

砕波による衝撃的波圧(1)

光 易 恒*

1. 緒 言

筆者は、まえに、各種の条件を系統的に変化しながら、壁体に作用する全波力を直接に測定して、強大な衝撃的波力の発生する条件ならびに波力の強さと波の特性および境界条件との関連などを明らかにした¹⁾。このとき、特に全波力を研究の対象として選んだ理由の一つは、特に衝撃的波圧が発生するときには、波圧は時間的に急激に変動し、空間的にも複雑な変化を示すので、数点における波圧の測定より、壁の水平移動を議論するために必要な壁全体に作用する波力を求めることは困難であると考えたからである。もう一つの理由は、波圧の特性は各種の条件によっていちじるしく変化するので、波圧の現象を大局的に把握するにはこれら諸条件と波圧との関係を明らかにする必要があるが、この場合に全波力を取り扱った方がより便利であると考えたからである。

このように、全波力を直接取り扱うやり方は、波力の現象を大局的にとらえるためにも、また実際の面でも有効な方法ではあるが、直接測定された全波力においては、波圧の空間的分布に関する情報が失われているので、波圧の微細な性質が必要な場合にはもう一度局所的な波圧の問題にたち帰る必要がある。ところで、従来の数多くの波圧の研究は、ほとんどすべての場合、局部波圧の測定を行なうことによって進められてきた。したがって、波圧に関してはぼう大なデータが集積されて来ているのであるが、従来の研究では多くの場合、各部における波圧の強さ $p_{\max}$ の特性、または $p_{\max}$ の空間分布などを調べることに重点がおかれていたので、特に衝撃的波圧の場合には、波圧の時間的変化 time history の細部、波圧の time history の空間的変化²⁾、一般的にいえば $p(t, y, z)$ の特性、または、永井博士によりとりあつかわれたような同時波圧の分布³⁾、これらに関して十分解明されているとはいえない。

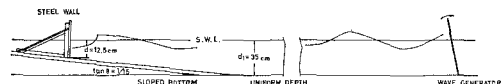
この研究は、筆者が、前述の全波力の研究¹⁾を行なった際平行して、特に強大な衝撃的波力が発生した場合について、チタン酸バリウムを利用した高い方の周波数特性が非常にすぐれた圧力計を用いて、衝撃的波圧の微細

構造を調べるために行なった実験の結果をとりまとめたものである。今回の報告では、主として、衝撃的波圧の測定方法、測定された衝撃的波圧の特徴的な性質などについて議論を行ない、衝撃的波圧の発生機構などに関するくわしい議論は別の機会にゆずる。

2. 実験装置および方法

実験は、前回の研究 [Mitsuyasu (1962)]¹⁾ と全く同様に、港湾技術研究所の 22 m 造波水路(長さ 22 m, 幅 0.6 m, 水深 0.35 m)において行なわれた。すなわち、水路の終端に一樣な傾斜の斜面を設けて、他端より周期性の規則的な波を送りこの傾斜水底上で砕波するようにした。そして傾斜水底上の砕波点の近くに壁体を設置してその壁面に砕波が衝突した際発生する衝撃的圧力変動の測定を行なった。ただし、水底勾配は 1/15 の一種類を、波は No. 2 の波 ($T=1.90$ sec, $L_1=329$ cm, $H_1=10.4$ cm, $H_0=10.5$ cm, $L_0=563$ cm, $H_0/L_0=0.019$, $d_1/L_1=0.106$) のみを使用した。壁体の設置水深としては、上記の条件で強大な波力が発生した $d=12.5$ cm が選ばれた。実験装置の概略は図-1 に示すとおりである。

図-1 Arrangement of equipment.



前回の全波力の測定では、壁面の中央部に幅 22 cm, 高さ 30 cm の広い受圧部を有する波力計が取り付けられていたが、今回の研究では、この部分に後述する小型波圧計を取付けるように工作された厚さ 10 mm の鋼板をネジで固定した。この板はさらに背後より溝型鋼 (5×45×75 mm) で補強して、その剛度を十分に高くした。測定状態にしておいて、板を槌で打って測定した板の固有振動数は約 2000 c/s であった。図-2 は壁体の構造を示すもので、壁面上の丸い所は波圧計の取付穴 (φ22 mm) で波圧計のない部分は砲金製のネジが背後からしめつけられ表面はきわめて滑らかになっている。

波 圧 計

今回測定の対象とする波圧は急激に変化する衝撃的波圧であるので十分に速い応答特性を有する変換器が要求される。種々の形式の変換器を広く検討したうえ、チタン酸バリウム BaTiO₃ を利用した圧電型の変換器を採用

* 正会員 理博 九州大学助教授 応用力学研究所

** 弧立波の場合、鉛直方向の多数点で波圧の同時測定を行なった林博士等の研究の報告³⁾には、衝撃的波圧の time history に関し興味ある結果が示されている。

図-2 Steel wall.

