

港 湾 技 研 資 料



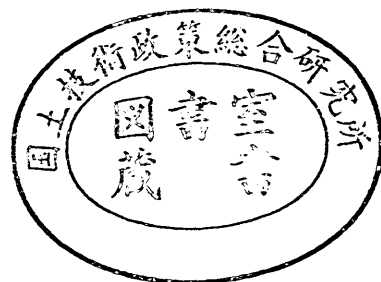
TECHNICAL NOTE OF
PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 32 June, 1967

- 衝撃碎波圧に関する一実験…………… 合田良実・原中祐人
- デジタル波高計の試作について…………… 原中祐人・鐘水幸雄
- 名古屋港における波浪観測…………… 川上善久・広本文泰
—容量型波高計の現地への適用— 阿部淑輝・須藤 茂
- 鉛直振動流型造波装置の設計と
その造波特性について…………… 広本文泰・阿部淑輝・
須藤 茂

昭和 42 年 6 月

運輸省港湾技術研究所



総 目 次

衝撃砕波圧に関する一実験	合田良実・原中祐人.....	1
デジタル波高計の試作について	原中祐人・鎌水幸雄.....	19
名古屋港における波浪観測	川上善久 広本文泰	55
—容量型波高計の現地への適用—	阿部淑輝 須藤 茂	
鉛直振動流型造波装置の設計とその造波特性について 広本文泰・阿部淑輝	83
 須藤 茂	

衝撃砕波圧に関する一実験

目 次

概 要	3
1. 序 論	3
2. 実 験 装 置	4
3. 実験結果および考察	5
3—1 実験波の選定	5
3—2 衝撃砕波圧の最大値とその波形	5
3—3 衝撃砕波圧の継続時間	6
3—4 衝撃圧力の伝播状況	8
3—5 空気圧縮説の検証	9
3—6 測定系の振動特性の影響	11
4. 結 論	12
参 考 文 献	12
付表および写真	13

AN EXPERIMENT ON THE SHOCK PRESSURE OF BREAKING WAVES

Yoshimi GODA*

Suketo HARANAKA**

Synopsis

A test has been made on the shock pressure of breaking waves against a vertical wall on a steep slope, investigating the time lag between the instant of peak pressure and that of water contact with a pressure transducer mounted on a vertical wall. The test revealed the existence of air in front of the pressure transducer at the instant of shock pressure for most cases. This supports the Bagnold's air compression theory for the shock pressure. With a pressure transducer of semiconductor strain gage type with the natural frequency of 6600 c/s, peak pressures of 60 to 1340 gr/cm² were recorded on an oscilloscope for waves of some 10 cm in height. The duration time of shock pressure ranging from 0.0012 to 0.02 seconds was inversely proportional to its peak value; the time integral of a shock pressure was confirmed to come within a certain range.

* Chief, Model Test Section, Hydraulics Division

**Senior Research Engineer, Hydraulics Division

衝撃砕波圧に関する一実験

合田良実*・原中祐人**

概 要

斜面上の直立壁に作用する衝撃砕波圧についてその発生機構を検討するため、壁面の波圧が最大となるのが、水面が波圧計に接触する前か後かを調べてみた。この結果、衝撃砕波圧の発生時には壁前面に空気層が存在することが明らかになり、衝撃砕波圧は *Bagnold* の唱えたような空気層の圧縮を伴うことが検証された。実験には固有振動数 6600 c/s の半導体ゲージ利用の波圧計とオシロスコープを組合せ、波高約 10cm の波に対して 60~1340 gr/cm² の衝撃砕波圧を測定した。また、衝撃圧力の継続時間はその最大値と反比例の関係にあり、圧力の時間積分値が一定範囲におさまることも確認された。

1. 序 論

直立壁に砕波が衝突する際に異常に高い圧力が生ずることは、Dieppe 港の現場観測 (*Rouville* ほか 1938) や *Bagnold* (1939) の実験によって広く知られている。またこれより先、広井博士 (1908) は小樽港の防波堤ケーソンに広井式波圧計を取りつけ、最大 49ton/m² の波圧を得ている。こうした衝撃砕波圧は、設計に用いられる重複波圧や広井公式による砕波圧よりも遙かに大きいので、衝撃砕波圧を設計に取り入れるべきかどうかは重大な問題である。このため、我が国においても各種の研究が行なわれてきたが、未だ定説がない状態である。

