sec 以上であるから, 測定系の応答特性はほとんど計器自体のそれに支配される。

3. 実験結果とその考察

(1) 波力の強さを支配する要素

これまでの波圧の研究結果によると, 強大な衝撃的な波力が作用するのは波が砕けるときに非常に前傾し, しかも変形が極度に進まないで前面が垂直に切立ったような瞬間に衝突したときに生ずるようである^{1), 2)}。従ってこのような状況が出現しやすい波および外的条件が組合わされたときに強力な波力が生ずる。H.W. Iversen³⁾ や速水博士⁴⁾らの実験に示されるごとく波の変形の様式を支配する要素は沖波の波形勾配 δ_0 および水底勾配 $\tan \theta$ である。このほか, 二次的に影響する要素としては水底の roughness や水中の乱れ等が考えられるが, 実験室で起したような規則的な波に対しては, これらはあまり影響しないであろう。これらのことを考慮し波の変形の程度を表わす量として沖波波高と水深との比 d/H_0 を用いると, 規則的な波による波力の強さ F は次のような形で無次元表示を行いうるであろう。

$$\frac{F}{\rho g H_0 W Y} = f(\theta, \delta_0, d/H_0) \dots\dots\dots (1)$$

ここに F は巾 W に作用する波力の強さを, Y は波力が同時に作用する高さをおのおの示す。今回のデータの整理にあたってはこの Y として水深 d をとることとした。従って左辺は壁体の単位巾に作用する波力が水底より静水面の間に集中して働くことと仮定したときの平均圧力が沖波波高に相当する水圧で割ったものである。もしも波力の作用する範囲として $Y=d+1.25 H_0$ をとるならば, 砕波点付近では $d_0=1.25 H_0$ と考えても大差が

表-2 波力計の性能

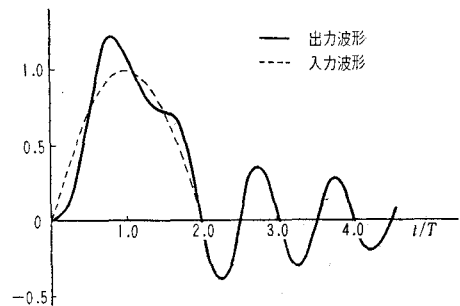
	固有振動数	減衰係数	偏心荷重による感度変化	せん断力に対する感度
空中	330	0.02	5%以下	圧力に対する感度の6%以下
水中	200	0.04		

表-3 波力計の過渡特性

$u(=T_2/T_1)$	1	2	4	10
x/x_s	1.48	1.64	1.22	1.00
τ_0/τ_i	1.49	1.01	1.00	1.01
$\int_0^\tau x dt/S$	1.70	1.26	1.04	1.04

T_1 : 波力計の固有周期 T_2 : 入力(正弦波)の周期
 x_s : 静的な力に対する変位 S : 入力波形(半正弦波)の面積
 τ : 力の作用時間(i は入力, 0 は出力をそれぞれ示す)