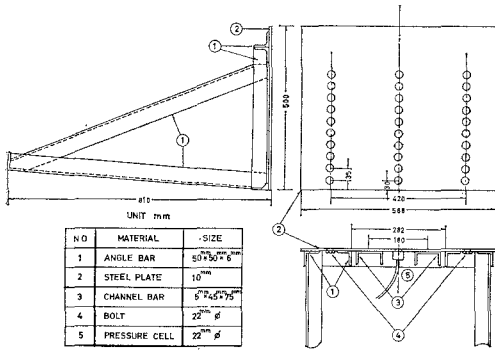
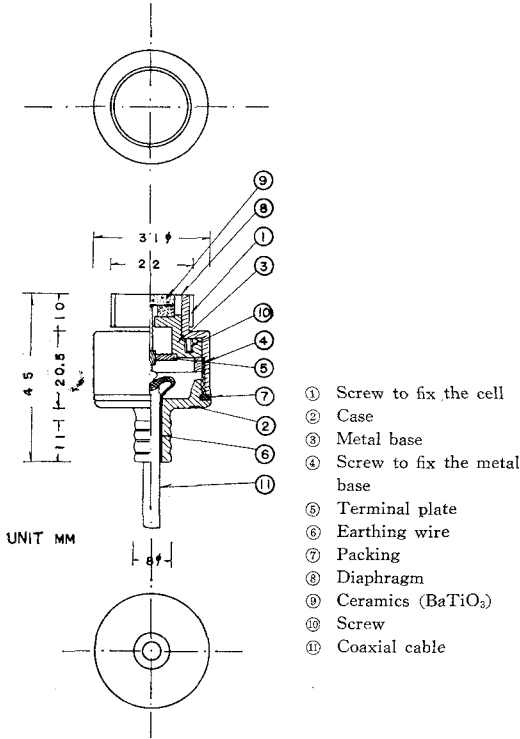


図-3 Pressure cell.



することにして、細部の設計と製作を小林理研製作所に依頼した。この波圧計の構造は図-3に示すとおりで、その主要な性能はつぎのごときものである。

受圧面: φ12mm

感 度: 約 2V/kg/cm²

内部インピーダンス: 略純容量性 (本体のみ約 1000 pf, ケーブル 3m を含め約 1300 pf)

受圧面固有振動数: 10kc 以上

測定可能最低周波数: 約 10 c/s (負荷インピーダンスが十分大きいとき)

最大測定圧力: 約 5 kg/cm²

なお、この圧力計は、受圧板(図-3の⑧)により圧電素子⑨がかなりの強さで圧されているので、ある程度までは、負圧をも感じる事ができる。また、このケ

ーブルのとり出し部は水密構造となっていないで、ケーブル取出し部の金具の先端にビニール管を接続してこの中にケーブルを通すことによって、圧力計内への水の浸入が防止されている。このように、圧力計の内部はビニール管を通じて外部に連らなっているので、圧力計内部は常にほぼ大気圧に保たれることになる。

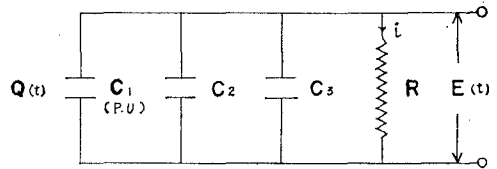
圧電素子の板において、板の面積を S 、圧電率を d_{11} 、電気容量を C_1 とすれば、面に作用する圧力 p によって板の両面間に生ずる電圧 E は、

$$E = \frac{Q}{C_1} = \frac{d_{11} S p}{C_1} \quad (Q: \text{誘起される電気量}) \quad \dots (1)$$

となり、圧力 p に比例する。しかしこれは回路が開いているときの電圧であって、負荷が接続されているときには、負荷抵抗を通して電気量が失われるので、圧力の変化がよほど速くないと、また負荷抵抗が非常に大きくないと誘起電圧の変化は圧力の変化に比例しないことになる。この間の事情を定量的にはっきりさせ、今回使用する波圧計の応答特性を求めるために、波圧計の回路の解析を以下行なうことにする。

波圧計の受感部の内部インピーダンスは略純容量性と考えられるので、受圧部(圧電体)の容量を C_1 、ケーブルの容量を C_2 、接続回路の入力端子よりみた容量を C_3 、入力抵抗を R とすれば、等価回路は図-4のようになる。この回路において、波圧計の受圧部に作用する圧力 p により抵抗に生ずる電圧 E は次式で与えられる。

図-4 Equivalent circuit of pressure cell.



$$E = iR = \frac{Q - \int idt}{C} \quad \dots (2)$$

ただし、 $C = C_1 + C_2 + C_3$ 、 $Q = d_{11} S p = kF$ (F : 受圧部に作用する力)

式(2)を時間 t で微分し変形すると次式が得られ、

$$\dot{E} + E/CR = \dot{Q}/C = k\dot{F}/C \quad \dots (3)$$

$R \rightarrow \infty$ で $E \propto F$ 、 R がきわめて小さいとき $E \propto \dot{F}$ となることがわかる。一般に、外力が次式のような正弦的な変化をする場合を考えてみる。

$$F = F_0 \sin \omega t \quad (\omega = 2\pi/T_1) \quad \dots (4)$$

式(4)を式(3)の右辺に入れ、 $t=0$ で $E=0$ なる初期条件を与えたときの式(3)の解は容易に求まり、

$$E = \frac{kF_0}{C} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega CR}\right)^2}} \left\{ -e^{-t/CR} \sin \delta + \sin(\omega t + \delta) \right\}$$

$$\delta = \tan^{-1} \frac{1}{\omega CR} = \tan^{-1} \frac{T_1}{2\pi CR}$$

$$\dots (5)$$

となる。これより、回路の時定数 CR が外力の変動周期に比して十分大きくないと、誘起電圧は $R \rightarrow \infty$ の理想的な場合に比して振幅、位相ともに変化し、特に T が大きい場合、すなわち低周波側で、出力の低下と位相の進みが生じることがわかる。つぎに数量的にこの応答特性をみるため、衝撃的波圧のピークの部分の時間的変化を次式のような正弦波型のインパルスと仮定して、このときの応答を計算してみる。

$$\left. \begin{aligned} F &= F_0 \sin \frac{2\pi}{T_1} t \quad 0 \leq t \leq \frac{T_1}{2} \\ F &= 0 \quad \frac{T_1}{2} < t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

