

海岸護岸に働く全波力に関する実験的研究

本 間 仁*・堀 川 清 司**・長 谷 直 樹***

1. 概 説

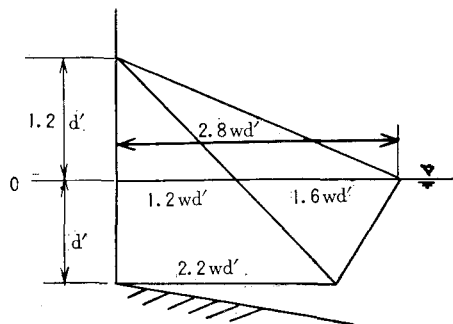
われわれは海岸護岸あるいは海岸堤防の設計にあたって、波力の問題をどのように取り扱っていくべきかについて、砕波したあとの波の性質と関連させて研究を行っている。前回の報告^{1),2),3)}においては、鉛直壁ならびに傾斜壁に対する波圧実験結果から一応合理的と思われる実験式を提案した。その後さらに実験資料の積重ねを行ない、また新たに全波力測定装置による実験資料を得たので、先に提出した実験式を検討する意味もかねて詳細をここに報告する。さらに近時海岸構造物の前面に各種消波ブロックを設置して、波のはい上り高さおよび越波量を軽減するように努めているが、このような前面のマウンドによって波圧強度をどの程度小さくしうるかをいくつかの断面について検討した。

2. 波圧分布に関する実験公式

砕波後の波による波圧の分布式としては、もともと Beach Erosion Board⁴⁾ によって提案されたものがあつたが、筆者らは実験結果と比較したところ必ずしも妥当であるとは認められなかった¹⁾。そこで前回においては、比較的緩い勾配の海岸での砕波後の波の変化状況は、波速、波高ともに水深の関数としてよく表わされ、かつ孤立波理論による取り扱いが第一近似として妥当であることに注目して、新たに実験公式を提案した^{2),3)}。

ここでは直立壁の場合のみについて考えると(図-1)。

図-1 直立壁に対する波圧分布



① 波圧は静水面上 $z=1.2d'$ の位置から堤脚 $z=-d'$ まで作用する。

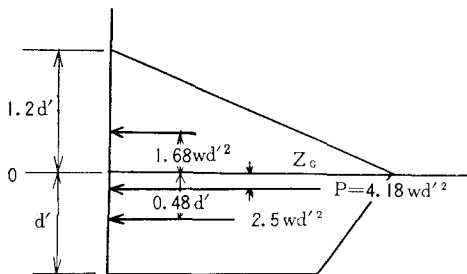
② 静水圧 p_s は $z=1.2d'$ から $z=-d'$ まで三角形分布を呈する。すなわち $z=-d'$ では $p_s=2.2wd'$ で与えられる。ここに d' は堤脚水深、 w は水の単位体積重量である。

③ 動圧 p_d は $z=1.2d'$ および $z=-d'$ で零、静水面 $z=0$ で $p_d=1.6wd'$ で与えられる三角形分布を呈する。

よって図-1から単位幅あたりの直立壁に作用する全波力 P はつぎのようにして求められる。

$$P = \frac{1}{2} \times (1.2d') \times (2.8wd') + \frac{d'}{2} (2.8wd' + 2.2wd') = 4.18wd'^2 \dots (1)$$

図-2 全波力ならびに作用点



また全波力の作用点は図-2を参照すればつぎのようになる。

$$z_G = \frac{(1.68wd'^2) \times (0.4d') - (2.5wd'^2) \times (0.48d')}{4.18wd'^2} = -0.126d' \dots (2)$$

以上式(1)および式(2)を用いて各堤脚水深に対応する全波力およびその作用点を求めると表-1のようになる。

表-1

堤 脚 水 深 d' (cm)	2	4	6	8	10
全 波 力 (gr/cm)	16.8	66.9	151	267	418
作 用 点 z_G (cm)	-0.26	-0.52	-0.78	-1.04	-1.30