衝撃砕波圧の現象には分らない問題が数多くあるが、何よりも不明なのはその発生機構である。最大波圧強度を $p = \alpha w H$ の形に表すとき、 α の値は 200 以上 (広井公式では 1.5) にも達することがあり、定常噴流としてなどではとうてい説明できない大きさである。*Bagnold* はこれに対して、砕波の前面と直立壁との間に封じ込められた空気塊の断熱圧縮説を提唱し、そのご光易 (1966) は空気塊が圧縮振動をしながら上方に放出される機

構を考えた。

この空気圧縮説に対してもう一つ考えられる機構は、水の弾性圧縮である。すなわち、水力発電所送水管の水衝圧に似て、砕波の前面が壁に衝突して弾性圧縮を起し、 $p = \rho u C / g$ (C : 水中の音速、 u : 衝突速度) の圧力を生ずるのではないかと考え方である。

この2つの説の検証はそれほど難かしくない。すなわち、波圧の最大値が生ずるのが波圧計の水面接触の前か後かを調べれば良い。若し、波圧計に水がつくよりも前に波圧の最大値が発生するのであれば、これは空気の圧縮によるものでなければならず、逆ならば水の弾性圧縮による圧力と見るのが有力となる。今回の実験においては、この考え方に基いて2つの説の実験的検証を行なうのを第1の目的とした。

また第2の目的としては、測定計器の固有振動数を高めることによって、どの程度まで高い衝撃圧が測定され得るものかを調べようとした。この目的のためには、近年にいたって実用化された半導体ゲージを利用した波圧計が開発されており、これとオシロスコープを組み合わせると十分高い固有振動数の測定系で衝撃砕波圧を測定することにし

*水工部模型試験課長

**水工部主任研究官

た。

この実験は、砕波の波力公式などに直ちに結びつくものではなく、衝撃砕波圧の現象をまず十分に理解するために行なつたものである。しかし、波力公式への手がかりの一つの資料として、その結果をここに取りまとめた次第である。なお、これは昭和39年度において計画し、装置の製作を行なつたのであるが、種々の事情で昭和41年8月から11月にかけて実施したものであることを付記する。

2. 実験装置

実験は、港湾技術研究所内の平面水槽（30m×20m×1.0m）の中に設けた長さ12m、幅48cmの水路で行ない、この水路内に高さ50cm、長さ5.0mの10割勾配斜面をコンクリートで製作した。この水路の末端には、図-1に示すように厚さ25mmの厚鋼板とコンクリートで直立壁を作り、

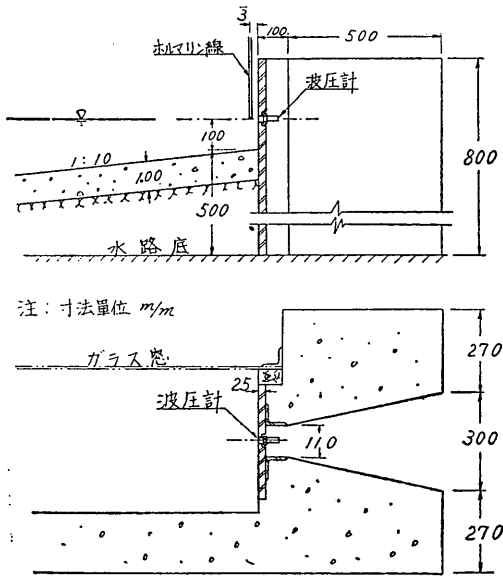


図-1 波圧計の取付状況

波圧計を取り付けた。この鋼板の固有振動数は10,700c/sと計算され、十分高いものであるから、波圧測定に対する鋼板の振動の影響はほとんどないと考えられる。

波圧計としては半導体ゲージを利用した下記の仕様のもの（共和電業製）を1箇、斜面上端から10cmの位置の直径25.4mmピッチ1.5mmのねじ穴にねじ込んで取り付けた。