便宜上

$$T_1/CR = 2\pi/\omega \quad CR = u_1, \quad t/T_1 = T_* \quad \dots\dots\dots (7)$$

において新しい無次元量 u_1 および T_* を導入し、さらに式(5)を $R \rightarrow \infty$ のとき静的な力が加わった時の出力電圧 $E_0 = kF_0/C$ で割ると、 $0 \leq T_* \leq 0.5$ に対する応答として次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{E}{E_0} &= \frac{1}{\sqrt{1+(u_1/2\pi)^2}} \{ -(e^{-u_1 T_*}) \sin \delta + \sin(2\pi T_* + \delta) \} \\ \delta &= \tan^{-1} u_1/2\pi, \quad 0 \leq T_* \leq 0.5 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

$0.5 < T_*$ に対する解は、式(3)で $\dot{F}=0$ であるから容易につぎのように求まる。

$$E = E_1 e^{-t/CR} \quad (E_1: \text{任意定数}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(9)を式(8)と同様に無次元化し、 $T_* = 0.5$ でこの解が式(8)の $T_* = 0.5$ における値 E_*/E_0 に接続するように E_1 を定めると式(9)は結局つぎのようになる。

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{E_*}{E_0} \right) e^{-u_1 (T_* - 0.5)} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$u_1 (= T_1/CR)$ の値として 0.1, 0.2, 0.4, 1, 2, 4 において、実際の応答を計算した結果を図-5(a)~(b)に示した。図中、点線で完全に応答したときの正弦波型のインパルス(無次元化した入力波形に等しい)、実線でそれぞれの u_1 の値に対応した応答波形が示されている。これより、非常に高い精度の測定を行なうには、 $u_1 \leq 0.1$ でなければならないこと、5~10%の誤差を許容すれば $u_1 \leq 0.4$ でよいこと、この回路の応答の特性として外力のインパルスが作用したあとで少し電圧の低下が生じることなどがわかる。このように回路の低周波における応答をよくするためには、回路の時定数 CR を外力の周期に比して大きくすることが必要であるが、 C を増大すると式(5)よりわかるように出力電圧が低下するので R を非常に大きくすることが望ましい。このため、一般に、入力インピーダンス Z_i が非常に高く、出力インピーダンス Z_o が非常に低いカソードフォロアー回路が利用される。

今回使用したカソードフォロアー回路は図-6に示し

図-5(a) Impulsive response of pressure measuring circuit.

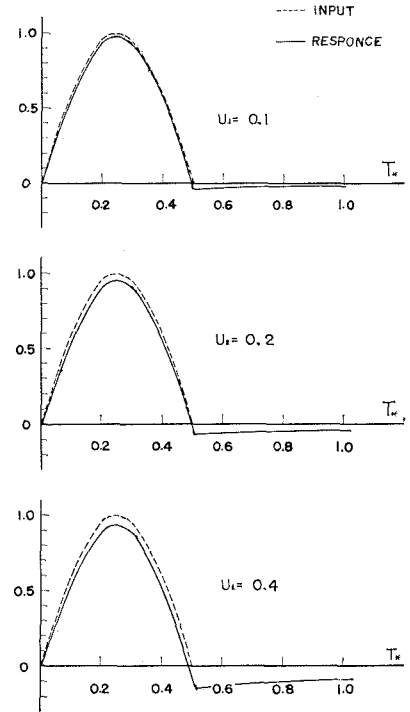


図-5(b) Impulsive response of pressure measuring circuit.

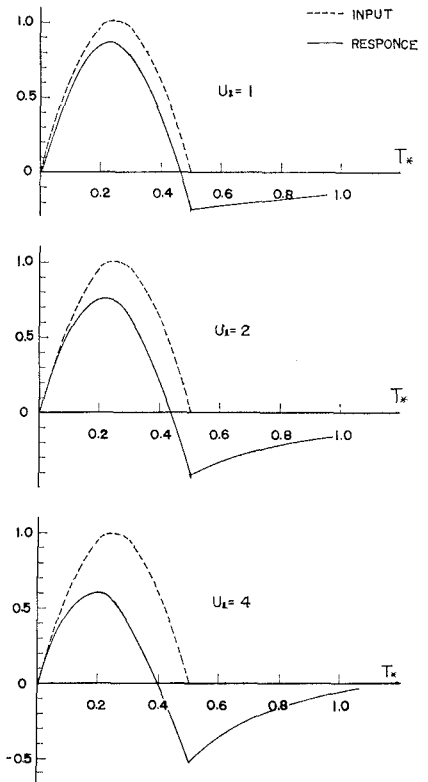
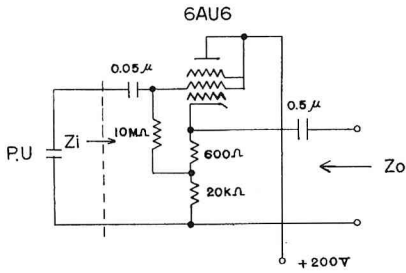


図-6 Cathod follower.