3. 波圧の力積に関する一考察

構造物に作用する砕波の波圧を取り扱ううえに、例えば最大波圧そのものをとると著しく変動するが、力積を

* 正会員 工博 東京大学教授 工学部

** 正会員 工博 東京大学助教授 工学部

*** 正会員 東京大学助手 工学部

とって整理するとかなりまとまった値になることが知られている。Bagnold⁹⁾ は砕波の波圧の構造物の単位面積当たりに作用する力積と沖波の単位断面積当たりの力積との比 $\int p dt / \rho U_0 H_0$ は $1/5 \sim 1/3$ の値をとることを示している。ここに p は圧力強度, ρ は流体の密度, U_0 は沖波の波速, H_0 は沖波の波高である。林ら⁹⁾ は力積破壊の理論を用いて砕波の力積から波圧公式を導き出している。

われわれの取り扱う砕波後の波圧に対しては単位幅あたりの波圧の力積と沖波の力積との比は波圧の作用する区間について、ほぼ一定した値 α をとるものとする。すなわち

$$\frac{\int p dt}{\rho U_0 H_0} = \alpha \quad \dots\dots\dots (3)$$

そこで波圧の作用する全領域に積分する。

$$\int_{-d'}^{+\beta d'} \left(\int p dt \right) dz = \alpha (1 + \beta) d' \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに $z = \beta d'$ は波圧の作用する上限を示す。また波の周期を T , 重力の加速度を g とすれば $U_0 = \frac{gT}{2\pi}$ で与えられるから

$$\int_{-d'}^{+\beta d'} \left(\int p dz \right) dt = \alpha (1 + \beta) d' \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{g}{2\pi} T H_0 \rho = \alpha (1 + \beta) d'$$

あるいは

$$\frac{\int \frac{P}{\rho g} dt}{T H_0 d'} = \frac{1}{2\pi} \alpha (1 + \beta) \quad \dots\dots\dots (6)$$

の関係をj得る。ただし右辺における α および β は、それぞれ定数とすれば、 $\int \frac{P}{\rho g} dt$ と $T H_0 d'$ とは直線的な関係を満足することが予想され、われわれの実験公式によれば $\beta = 1.2$ であるから α を求めることができるであろう。

4. 実験装置および実験方法

実験には前回と同じく、長さ 17 m, 高さ 0.6 m, 幅 0.7 m の 2 次元波動水槽を用い、斜面勾配は 1/15, 一様水深部より水平距離 3.8 m の位置に直立壁を取り付けた。堤脚の水深は 0, 2, 4, 6, (6.5), 8 cm に変化させて斜面上で砕波した後の全波力を計測するようにした。使用した波力計は図-3 に示したように、直立壁の中央部に 20 cm × 30 cm × 6 mm の受圧板を、上下間隔 19.5 cm (堤脚水深 6.5 cm のもののみ 15 cm) の 2 点で、リングに連結し、上部接点はベアリングを介し、下部接点はスプリングにより約 1 kg の張力を板に与えて、作用する波力を上下 2 点の反力として取り出した。これらの反力から全波力ならびに作用点を求めることができる。リングには電気抵抗線ひずみ計をはりつけて、作用する波力をビシグラフによって記録した。リングは 2 種

図-3 全波力測定方式

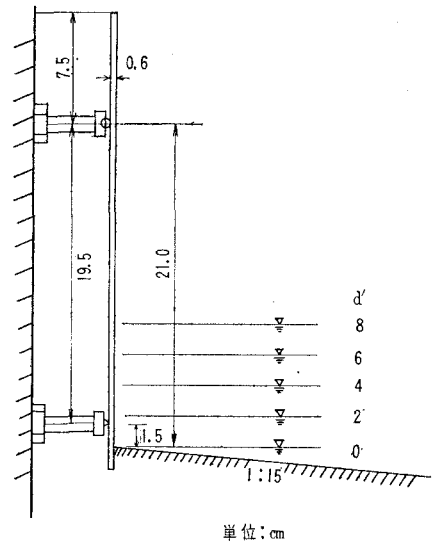


表-2

種類	感度	固有振動数 (cps)		減衰係数
		無負荷	10 kg	
I	$P = 0.25 y$	500	140	1.35
II	$P = 0.16 y$	400	100	1.18