図-1 波力計の応答波形の一例



ので $Y=2d_0$ となり上の表現において左辺は $1/2$ となる。

図-2 は(1)式の形で整理された実験結果を示したものである。この図は水底勾配 $1/15$ の場合に 4 種類の波についていろいろな水深で測定された波力の各平均値を使用し、 δ_0 をパラメーターとして $\bar{F}/\rho g H_0 W d$ と d/H_0 との関係を示したものである。図にみられるごとく砕波形式を支配する δ_0 が波力の強さ $\bar{F}$ におよぼす影響が明瞭にあらわれている。 $\delta_0 \leq 0.019$ では非常に強大な衝撃的波力の作用する領域が存在するが $0.032 \leq \delta_0$ では波力は比較的小さく δ_0 の増大とともに波力は急激に減少している。次に d/H_0 の影響をみると 図-2 よりわかるごとく、いずれの波についても壁体がないときの進行波の砕波点よりほんのわずかに浅い所に壁体がおかれたとき最大の波力が作用する。この最大の波力は前述のごとく δ_0 が小さいほど大であり、しかもこの衝撃的な強い波力の作用する水深の範囲は δ_0 の小さい波では比較的広く δ_0 の増大とともに狭まっている。また $1.5 \leq d/H_0$ ではいずれの波でもほとんど重複的な波力が作用し、個々の測定値の散乱の程度もきわめて少ない。一方、砕波点より浅い方に向って d/H_0 が減少するに従って波力は減少してゆくことが図よりわかる。図-4 (a)~図-4 (b) は δ_0 を異にする波の種類別に個々の測定値を 図-2 と同様に整理したものであるが、これよりわかるごとく d/H_0 の減少に従って波力の平均値は非常に減少するのひきかえ、個々の測定値の散乱はいちじるしくなり、計算してみると各波力の平均値に対する標準偏差の比は衝撃的な波力の作用するときよりむしろ増大している。しかもこの散乱の程度は砕波点付近であり強力な波力を生じなかった波形勾配 δ_0 の大きい波の方がより顕著である。これらのことは砕波後の波がきわめて複雑で多種多様な衝突形式をとること、波形勾配の小さな波は瞬間的な巻波型の砕波によって波としてのエネルギーを急激に失わない乱れた流れに移行するが、波形勾配の大きな波では砕波が漸進的に行われて、広い範囲にわたり少しずつエネルギーを失ってゆくので、浅いところでも規模は小さいが壁体の前で砕波して作用する場合がありますこと等に対応しているものと考えられる。以上の結果は $1/15$ の水底勾配上の砕波による結果であ

図-3 最大波力と沖波の波形勾配との関係

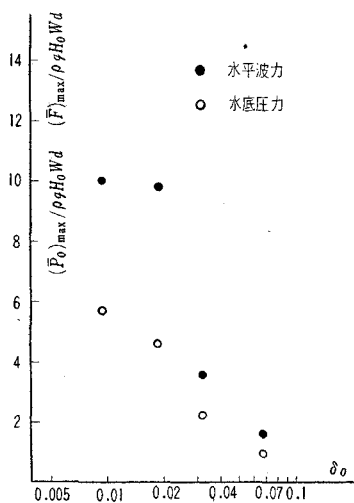


図-2 直立壁に作用する波力 (平均値を使用)

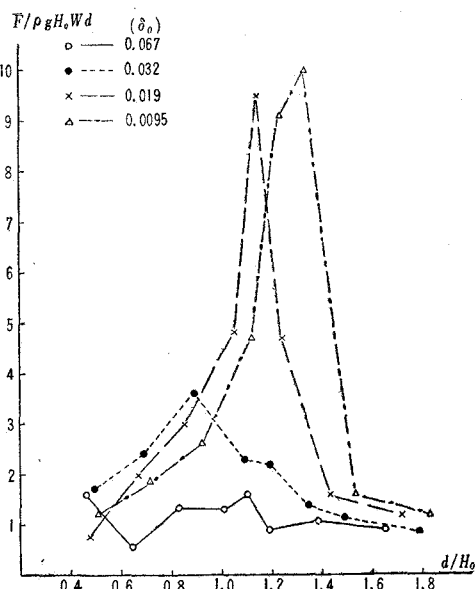


図-4 (a) 直立壁に作用する波力
(壁体の設置水深による変化)