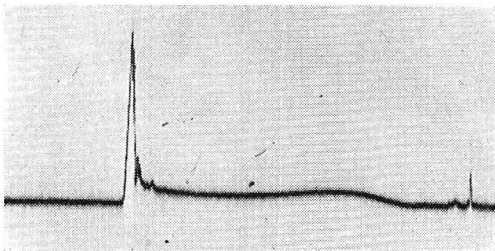


たようなもので、入力インピーダンス約 170 MΩ、出力インピーダンス約 210 Ω で増幅度は 1 に近いものであった。この入力インピーダンス $R=170\text{ M}\Omega$ と前述の波圧計のケーブルをも含めた容量 $C=1\text{ 300 pf}$ を使用すると、時定数 CR は $CR=0.22$ となるので、まえに計算に使用した u_1 の値に対応する外力の周期 T_1 ならびに周波数 f_1 の値はつぎのようになる。

u_1	0.1	0.2	0.4	1	2	4
$T_1\text{ sec}$	0.022	0.044	0.088	0.22	0.44	0.88
$f_1\text{ c/s}$	45.5	22.7	11.4	4.55	2.27	1.14

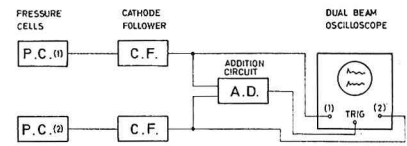
これより、われわれが今回使用した波圧測定回路では約 12 c/s 以上の圧力変動を数 % 以下の誤差で正確に測定できることがわかる。周波数の高い方に関しては、圧力計自体が 10 kc くらいまではほぼ様な応答特性を有すること、記録器として、0~1 Mc ではほぼ様な周波数特性を有するオシロスコープが使用されていることなどから考えて、少なくとも 10 kc くらいまでは正確に圧力変動を測定できることになる。このように、今回使用した波圧測定回路は、高い周波数側にはほとんど問題がないが非常に低い周波数には忠実な応答を示さないで、図-7 に示したような波圧の time history $p(t)$ において、最初のピークの部分のみがこの測器で非常に正確に測定できることになる。

図-7 Pressure time history $p(t)$ (This record was taken by magnetostriction type pressure cell⁽⁴⁾).



波圧測定回路の全体の構成は図-8 に示すとおりで、2 ヶ所で同時測定を行なうための 2 組のチタン酸バリウム型の波圧計、それに接続する 2 組のカソード フォロー回路、加算回路 1 組および二要素オシロスコープより成る。加算回路は、2 組の波圧計のうちはやく波圧を感じた方の電圧信号に、オシロスコープの時間軸の掃引を同期させるために使用したもので、加算され増

図-8 Measuring circuit of wave pressure.

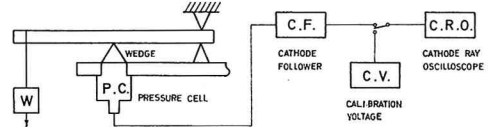


幅された信号はオシロスコープの外部同期の端子に送られている。二要素オシロスコープとしては、東芝 ST-1552 A 型(直流増幅器の周波数特性: 0~1 Mc± 3 db, 最大増幅度: 10 mV/1 cm)を使用し、圧力波形 $p(t)$ の記録にはキャノンオシロスコープユニット CO-120-111 A が用いられた。

波圧計の検定

この波圧計では、静的な検定を行なうことができないので、図-9 に示すような方法で、円錐形の加圧くさびを使用して受圧部に一樣な力を加えておいた後、おもりを支えている糸を焼切ることによって急に圧力を減じたり、逆にははじめにおもりを手で支えておき、これを急にはなして急激な力を加えたりして検定を行なった。不規則な衝撃を加えると、出力がおかしくなるし、荷重の変動があまりにゆるやかでも出力が低下するのでこの力の加え方は、実際にはかなりの熟練を要した。

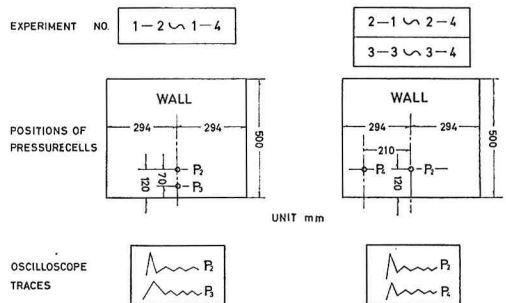
図-9 Calibration method of pressure cell.



波圧計の配置および測定法

この報告に使用する波圧の記録をとった波圧計の位置は図-10 に示すとおりで、実験番号 1-2~1-4 の測定においては壁の中央で水底より 12 cm の高さの位置における波圧 p_2 (波圧計の中心が静水位より 5 mm 下になる) およびそれより 7 cm 下の点における波圧 p_3 の同時測定が行なわれた。この p_3 の測定点は波が最も引いたときでも常に水中に没している。実験番号 2-1~2-4 および実験番号 3-3~3-4 では p_3 のかわりに p_2 の測定点より横方向に 21 cm ($y/H_0 \approx 2$) はなれ、 p_2

図-10 Measuring positions of wave pressures and corresponding oscilloscope traces.