類用意し、それぞれの特性は表-2 に示すようである。また、ビシグラフのガルバノメーターとしては G-500 A 型 (固有振動数 500 cps) のものを使用した。

実験に使用した波は、一様水深部 (水深 30.5 ~ 36.5 cm) での波高 H が 10 ~ 13 cm になるように調整し、また周期 T は 0.8, 1.2, 1.6, 2.0 2.3 sec の 5 種をとって考えた。これらの実験波は定常に達した一連の波のうち、短い周期の波については 3 ~ 13 波目までの 10 波を、長い周期の波については 3 ~ 8 波目までの 5 波について検討している。

5. 実験結果ならびに考察

(1) 現地資料との対比

先に提出した実験式の妥当性を検討するために、昭和 38 年度の冬季間に新潟県土木部信濃川工事事務所によって広井式波圧計を用いて波圧の現地測定が実施された。また著者らも波圧計の特性検討を目的として約 1 週間滞在して半導体式波圧計 (実験室とほぼ同じ特性をもつ) を使用した。計測器の不備から十分な資料を得るに至らなかったが、ここに参考のために実験式との比較を示そう。

現地に設置された波圧計はコンクリートブロックに取り付け、既存護岸の前面に図-4 のように据え付けられた。すなわち堤脚水深は約 1 m である。波の特性は約 12 m の水深に設置してある水圧式波浪計により同時刻

図-4 新潟西海岸波圧計設置位置

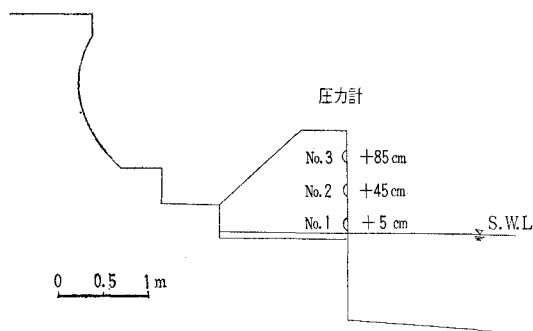
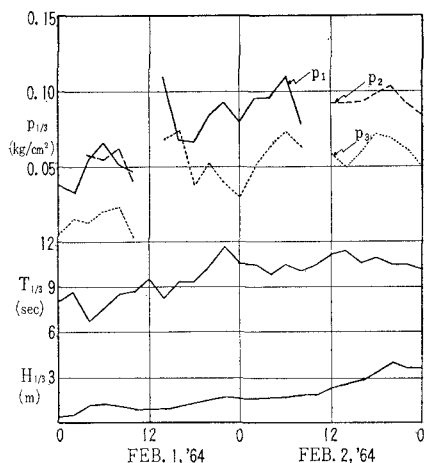
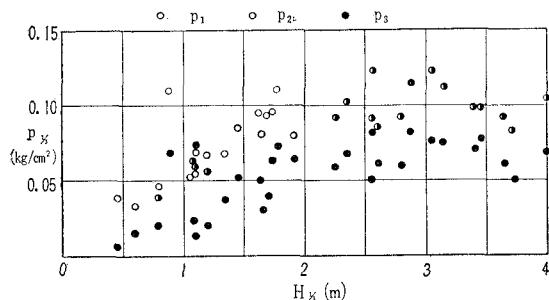


図-5 現地観測結果の一例

図-6 $p_{1/3}$ と $H_{1/3}$ との関係(現地)