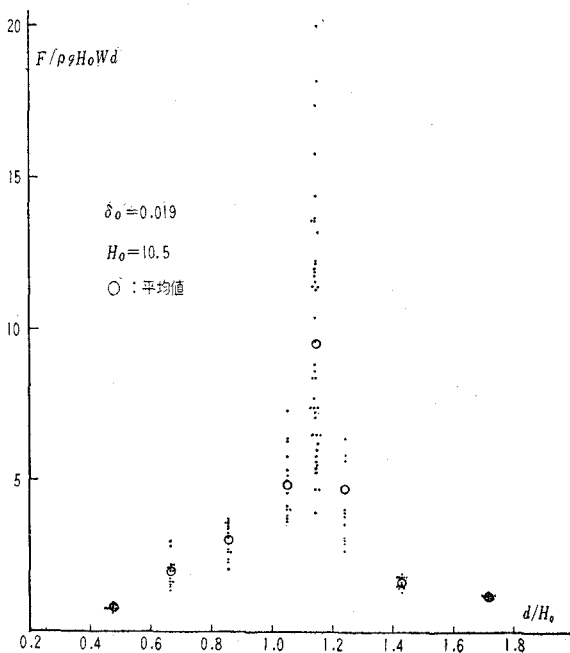
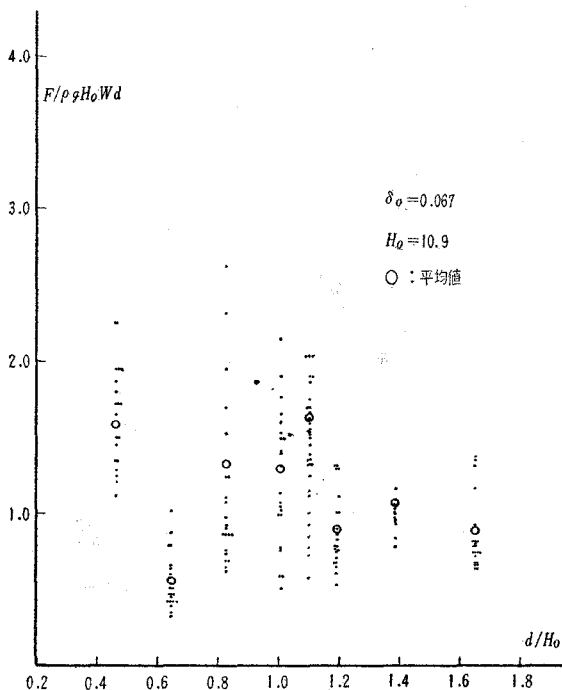


図-4 (b) 直立壁に作用する波力
(壁体の設置水深による変化)



るから水底勾配が変化すると、いくぶん状況が異なるかもしれないが全般的な性質は類似したものであるう。

(2) 衝撃的に作用する波力の性質

前述したごとく、水路で起した規則的な波、特に波形勾配の小さな波が斜面上(勾配 1/15)で砕けて直立壁に衝突したときには、局部に生ずる圧力のみならず、かなり広い範囲に平均して作用する波力も、衝撃的に作用し予想外に大きな値をとることがわかった。そこで No. 2 の波 ($\delta_0 = 0.019$, $H_0 = 10.5$ cm, $T = 1.90$ sec) を使用して $h = 12$ cm の点で数多くの衝撃的波力の測定をできるだけ同一条件で行って、その性質をくわしく調べた。

(a) 衝撃的波力の強さの散乱の程度 図-5 は横軸に起しはじめの波から数えた波の番号をとり、縦軸にその波によって生じた単位巾に作用する波力の強さをとって、個々の測定値を記入したものである。これより、規則的に起こされた特定の番号の波でも毎回少しずつ異なった強さの波力を生ずること、その散乱の程度は局部に作用する圧力にくらべればかなり少ないこと、波の番号によって一定した傾向の変化がみられること、同一番号の波による波力は毎回少しずつ異なっているにもかかわらず、あいつぐ一連の波によって生じた波力の平均値は毎回ほぼ等しい値をとること等がわかる。実際にはこのように波の番号によって生じた波力の強さには、わ

図-5 直立壁に作用する衝撃的波力
(測定値の散乱状況、同一記号のものは同じ回の一連の波による測定値を示す)