の測定点と同じ高さにある点の波圧 p_1 が選ばれ、 p_2 と p_4 の同時測定が行なわれた。造波板は毎回同じ位置から動かしはじめ、生じた波の性質が一様になったはじめの波から順次波圧の測定を行なった。

3. 実験結果と考察

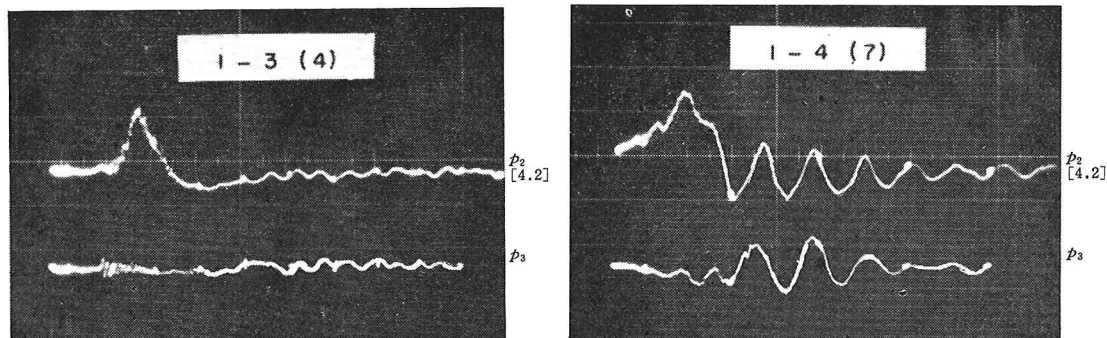
前傾した砕波が直立壁に衝突して発生する圧力の時間的変化すなわち圧力波形は、まえに図-7に示したようなものである。すなわち、波のフロントが壁に衝突した瞬間に、圧力波形の最初のピークに相当する衝撃的圧力が発生するが、その作用時間は非常に短く、衝突した波が壁に沿って上昇をはじめたとき以後は普通の重複波に類似したゆるやかな変動波圧になっている。今回の研究でくわしく調べようとしているのはこの圧力波形におけ

る最初のピークの部分である。このため、オシロスコープの掃引速度をかなり速くしてこのピークの部分のみを拡大して記録した。また、波圧の測定をこの圧力波形におけるピークの部分のみに限定すれば、前節で述べた測定器の低周波における応答の低下はあまり問題とならないであろう。

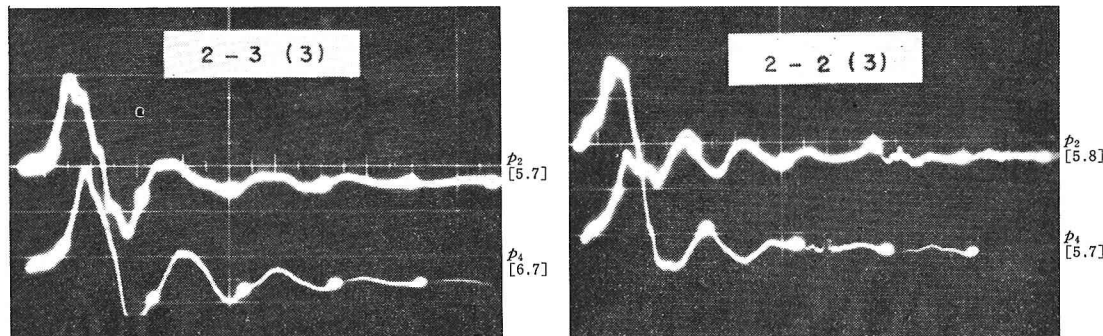
注意深く波の特性が一定になるようにして波圧の測定を行なったにもかかわらず、測定された衝撃的波圧の圧力波形は千差万別であった。図-11は測定された数多くの圧力波形のうちから、代表的なものを選び出して便宜的に5種類に分類して示したものである。これらの写真で、時間軸の掃引速度は 1-3(4) では 1 mm/m sec, それ以外はすべて、2 mm/m sec で、10 m sec おきの時間目盛が輝度変調(白点の部分)で圧力波形の記録の

図-11 Oscilloscope records of shock pressures.

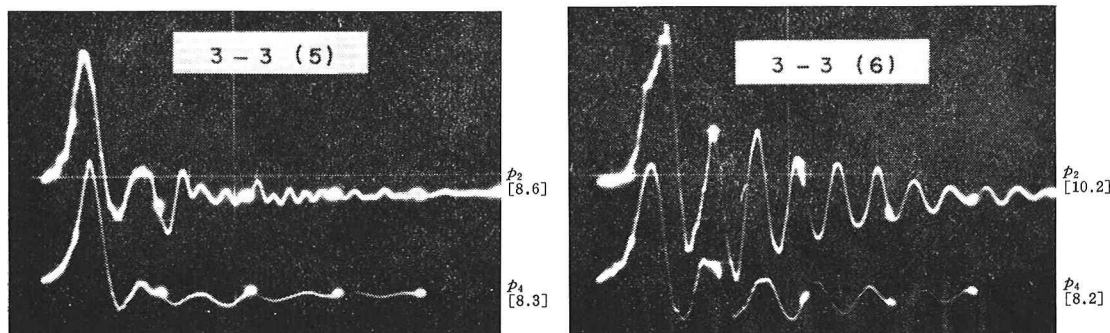
① Shock pressures of low intensity.