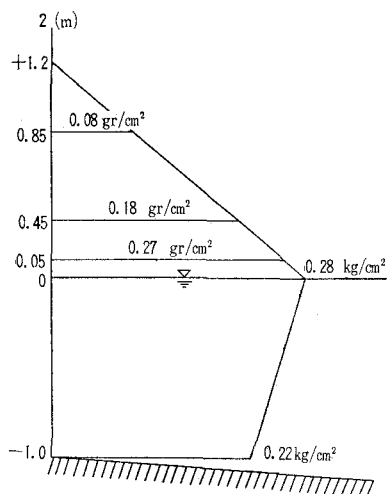
に測定した。一連の記録は 10 分間にわたったものであるが、資料の整理にあたっては統計量として取り扱う必要がある。そこで波高、周期ならびに波圧の分布を調べた所、つぎの事実を確認した。

① 波の周期の頻度分布は対数正規分布をなす。

② 波高の頻度分布ならびに波圧の頻度分布はともに Rayleigh 分布によって有意に表示しうる。

以上によって統計量として、波高および波圧の $1/3$ 最大値をとってそれぞれ $H_{1/3}$, $p_{1/3}$ と表わすことにする。実験においては規則波を用い、かつ波圧の平均値をもって議論しているので、上記の統計量と直接に対応させるには若干疑問があるが、傾向を調べることはできる

図-7 波圧分布計算図(現地)



であろう。図-5 はそのようにして得られた記録の一例であるが、圧力計 p_3 を除いてはあまり具合がよくなく欠測しがちであった。図-6 は、使用しうる資料全部を使って $H_{1/3}$ と $p_{1/3}$ との関係を求めたものであり、明瞭ではないが、波高の増大にともなって波圧は大きくなり、ある波高で碎波の作用を受けて著しく大きな波圧を生じ、それ以後はやや圧力が低下し、ほぼ一様な値に近づいて行くようである。このような傾向はすでに筆者らが先に実験結果として報告^{1),2)}したものと一致している。そこで漸近値をもって実験公式と比較してみよう。図-7 は計算によって求められた波圧分布図ならびに各波圧計で予想される波圧強度を示したものであるが、 p_3 についてはほぼ妥当な一致をみせているのに対し、 p_1 , p_2 の観測値はかなり小さいことがわかる。この理由としては、波圧計の特性、記録方式にも問題があるが、根本的には測定計器の不備にあると思われる。したがって今後はより正確な資料を得るよう努力すべきと考える。

(2) 全波力ならびに作用点

測定した記録のうち初期の定常に達しない数波の記録を除いて、上下 2 点の圧力の合力が最大になる時点において、それぞれの圧力を読みとり 10~5 波の平均値から最大の全波力およびその作用点を算出した。

一連の実験波における、個々の波力の変動は、図-8 にみられるとおりである。図中 F_L は受圧板(幅員 20 cm)に作用する下部の反力を示し、 $\bar{F}_L$ はその平均値である。碎波したあとの波力であるので、動圧を生ずる衝撃圧は碎波にみられるものよりも散乱の程度は少なく、ほとんどの波は平均値の $\pm 30\%$ の範囲に入るようである。 $H_0/L_0 = 0.016 \sim 0.023$, $d' = 6$ cm の散乱が大きいのは、碎波領域に近いことによるものであり、一方、 $d' = 0$ cm の散乱が大きなものがあるのは、波力の絶対値が