受圧面直径：10mm
容量：1000gr/cm²
固有振動数：空中 9400c/s
：水中 6600c/s

ただし、鋼板加工上の不手際により波圧計の前面は鋼板の表面から0.5mmほど下っていたが、修正が難かしかつたのでこの状態のまま実験を行なつた。波圧計の検定には主として付属のチェック箱を用い、時々水中に沈めて検定値を確認した。

また比較の意味でUゲージ利用の容量500gr/cm²の波圧計（東洋測器製）も1箇使用した。取り付け状態は上記と同様である。この波圧計の受圧面直径は20mm、固有振動数は空中950c/s、水中550c/sである。

このほか衝撃圧力の水中伝播を捉える目的で、Uゲージ利用の容量100gr/cm²の波圧計（東洋測器製）3箇を、直立壁の基部から、50、100、および200cmの斜面上に受圧面を直立壁に向き合せた位置で設置した。

記録装置としては、測定系の応答特性を調べる意味で次の4種類を用いた。

- オシロスコープ（プリアンプリファイア搬送波周波数25KC、感度一様周波数範囲DC~6KC）
- 直記式オシログラフ（ガルバノメーター固有振動数1000c/s、感度一様周波数範囲DC~700c/s）
- 直記式オシログラフ（ガルバノメーター固有振動数500c/s、感度一様周波数範囲DC~350c/s）
- ペン書オシログラフ（ガルバノメーター固有振動数25c/s、感度一様周波数範囲DC~20c/s）

この実験の主眼である波圧計に水面が接触したかどうかの判定は、波圧計の中心から3mm前に直径1.6mmのホルマリン線の端部を切り捨てにした電極を置き、これが水と接触したときにパルス信号を出すようにした。図-2はその電気回路で、水との導通によってコンデンサーを放電させてパルスを発生させるものである。この回路は、デジタル波高計の接点回路用に試作したもので、接点信号の立ち上りは約20μsで応答が極めて速い。

また波高については、斜面の始点から50cm沖

鋭い立ち上りから振動なしに低い腰掛部圧力に続くもので、衝撃碎波圧の一般形として知られているものである。波高が小さな波に発生し易い。

B. 減衰振動型衝撃碎波圧

最初のピークのあと 50~500c/s 程度の減衰振動を繰り返してから腰掛部波圧に移るもので、A型よりも波高がやや大きい時に発生し易い。

C. ふたやま型衝撃碎波圧

減衰振動型の最初のピークが下りきらないうちに次の第2の山が始まるもので、ピークが2つある形である。波高がさらに大きくなったときに見られ、特に $T=2.0\text{sec}$ の波に多かった。

これらの波圧波形の撮影例を写真1~3(巻末)に示す。ただし、波圧のピークに比べて腰掛部波圧の値 (8 gr/cm^2 程度) が小さいため、腰掛部波圧はこれらの写真では明瞭でない。なお、Bの減衰振動型衝撃碎波圧は既往の諸実験においても認められており、特に光易 (1966) はこの減衰振動を空気塊の放出過程を考えて解析している。しかし、Cのふたやま型衝撃碎波圧については報告例がなく、今回の実験に特有なものかどうか不明である。衝撃碎波圧のピークの値は、付表1および次項の図5などに見られるように、 $60\sim 1340\text{ gr/cm}^2$ の範囲に広く散らばっている。このような最大波圧の分散性は、衝撃碎波圧の一つの特徴である。また、実験波を選定したときと、その後の本測定とにおいて波の再現性がやや不完全であったためか、最大の衝撃碎波圧を生ずる波高や波圧波形別の出現割合など付表1~3で若干の違いが見られる。

波の周期による差は明らかに認められ、 $T=2.5\text{sec}$ の波の方が平均値ならびに高極値とも大きな波圧を示している。これは、光易 (1961) が全波力の測定例で示した沖波々形勾配 H_0/L_0 の差によるものとも見られる。