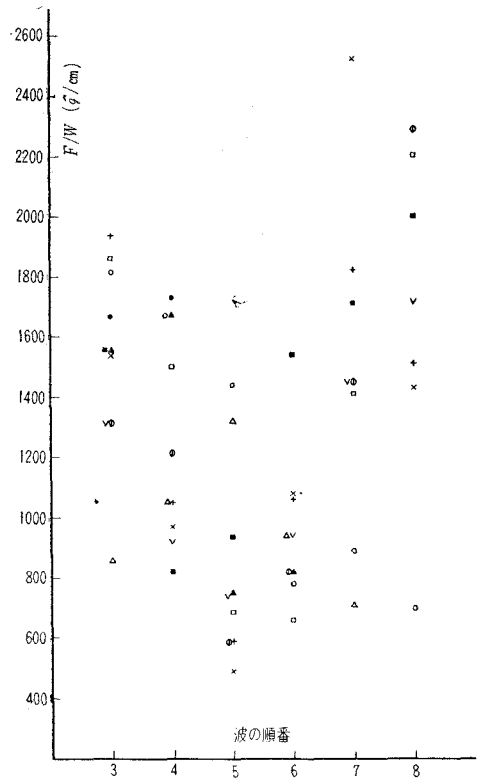
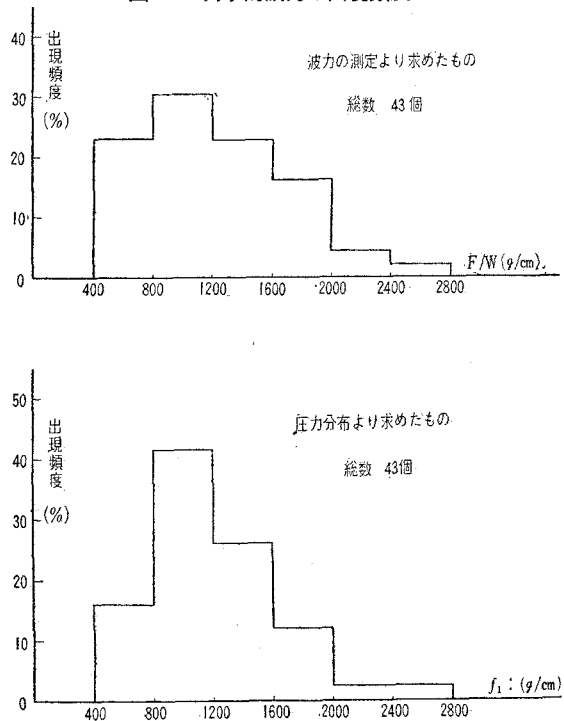


図-6 衝撃的波力の出現頻度



ずかに一定した傾向がみられるが、これまでのデータと比較するために個々の波力が同一条件の砕波によって生じたものとして、その出現頻度を調べたものが 図-6 である。

(b) 圧力分布より求めた波力との比較 前回の研究²⁾において、今回の No. 2 の波と同一の波を使用して、壁体の中央部で 4 点（水底、水底上 4 cm、10 cm および 14.5 cm）で圧力（受圧部直径 10 mm）の同時測定を行い、それをもとにして次式により近似的に水平波力を算出した（ただし $z_0 = -12$, $z_1 = -8$, $z_2 = -2$, $z_3 = 2.5$, $z_4 = 7$, $P(z_4) = 0$ ）。

$$f_1 \doteq \frac{1}{2} \sum_{i=0}^4 \{P(y_1, z_{i+1}) + P(y_1, z_i)\} (z_{i+1} - z_i) \dots \dots \dots (2)$$