図-8 測定値のちらばり度

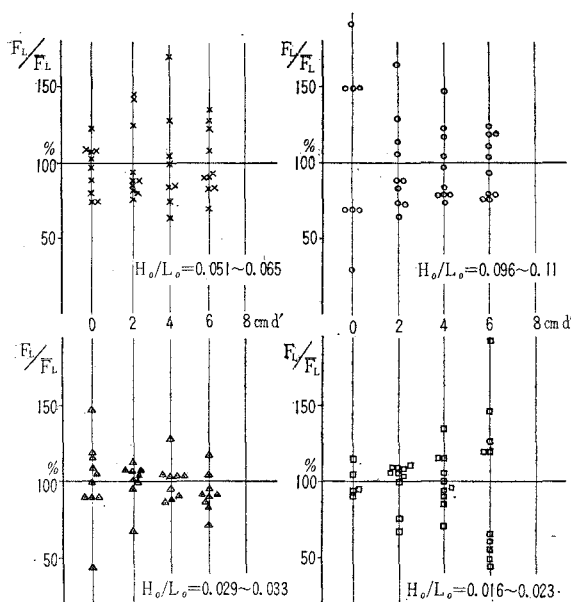


図-9 全波力と堤脚水深との関係

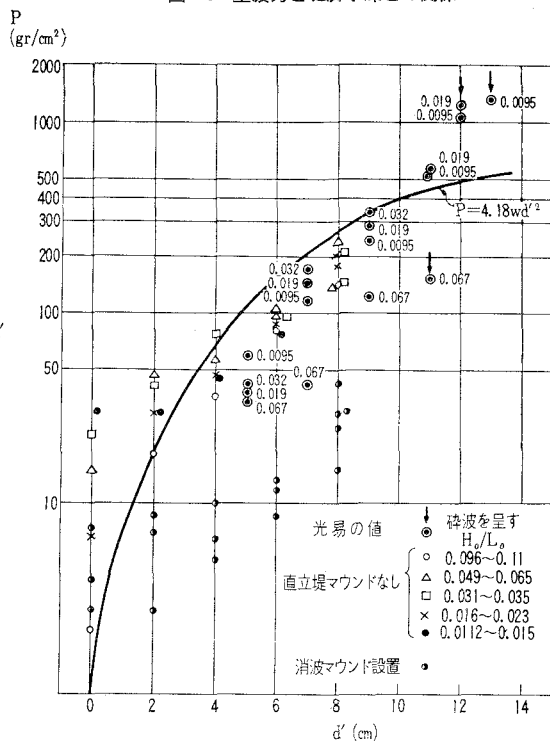
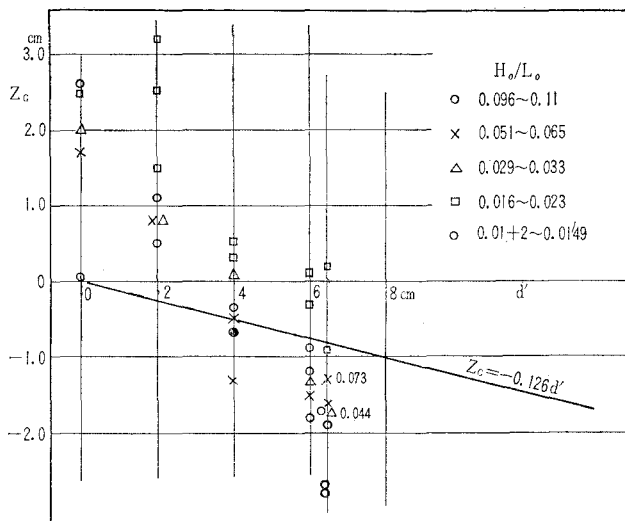


図-10 全波力の作用点



小さいためと思われる。

実験によって得られた単位幅当りの全波力を図-9に示してある。なお図中 $d' = 5, 7, 9, 11, 12$ cm のものは光易⁷⁾による実験結果であり、今回のわれわれの実験の d' が 8 cm 以下のものとかかり良く接続できるようである。なお、図中の矢印は砕波による波圧を示すものであり、実線はわれわれの実験公式による式 (1) を記入したものである。 d' が大きくなり砕波が作用する場合には、実線よりも大きな値を与えるが、砕波後の $8 \text{ cm} \geq d' > 2 \text{ cm}$ にかけては H_0/L_0 による点の散乱も比較的少なく、公式があてはまりうる領域、すなわち波圧が堤脚水深によって支配される範囲と考えられる。 $d' < 2 \text{ cm}$ では予期されたように実線からしだいにはずれ、 H_0/L_0 によって広い範囲に分布するようになる。