次に今回観測された最大波圧 1340 gr/cm^2 の値について若干考察してみよう。*Bagnold* の空気断熱圧縮理論によれば、衝撃圧のピークの値は次式で与えられる。

$$p_{max} = 2.7 \frac{w}{g} U^2 \frac{K}{D} \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 p_{max} は大気圧を基準とした最大圧力、 U は碎波前面の前進速度、 K は衝突により運動量を失う水の部分の厚さ、 D は圧縮される空気層の初期厚さである。 K の値として *Bagnold* は $K=H/5$ を提唱したが、林 (1958) は *Denny* や *Ross* および自分の実験結果から $K=H/3$ を提唱している。従って推定碎波高 $H_B=12\text{cm}$ に対して $K=4\text{cm}$ とし、また U は *Iversen* (1951) の碎波指標から $U=1.5\text{m/sec}$ と算定して D を逆算すると、 $D=1.8\text{mm}$ の値が得られる。

一方、水の弾性圧縮による力は、水衝撃の公式により

$$p_{max} = \frac{w}{g} CU \dots\dots\dots(2)$$

で与えられる^(註)。ただし、 C は圧縮波 (音波) の伝播速度で約 1450m/sec である。 $U=1.5\text{m/sec}$ に対する水衝撃は 22kg/cm^2 であり、衝撃碎波圧の最大測定値はこの $1/16$ である。*Bagnold* の実験では波高 25cm の孤立波を使い、 $U=2.4\text{m/sec}$ で最大 5.6kg/cm^2 の衝撃碎波圧が観測されたが、この値は対応する水衝撃の $1/6$ である。また同じく *Bagnold* によれば、Dieppe 港での最大圧力は水衝撃としての値の $1/14$ とされている。このような点から見て、水面の弾性衝突による圧力は、観測される衝撃碎波圧の値よりも過大である。また水衝撃であるとしても衝突時には水面の前進速度が大幅に減速されていることが必要になり、圧縮空気などの存在を考えなければならない。

3-3 衝撃碎波圧の継続時間

写真1~2の波圧記録を調べると、波圧の最大値と第1波の継続時間はほぼ反比例しているように見える。そこで単発型と減衰振動型の衝撃波圧について第1波の継続時間 τ を図4のように

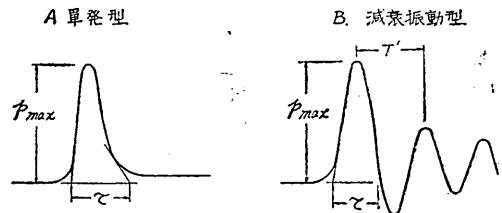


図-4 衝撃碎波圧の模式図

注) 管内の水衝撃に限らず、水が固体面と衝突して圧縮波を生ずるときの圧力はこの式で与えられる。

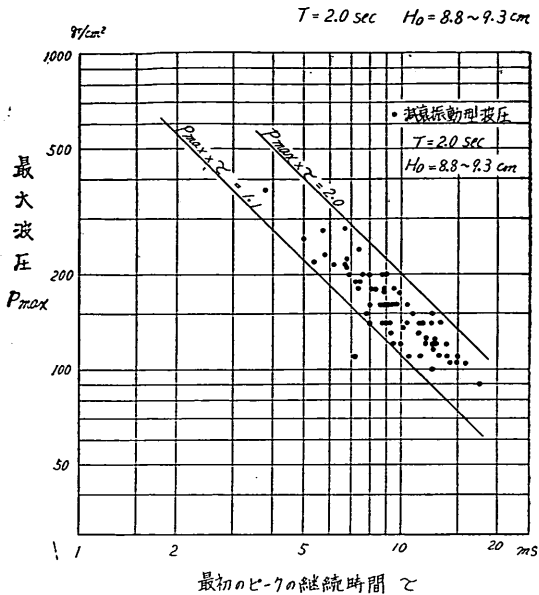


図-5 (a) 最大波圧とその継続時間 ($T=2.0\text{sec}$)