このようにして求めた単位巾に作用する水平波力の平均値は、 $\bar{f}_1 = 1210 \text{ g/cm}$ で今回巾 22 cm の面に作用する波力を測定して巾で割って求めた値、すなわち、 $f = \frac{1}{W} \int_0^W \int_{-d}^{\eta} P(y, z) dy dz$ に相当する波力の平均値 1220 g/cm ときわめてよく一致している。また、前回圧力分布より求めた水平波力のデータを使用して、その強さの出現頻度を調べてみると 図-6 の下段に示すごとく今回の測定より得られたものにかかなり類似している。もしも前回求めた水平波力が特定断面の単位巾に作用する水平波力 $\int_{-d}^{\eta} P(y, z) dy$ を正確に代表しているものとするれば、上述のような結果は非常に興味あるものである。しかしながら、この結果に関してはいろいろと問題が残っているので、今後の研究をまわって論ずることにする。

(c) 水平波力による力積 衝撃的圧力の測定を行うと条件が一定していてもその最大値は非常に異なった値をとるが、圧力の時間積分、すなわち力積は比較的一定した値をとり、ある一定値に近ずいてゆくことが報告されている^{3), 7), 9)}。今回得た広い範囲に平均して作用する波力の力積を、圧力の測定より求めた力積と比較するために波力の測定記録をもとにして波の進行方向に作用する力積 I 、および、衝撃的に作用する部分にふくまれる力積 I_P を求めた。 I_P は全力積 I より重複波的に作用する波力による力積を除いたものである。このようにして得られた結果は No. 2 の波以外の 3 種類の波による値（それぞれ $\bar{F}/\rho g H_0 W d$ が最大値をとった水深における値）および No. 2 の波の $d = 12 \text{ cm}$ 以外の水深における値とともに一括して表-4 に示した。力積の計算値 I_{cal} は壁体の設置水深において沖波波高に相当する半振巾の重複波が生じたものと仮定し、その水圧による波の進行方向に作用する力積を微小振巾波理論を適用して計算した次式により求めたものである。

$$I_{cal} = W \int_0^{T/2} \int_{-d}^0 P(z, t) dz dt = W \rho g H_0 \int_0^{T/2} \int_{-d}^0 \frac{\cosh m(d+z)}{\cosh md} \sin \frac{2\pi}{T} t dz dt = \rho H_0 C W L / \pi$$

この結果をみると、実測された力積 I がかなり大胆な仮定のもとに算出された値に比較的よく一致していること、

衝撃的に作用する部分にふくまれる力積 I_P が全力積 I の 10~20% 程度である事がわかる。また表には示されていないが No. 2 の波の $h = 12 \text{ cm}$ における水底圧の力積は $5.5 \text{ g/cm}^2 \times \text{sec}$ 、その衝撃部のみの力積は $0.55 \text{ g/cm}^2 \times \text{sec}$ と得られた。後者の値を以前に静水面付近の圧力の測定より求めた値²⁾、0.77 および 0.88 に比較するとわずかに小さい値で、必ずしも無視し得ないことがわかる。