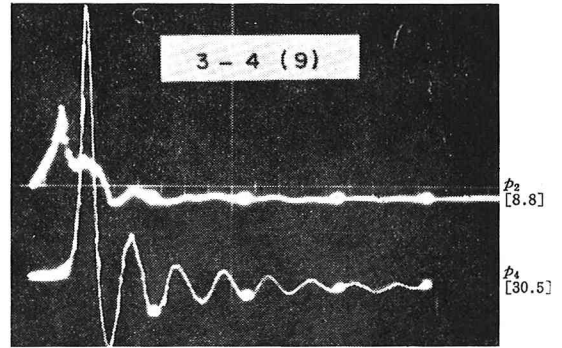
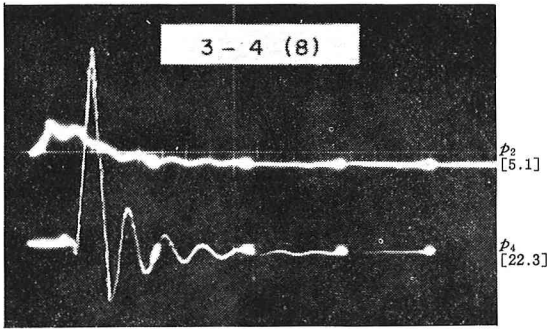
② Shock pressures of medium intensity.



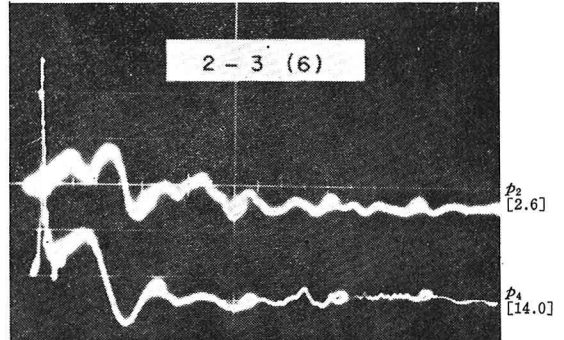
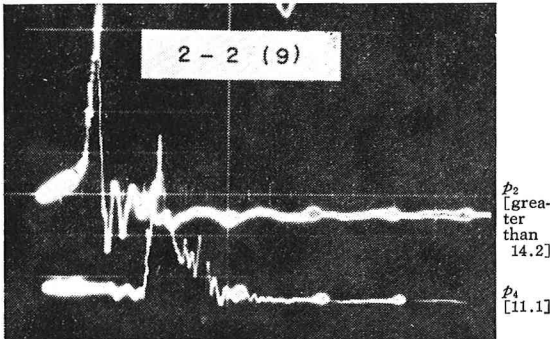
③ Shock pressures of medium high intensity.



④ Shock pressures of very high intensity



⑤ Shock pressures of irregular time history.



うえに重なっている。なお、写真中の数字 1-3(4)などは1-3が実験番号を、(4)が造波機で起こした最初の波から数えた波の番号をそれぞれ意味し、表一1の番号にそれぞれ対応している。また、図一11で[]内の数値は $p_{\max}/\rho g H_0$ の値を示す。表一1は、計測されたすべての圧力波形より読取った波圧の特性、すなわち、最初のピークの部分の波圧の強さ $p_{\max}$ 、その継続時間 τ および振動性の圧力変動が生じている場合にはその周期 T などを一括して示したものである。これらの資料より、衝撃的波圧の特性を 図一11の記録を順を追って参照しながら、列記するとつぎのようになる。

① 波が引いたときでも水中に没しているような点の波圧 p_2 には、波が衝突した際衝撃的波圧が生じた例はほとんどみられなかった。記録 1-4(7)のように静水位付近の圧力 p_2 に明瞭な振動性の変動が生じたときには水中の点でもほとんど同様な圧力の変動がみられた。以前筆者が、同様な条件で行なった測定では、強さは弱いが明瞭な衝撃的波圧が水中の点でも測定された^{1),4)}。しかし、このような差異がどうして生じたのか現在のところ不明である。

静水位付近の圧力 p_2 についてみると、比較的弱い衝撃的波圧($p_{\max}/\rho g H_0 \leq 5$)では、記録 1-3(4)に示されたような、振動性でない圧力波形が記録された例もかなりあった。しかし、記録 1-4(7)のように波圧が弱くても振動性の圧力変動が生じた例もみられて、必ずしも波圧の強さのみには関係しない。これは、おそらく波圧

の発生機構自体の差異にもとづくもので、後述するように、振動性の圧力変動は衝突の際包み込まれた空気層 air cushion がある場合に生じ、大規模な air cushion なしに乱れた水塊が直接壁に衝突する場合(たとえば砕波の上層の空気層に覆いかぶさるようにしてとび出す水塊の衝突)、または空気が包み込まれてもすぐに放出さ

表一(a) 砕波による衝撃的波圧

実験番号	波の番号	$p_{2\max}$ (gr/cm ²)	$p_{1\max}$ (gr/cm ²)	τ_2 (m sec)	τ_1 (m sec)	T_2 (m sec)	T_1 (m sec)
1-2	3	79	—	7.9	—	6.4	6.9
	4	10	—	17.0	—	—	5.9
	5	56	—	10.0	—	—	6.9
	6	48	—	8.6	—	6.2	6.7
	7	76	—	8.3	—	—	6.2
	8	145以上	—	3.8	—	—	7.2
1-3	3	62	—	9.3	—	6.5	7.2
	4	44	—	13.8	—	5.8	5.8
	5	37	—	2.4	—	5.2	6.9
	6	—	—	—	—	6.9	6.9
	7	58	—	11.7	—	—	—
	8	13	—	8.3	—	—	7.9
1-4	3	76	—	7.5	—	6.7	7.0
	4	—	—	—	—	—	—
	5	—	—	—	—	5.5	6.7
	6	18	—	5.7	—	—	7.5
	7	44	—	11.8	—	5.8	6.2
	8	86	—	9.5	—	—	6.3