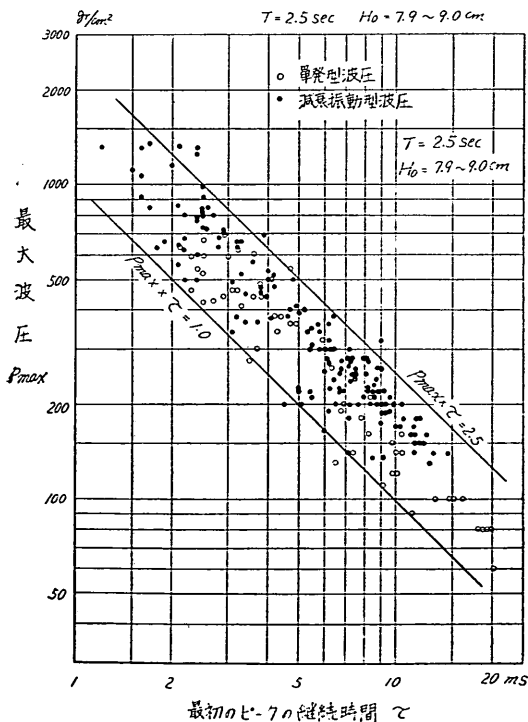


図-5 (b) 最大波圧とその継続時間 ($T=2.5\text{sec}$)

定義し、この τ と p_{max} との関係を図-5 (a), (b) にプロットした。この τ の定義は、衝撃砕波圧の始点および終点が不明瞭なのを避けるため便

宜的に定めたものである。また、ふたやま型衝撃砕波圧においては、第1波をどれにするかがあいまいなので整理の対象から外した。

図-5に見るように、衝撃砕波圧のピークの値 p_{max} は $60 \sim 1340 \text{ gr/cm}^2$ の範囲に広く分布し、またその継続時間も 1.2 ms から 20 ms まで広がっているけれども、その積 $p_{max} \times \tau$ の値は $0.66 \sim 3.12 \text{ gr} \cdot \text{sec/cm}^2$ の範囲におさまっている。この $p_{max} \times \tau$ の値は $T=2.5 \text{ sec}$ の波の方がやや大きく、また付表に見られるように波高の増大とともに大きくなる傾向も見られる。さらに単発型の衝撃砕波圧よりも減衰振動型の衝撃砕波圧の方が、やや大きな $p_{max} \times \tau$ の値を示すように見えるが、これは波圧波形の影響よりは波高の影響（波高の小さい波に単発型衝撃砕波圧が多い）と見られる。