(d) 壁体前面の水底に作用する波圧 図

図-7 波力および水底圧力の記録

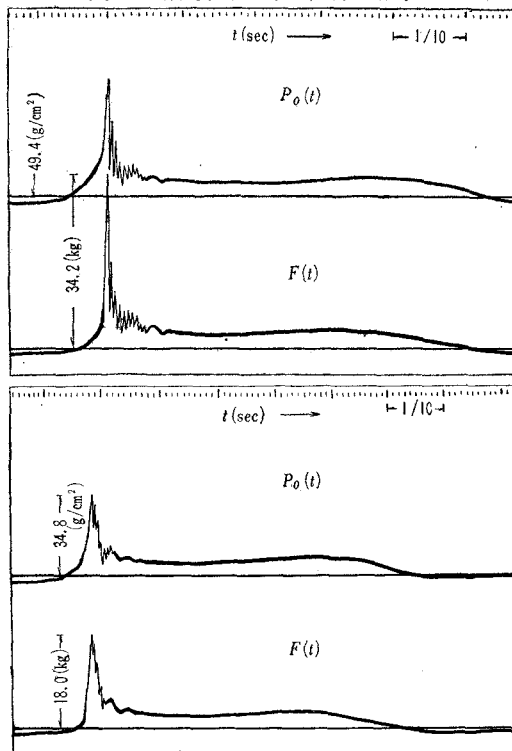


表-4 水平波力による力積（巾 22 cm に作用する）

$\bar{I}$: 全波力の力積（波の進行方向に作用するもの）

$\bar{I}_P$: 衝撃部の力積

$\bar{I}_{cal}$: 力積の計算値

波の種類	壁体の設置水深 $d(\text{cm})$	$\bar{I}$ $\text{g} \cdot \text{sec}$	$\bar{I}_P$ $\text{g} \cdot \text{sec}$	$\bar{I}_P / \bar{I}$	$\bar{I}_{cal}$ $\text{g} \cdot \text{sec}$	$\bar{I} / \bar{I}_{cal}$
No. 1	12	2380	207	0.087	2060	1.16
No. 2	11	1670	234	0.140	1530	1.09
No. 2	12	1920	294	0.153	1600	1.20
No. 2	13	1790	220	0.123	1660	1.08
No. 2	15	1990	72	0.036	1980	1.00
No. 3	9	996	107	0.107	851	1.17
No. 4	11	667	118	0.177	738	0.90

—8 は壁体前面の水底に作用する波力の測定と同時に測定された壁体前面の水底に作用する波圧の値を波力のデータと同様な形で整理したものである。この 図—8 をまえに波力について得た 図—2 と比較してみるときわめてよくており、強い波力が作用するときには水底に作用する圧力も静水圧にくらべてかなり強いことがわかる。そこで F/Wd と P_0 との比を調べてみた。図—9 上段はわれわれの行ったすべての測定の case について測定値の各 case ごとの平均値を用いて整理したもの、および下段は強大な衝撃的波力が作用した $\delta_0=0.019$ の波の $h=12\text{ cm}$ における個々の測定値を整理したものである。この結果、重複的な波力が作用するときには当然として、衝撃的な波力が作用するときにもこの比が比較的一定した値をとることがわかる。すなわち壁体前面の水底に作用する波圧は壁体の広い範囲に平均して作用する波力と、きわめて密接に関係していることになる。

4. 結 語

以上得られた結果を要約すると次のごときものである。

(1) 局部に衝撃的な圧力を生ずるような規則的な波では、広範囲に平均して作用する波力も予想外に大きく、しかも衝撃的に作用する。

(2) 水平波力におよぼす沖波波形勾配および壁体の設置水深の影響が勾配 1/15 の斜面上の波について明らかになった。

(3) 壁体の広い範囲に平均して作用する波力の単位巾あたりの力はある縦断面の圧力分布より求めた水平波力とほぼ似た強さおよび出現頻度を示す傾向がみられた。

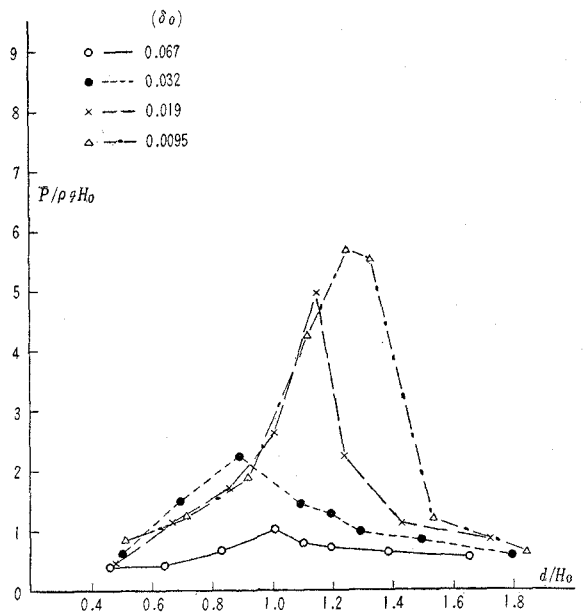
(4) 波の進行方向に作用する波力の力積は碎波点付近でもほぼ重複波として計算(微小振巾波理論)した値に近く、わずかに大きい程度である。衝撃的に作用する部分にふくまれる力積は全力積の 10~20% である。