つぎに作用点の位置 z_G についての比較を図-10に示す。図中の直線は式 (2) を記入したものであり、実験値より求めた値はこの直線の上下に大きく散乱しており、波圧分布の複雑なことを示している。一般的に $d' < 2 \text{ cm}$ になると全波圧について述べたと同様に $z_G = -0.126d'$ の線から離れ H_0/L_0 による差異が著しい。しかし実験の精度にもなお検討を要する点があるので、今後の研究にまつこととしたい。

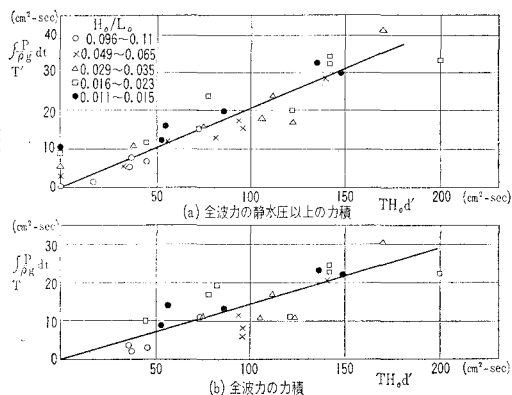
以上全波力および作用点について検討をすすめてきたが、先に提出した実験公式はかなり有用であることが判明した。ただし堤脚水深が小さい所では過小な値を与え

ること、また H_0/L_0 の影響を無視しえないようであることなど、さらに検討しなければならない。

(3) 全波力の力積

全波力の力積について調べてみよう。記録用紙全幅 155 mm のなかに、全波力用 2 点の記録のほか、一様水深部波高、衝突波高と波圧分布をみるための圧力計 4~5 個の記録をとっている。そのため圧力波形の振れ幅も限られたものとなり、静水時の圧力を示す零線の設定の仕方により算出した力積が大きく影響されるおそれ

図-11 力 積 関 係 図



が大きい。図-11 は単位幅あたりの全波力の力積を示す量 $\int \frac{P}{\rho g} dt$ と $TH_0 d'$ との関係を示したものである。このうち (a) は静水圧力以上の部分のみを対象として求めたものである。3. に予測したように、限られたばらつきの範囲内ではほぼ直線的な関係であらわすことができるようである。そこで今平均的な傾向を示すものとして、図 (b) 中の実線をとって代表させることにすると、式 (6) より

$$\frac{1}{2\pi} \alpha(1+\beta) = 0.15 \quad \dots\dots\dots (7)$$

をうる。いま $\beta = 1.2$ とすれば

$$\alpha = 0.43$$

となり、これは砕波について従来えられていた値⁶⁾にほぼ対応したものである。同様に図 (a) 中の実線を用いれば

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2\pi} \alpha'(1+\beta) &= 0.21 \\ \alpha' &= 0.60 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。これらの数値についてはさらに検討したいと考えている。

(4) 消波ブロックの効果

つぎに空げき率約 50% の消波材料を直立壁前面に静水面上の天端高 +10 cm、天端幅約 10 cm、のり勾配 1:4/3 にマウンドした場合の全波力の軽減の度合いを調べた。その結果は、図-9 にマウンドのない直立壁の場合と直接比較して示してある。これによるとマウンドの空げきによる衝撃圧の吸収が著しく、動圧の大きい $d=4, 6, 8$ cm の波力減殺が顕著にあらわれ 1/5~1/10 になっている様子がわかる。図-12 には実験に用いたマウンドの断面を示した。堤脚水深 $d'=8$ cm のときの、①直立壁のみの場合、②天端高 +10 cm、天端幅 10 cm のマウンドを直立壁に接して設けた場合、③同一断面量のマウンドを堤前方 15 cm に設けた場合、④堤脚より