次に減衰振動型の衝撃砕波圧における波圧の振動周期 T' は、最初のピークの継続時間 τ と密接な関係があり、図-6から分るように平均値では

$$T' = 1.54 \tau \dots\dots\dots (3)$$

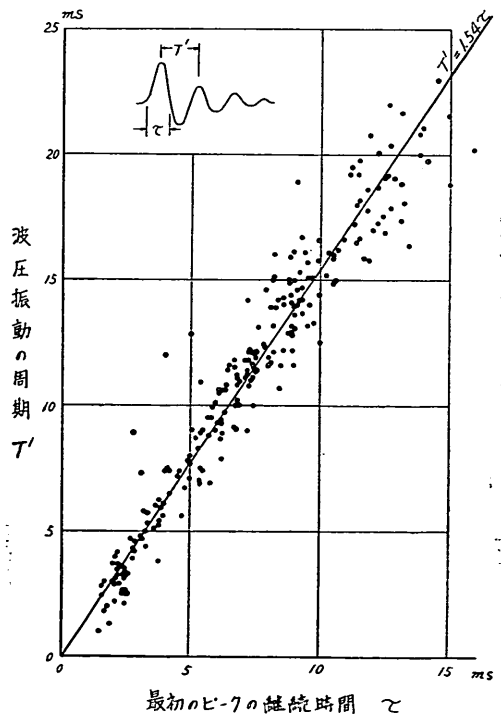


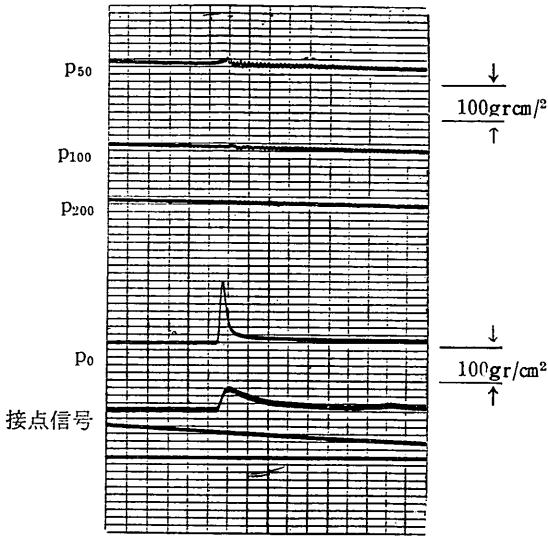
図-6 減衰振動型波圧の振動周期

また、波圧の減衰振動は3~10波、時間にして10

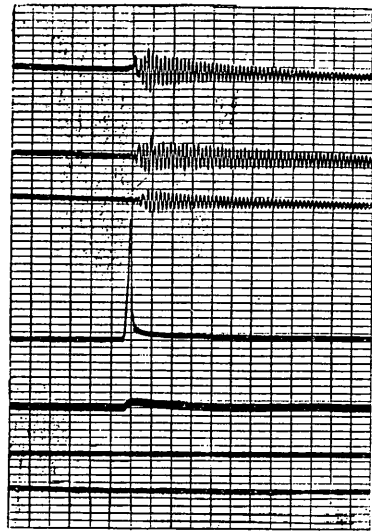
~100ms 程度継続する。この振動が減衰した後
に小さな衝撃^注が見られる例も時々あった。

3-4 衝撃圧力の伝播状況

図-7, 8 は直記式オシログラフの記録例で、
→ | | ← 0.01sec



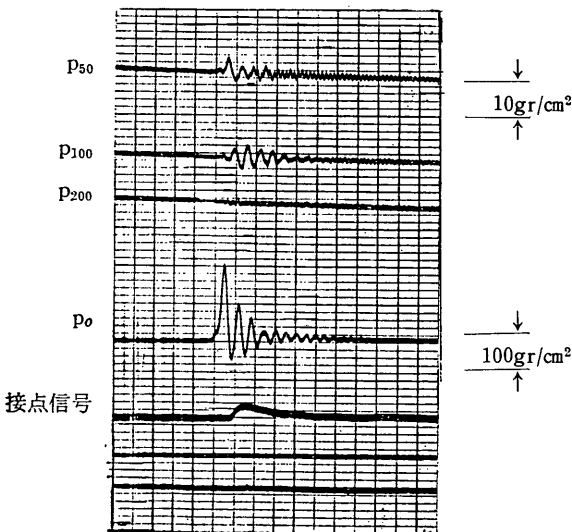
(a) $T=2.5\text{sec}$ $H_0=8.2\text{cm}$ $p_{0\text{max}}=160\text{gr/cm}^2$



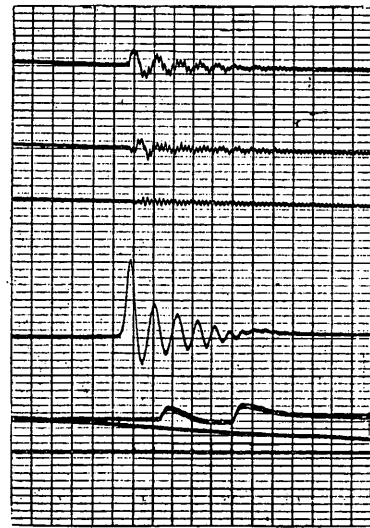
(b) $T=2.0\text{sec}$ $H_0=8.8\text{cm}$ $p_{0\text{max}}=320\text{gr/cm}^2$

図-7 単発型衝撃碎波圧の記録例

→ | | ← 0.01 sec



(a) $T=2.0\text{sec}$ $H_0=9.3\text{cm}$ $p_{0\text{max}}=200\text{gr/cm}^2$



(b) $T=2.5\text{sec}$ $H_0=9.1\text{cm}$ $p_{0\text{max}}=200\text{gr/cm}^2$

図-8 減衰振動型碎波圧の記録例

上の3本は直立壁から50, 100, および200cm
前方の水底における波圧で、第4番目が壁面の波
圧記録である。ただし、水底波圧は壁面の波圧の
10倍の感度で記録してある。この図で明らかなよ
うに、壁面で減衰振動型の衝撃波圧が発生すると

ときには、前面の水中でも同一周期の振動圧力が記
録され、壁面で単発型の衝撃波圧が発生するとき
には、この衝撃波圧の伝播によって波圧計の固有
振動が誘発される。いずれにしても、衝撃波圧の
伝播は明らかに認められる。