(5) 壁体前面の水底に作用する波圧も静水圧に比較するとはるかに大きく、その水圧と壁の広い範囲に平均して作用する波力との間には密接な相関がみられた。

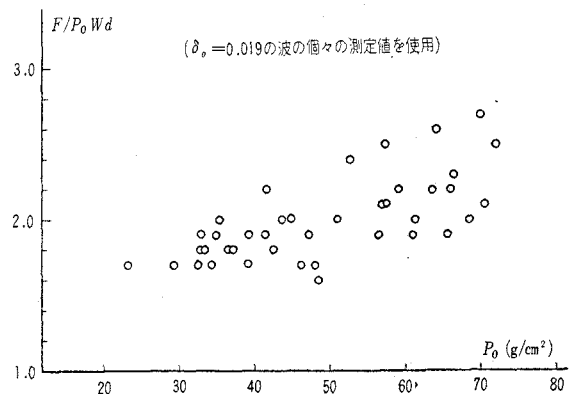
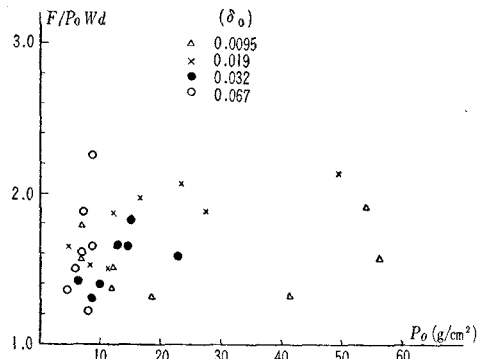
以上の結果は水路で起されたほぼ二次元波とみなせる規則的な波によって得られたものである

が、このような規則的な波の碎波による波力ですら、その性質はかなり複雑であることがわかる。実際の海の波ではこのうえにさらに波の不規則性、三次元的な性質および乱れの影響等が加わってくる。したがって力学的に波力の問題を追求するためには、さらにいろいろな角度から研究が行われる一方、現在非常に少ない現地における観測記録が波、波力、堤体の運動等に関して得られることが必要であろう。

図—8 壁体前面の水底に作用する波圧の変化



図—9 単位面積に作用する平均水平波力と水底圧力との関係(平均値を使用)



終りに、本実験を行うにあたり終始指導を賜った研究室長の浜田徳一博士に対し心より感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 浜田徳一・光易 恒・長谷直樹：“構造物に作用する波力”，第5回海岸工学講演会講演集，1956.
 - 2) 光易 恒・長谷直樹・柴山壽彦：“壁体に作用する砕波の圧力に関する実験的研究”，運輸技研報告8巻，2号 1958.
 - 3) 永井荘七郎：“防波堤に働く砕波の圧力式について”，土木学会年次講演会 1959.
 - 4) Iversen, H.W.: “Laboratory Study of Breakers”, Gravity Waves, 1952.
 - 5) Douglas Frank Denny: “Further Experiment on Wave Pressures”, Journ. Inst. Civil Engr. No. 4, 1951.
 - 6) 永井荘七郎：“防波堤に働く砕波の圧力に関する研究”，第5回海岸工学講演会講演集 1958.
 - 7) Bagnold, R.A.: “Interim Report on the Wave Pressure Research”, Journ. Civil Engr. Vol. 12, 1938-1939.
 - 8) 速水頌一郎：“砕波の機構” 海岸工学研究発表会論文集 1954.
 - 9) 林 泰造・服部昌太郎・林 憲吉：“砕波の波圧と力積”，第5回海岸工学講演会講演集 1958.
-