波: $H_0=10.5$ cm, $T=1.90$ sec, $H_0/L_0=0.019$

水底勾配: $\tan \theta=1/15$, 壁体の設置水深: $d=12.5$ cm

圧力測定位置: 図一10 参照

(以上と記入されたものはスケールアウトしてこれ以上不明な値を意味する)

表-1 (b) 砕波による衝撃的波圧

実験 番号	波の 番号	$p_{2\max}$ (gr/cm ²)	$p_{4\max}$ (gr/cm ²)	τ_2 (m sec)	τ_4 (m sec)	T_2 (m sec)	T_4 (m sec)
2-1	3	57	70	7.5	7.8	—	—
	4	—	—	—	—	—	—
	5	138以上	37	5.3	4.8	4.2	6.4
	6	63	217以上	5.0	2.8	—	4.0
	7	142以上	84	7.2	6.7	3.7	—
	8	42	40	9.5	8.2	7.2	8.8
	9	—	34	—	2.5	—	—
	10	22	25	5.0	8.0	5.8	—
	11	66	42	5.8	8.7	5.4	—
	12	128	75	5.8	5.5	5.0	6.8
2-2	3	59	58	6.3	7.0	7.0	8.3
	4	12	12	4.7	5.8	6.2	—
	5	24	18	5.5	7.2	6.7	—
	6	24	25	6.7	7.8	—	9.8
	7	31	34	11.2	8.3	5.7	—
	8	—	89	—	7.0	—	—
	9	149以上	117	7.5	7.0	2.2	1.0
2-3	3	60	70	8.3	7.8	10.0	10.7
	4	16	56	8.3	11.3	—	—
	5	—	—	—	—	—	—
	6	27	147	15.2	7.8	—	—
	7	136	217以上	8.2	5.8	—	—
	8	30	214以上	9.8	5.0	—	—
2-4	3	36	48	8.8	9.2	7.2	—
	4	—	—	—	—	—	—
	5	19	—	6.2	—	—	—
	6	42	20	8.2	6.3	5.8	—
3-3	3	35	32	9.7	11.0	10.0	—
	4	26	26	6.7	8.2	6.7	—
	5	91	87	7.0	7.5	1.8	5.7
	6	107	86	9.2	8.3	4.4	6.3
	7	68	222	9.2	3.8	—	—
3-4	3	40	42	7.2	10.0	—	—
	4	37	31	5.0	6.0	—	—
	5	62	82	8.3	7.8	—	6.2
	6	106	183	7.5	4.0	—	4.8
	7	44	371	6.5	2.5	—	3.5
	8	37	234	8.8	3.2	3.5	4.1
	9	93	320	8.0	3.5	—	5.0
	10	57	157	7.8	5.5	—	—
	11	—	—	—	—	—	—
	12	44	27	3.3	6.0	—	—
	13	147	13	8.0	8.3	—	—
	14	106	101	5.8	6.2	7.2	8.9

圧力測定位置図-10 参照) 以外の条件は表-1 (a) の諸条件と同一。

れてしまうような場合(たとえば空気層に覆いかぶさる水の層が薄いとき)には振動性でない圧力波形が生じるようにみえる。

② 静水位付近に中くらいの強さの圧力 ($p_{\max}/\rho g H_0 < 10$) が生じた場合には、横方向に $2H_0$ 程度はなれていても、同様な強さの類似した圧力波形が生じる場合が多い[記録 2-3(3), 2-2(3)]。このことは、 $p_{\max}/\rho g H_0 < 10$ 程度の強さの波圧は、横方向に広い範囲にわたってほぼ一様に作用することを意味し、この種の波圧では作用時刻の差による全波力の減少はあまりないものと考えられる。

③ 静水位付近に $p_{\max}/\rho g H_0 \approx 10$ 程度の波圧が出

現するときは、記録 3-3(6) のように比較的類似した圧力波形が、横方向にはなれていても生じる場合もあるが*、3-3(5) に明瞭にみられるように細部において差が目立ってくる。

④ 記録 3-4(8) および 3-4(9) にみられるように、静水位付近のある点に非常に強い衝撃的波圧 $p_{\max}/\rho g H_0 \geq 20$ が生じる場合には横方向に少しはなれると、たとえ測定点が同一の高さにあっても、来襲波の特性が横方向にほとんど一様であっても、圧力波形は非常に異なる場合が大部分である。このことは強大な衝撃的波圧が非常に複雑な空間的構造を有することを意味する。

⑤ 比較的規則的な形状の水滴や、局部的には滑らかで鉛直に切り立ったような水の面が壁に衝突する機会が全くないとは考えられないので、局部的には非常に強大な継続時間がきわめて短い water hammer のような圧力が生じる可能性が残っている。しかし、波圧計の受圧部に比してその範囲が狭いと波圧計の出力ではある程度平均化されているので、その変化は幾分ゆるやかになる。2-2(9) や 2-3(6) に示された不規則な鋭い圧力波形はこのような状況で発生したものかもしれない。