に 4/3 の勾配に天端高を +10 cm、天端幅を 10 cm になるようにマウンドした場合のそれぞれについての圧力波形の比較を 図-13 に示した。これらを調べた結果つぎのようなことが認められた。

① マウンドによる波力の軽減を期待するためには、筆者らが先に指摘したように沖波波高相当分位静水面上に高める必要があるように思われる。

② 護岸の前面に空間を設けるのが有効か否かは、いまだ明らかではないが、断面 II と IV ではマウンドの量が異なるが、後者のほうが効果は著しい。一方マウンドの量を同じとした断面 II と III とではあまり、その差が明確ではない。

このようなマウンドを設置すると衝撃圧は吸収されるが、マウンド内部の水位上昇に伴い複雑な圧力波形を呈するので、さらに資料を集積する必要があるように思われる。

5. 結 論

海岸護岸・堤防におよぼす波力を検討するために、同時全波力およびその作用点を取り出すことを意図して行なったのであるが、実験精度や測定要領で不備の点が多かった。しかし 1:15 勾配の斜面においてつぎの結論を引

図-12 消波用マウンド断面図

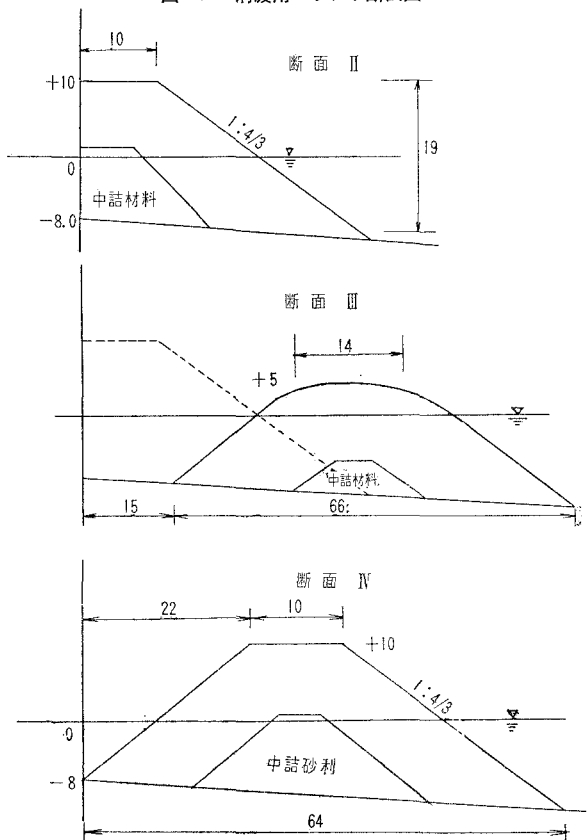
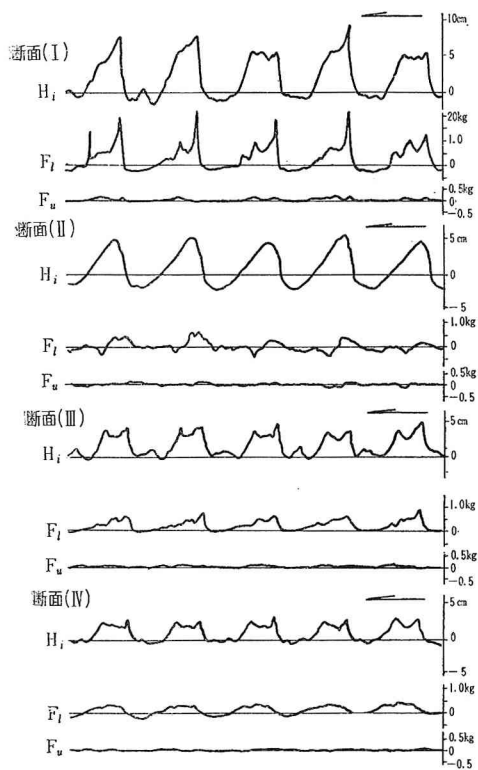