表-1 に示された結果をみると、衝撃的波圧の強さは、不規則な変動のほかに、波の番号による傾向的な変化が重なっていることがみられる。すなわち、3~5 番の波では極端に大きな波圧が生じていないが、6~7 番の波では非常に強い波圧が発生する機会が多い。これは、砕波の特性が、それに先立つ波の壁よりの反射波に影響されるので、進行波としては、ほとんど一様な性質を有する部分の波であっても、砕波については、それに先立つ起こしはじめの過渡状態の波の影響が累積されて来て、一つ一つの砕波の特性がわずかではあるが異なることになる。このため、波圧の強さが幾分傾向をもった変化を示したのである。②~⑤ を通じて、衝撃的波圧の非常に特徴的な性質として、最初の波圧のピークに引き続いた振動性の圧力変動をあげることができる。すべての場合ではないが、圧力波形に減衰振動的な波形がみられる場合がきわめて多く、その周期 T は衝撃的波圧の強さの増大とともに短くなっている。最初のピークの作用時間 τ も波圧の強さの増大とともに短くなる傾向がある。今回の測定の範囲では、 τ の大きさは 2~17 m sec の範囲にあり、6~16 m sec の間の値が最も多く生じた。振動性の圧力の周期 T の値は 1~12 m sec の範囲にあって、4~8 m sec の値が最も多く生じた。また、振動性の圧力変動の持続時間は、大部分の場合 40 m sec 程度で、圧力変動の対数減衰率を形式的に求めてみると、0.5~1 の範囲であった。測定系の振動特性は、前述のように、波圧計については固有振動数 10 kc 以

* この場合でも、振動性の圧力変動の周期はお互に少し異なっている。

上、壁体の前面の鋼板については固有振動数 2kc 以上であるので、振動性の圧力変動はその振動数の値からしても測定系の振動とは考えられない。また、測定系の条件がかなり異なった、Bagnold⁵⁾ (1939)* や Ross⁶⁾ (1955) の測定結果にも同様な変動圧力が生じていることからしても、これは実際の衝撃的波圧の一つの特性と考えることができる。このような振動性の波圧の発生する原因は、その振動数のオーダーから考えても、目視観測ならびに 16mm 撮影機による記録より得た波の衝突の瞬間の形状よりみても、包み込まれた空気層の振動によるものと考えるのが妥当なように思われる。このようなモデルによる現象の解析が現在進行しているので近い機会に発表することができるものと思われる。

4. 結 語

今回測定された砕波の衝突による衝撃的波圧の非常に特徴的な性質は、圧力波形の最初のピークに引きつづいた減衰振動的な圧力変動がきわめて多く生じたことである。そして、最初の波圧ピークの作用時間ならびに振動性の波圧の周期は、ともに、最初の波圧のピークの強さとともに減少する性質を示した。測定系の特性から考えても、Ross⁶⁾ (1955) や Bagnold⁵⁾ (1939) らの測定結果と比較してみても、この振動性の圧力変動は、砕波が壁に衝突して発生する波圧の一つの特性であることは間違いないように思われる。このような波圧の特性を説明するためにも、砕波が壁に衝突するときの実際の波の運動状況からみても、波圧発生の機構として air cushion

のモデル⁵⁾ がかなり有望なように思われる。ただし、このためには、砕波が壁に衝突するときの水の形状や運動を、高速度カメラその他により、より精密に解析すること、より現実的な air cushion のモデルを検討することなどが必要であろう。

圧力波形の空間的な性質については、ほぼ 2 次元的な波が壁に直角に來襲し砕波して衝突する場合には、 $p_{\max}/\rho g H_0 < 10$ 程度の波圧は多くの場合横方向にほぼ同様な時間的な変化を示す。しかし、 $p_{\max}/\rho g H_0 \geq 20$ 程度になると、空間的な変動が非常にはげしくて、ある点に強大な衝撃的波圧が作用しても少し離れた点では、波圧の強さ、圧力波形ともにかかなり異なる場合が多い。 $p_{\max}/\rho g H_0 \approx 10 \sim 20$ の間は圧力波形の空間構造に関する一種の過渡領域とみなし得るようである。このような衝撃的波圧の性質は、局部圧力と全波力との関係を明らかにするうえで一つの手掛りを与えるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) Hisashi Mitsuyasu: Experimental Study on Wave Force against a Wall, Report of Transportation Technical Research Institute, No. 47, 1962.
- 2) 永井莊七郎: 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 75 号別冊 (3-3), 昭和 34 年 12 月.
- 3) 林 泰三・服部昌太郎: 孤立波の砕波とその波圧について, 第 3 回海岸工学講演会講演集, 1956.
- 4) 光易 恒・長谷直樹・柴山煒彦: 壁体に作用する砕波の圧力に関する実験的研究, 運輸技術研究所報告, 8 卷 2 号, 1958.
- 5) R.A. Bagnold: Interim Report on Wave Pressure Research, Journal Inst. Civil Engr. Vol. 12, 1939.
- 6) C.W. Ross: Laboratory Study of Shock Pressures of Breaking Waves, Beach Erosion Board Tech. Memo., No. 59, 1955.

* Bagnold⁵⁾ (1939) の測定結果では、負圧 (大気圧に対して) が測定された場合がきわめて少ないがこれは計器の特性によるものと考えられる。