図-13 消波堤による減圧
 $H_0/L_0=0.05\sim 0.06$



き出すことができよう。

① 今回得られた全波力の値は、先に部分波圧から決めた波圧式による値と、ある堤脚水深の範囲で非常に良く一致することを認めた。

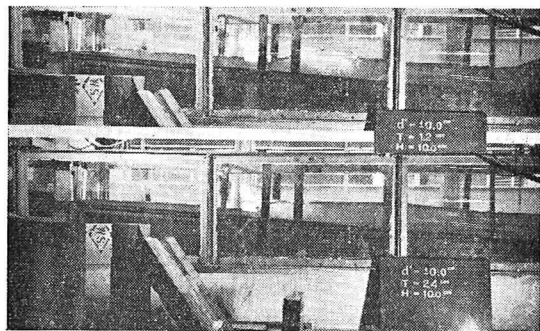
② 全波力の作用点は、全波力のような信頼度は得ることができなかった。しかし、分散の程度が広く、 $z=-0.126d'$ よりかなり低い値を示すものもあることより考えて、先の波圧分布式では静水面に波圧の最大値をとっているが、静水面下に最大の生じている可能性が考えられる。

③ 堤脚水深が 4 cm より小さい部分は、 H_0/L_0 の影響が強くなる。これは 1/15 勾配についてのものであり、現地との相似に関連してくるので、今後、斜路勾配の異なるものについての実験を積重ねる必要がある。

④ 消波材料は、砕けた後の、動圧を減殺して全波力を著しく軽減しうることがわかった。しかし、個々の圧力波形は、より複雑になってくるので、現地の据え付け状況との関係などを考慮してさらに検討を重ねることにする。

海岸に侵入してくる波は、海底勾配と沖波波形勾配に

写真-1



よって、巻波型および崩れ波型の砕波現象を呈する。そして砕けてしまった後は、気泡を包含して、渦動運動を起こしながら浅いところに進入し、第 2、第 3 の砕波をともなうにエネルギーを減じていく。写真-1 は、実験ケースの 2 例を示してあるが、これにみるように、水深全体が、気体と液体の混合体となって作用するので、今後は、このような観点からの研究も進めるように考えている。その他 1/20~1/25 の緩勾配のように、勾配の異なる場合の検討も残されており、また実験装置を整備して、やがては不規則波による波力の研究にも、進むよう計画を進めている。

本研究のための実験は、東京大学工学部土木学科港湾研究室員の協力によってなされたものであり、ここに謝意を表するとともに、新潟県土木部信濃川工事事務所の技師諸氏の現地観測の努力に対して敬意を払うものである。なお、本研究は昭和 38 年度文部省科学研究費ならびに新潟県土木部よりの依頼によって実施した研究成果の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 本間 仁・堀川清司・長谷直樹：護岸に働く波力について、第 9 回海岸工学講演会講演集、(1962)。
- 2) 本間 仁・堀川清司・長谷直樹：海岸堤防に作用する波圧の分布について、第 10 回海岸工学講演会講演集、(1963)。
- 3) Hom-ma, M. and Horikawa, K.: Wave Forces against Sea Wall, Proc. 9th Conf. on Coastal Engineering, (1964). (投稿中)
- 4) Beach Erosion Board: Shore Protection Planning and Design, Tech. Report No. 4, (1961)。
- 5) Bagnold, R.A.: Interim Report on Wave-pressure Research, Jour. of Institution of Civil Engineers, Vol. 12, (1939)。
- 6) 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)。
- 7) 光易 恒：直立壁に働く全波力について、第 6 回海岸工学講演会講演集、(1959)。