減衰振動型の衝撃碎波圧について、前方50およ
び100cmの点における圧力振幅を調べたのが図-

注) 後述のように壁面との間にはさみ込まれた空気
塊が次第に放出され、最後に水面が波圧計に接
触したときの衝撃と思われる。

9である。衝撃砕波圧の第1ピークの値は、50cm前方では壁面の1.5%、100cm前方では0.8%程度に減少する。また200cm前方では衝撃圧の伝播は認められるけれども、圧力振動の波形は全く消滅している。なお、図-8を注意すれば分かるように、壁面から100cm前方の波圧記録は、その振動周期が壁面の波圧とほぼ同一であるけれども、その位相が丁度逆になり、第1波はすべて谷から始まっている。しかも、この点の衝撃波圧の最大値は第2、3波目に生ずることが多い。このような振動波形の逆転が何故起るのかは不明である。図-9の p_{100} としては、第1波の谷の値を一応採用したものである。

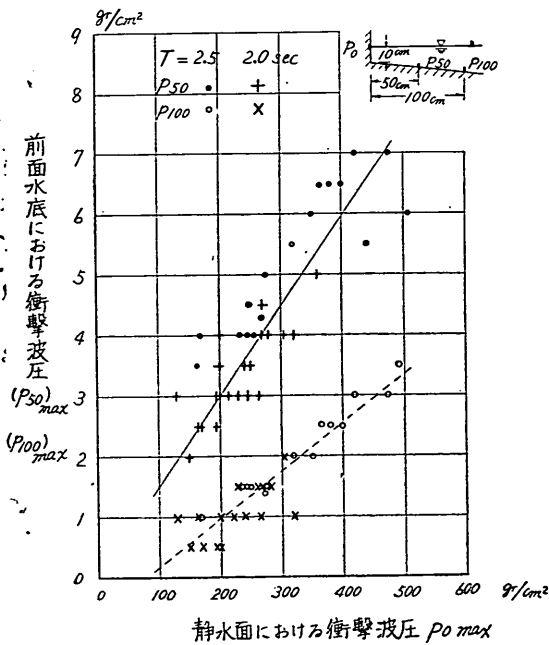


図-9 減衰振動型砕波圧の伝播状況

こうした衝撃圧の伝播時間については、壁面および水底の波圧のピークで1ms程度の時間差が見れた。しかし、水底に設置した波圧計の固有振動数(水中)が500c/sであり、水中の圧縮波の推定伝播時間0.3msを測定するには低く過ぎた。従って、伝播速度は $0.50\text{m} \div 0.001\text{sec} = 500\text{m/sec}$ 以上とししか言うことができない。

3-5 空気圧縮説の検証

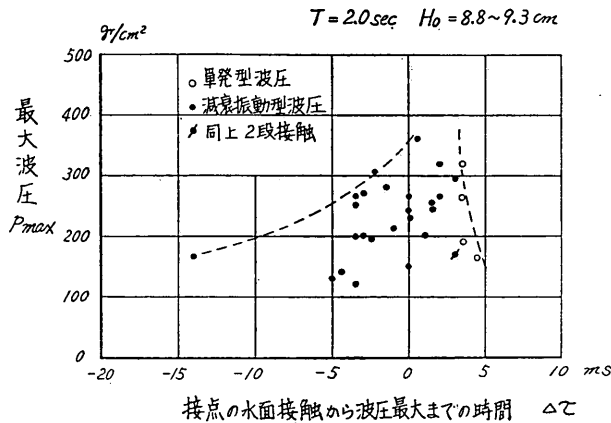
前項に示した図-8, 9の記録には、壁面の波

圧計の中心から3mm前に設けた電気接点の信号も入っている。この記録の立ち上りの時刻が、すなわち砕波の前面の水の壁が、波圧計の前方3mmの地点に達した時である。砕波の前面が波速そのままで進行すれば、この2ms後に波圧計に水面が衝突することになる。しかし、空気層がはさみ込まれて圧縮が起れば、水面の前進速度が低下するから、衝突はさらにあとになる。

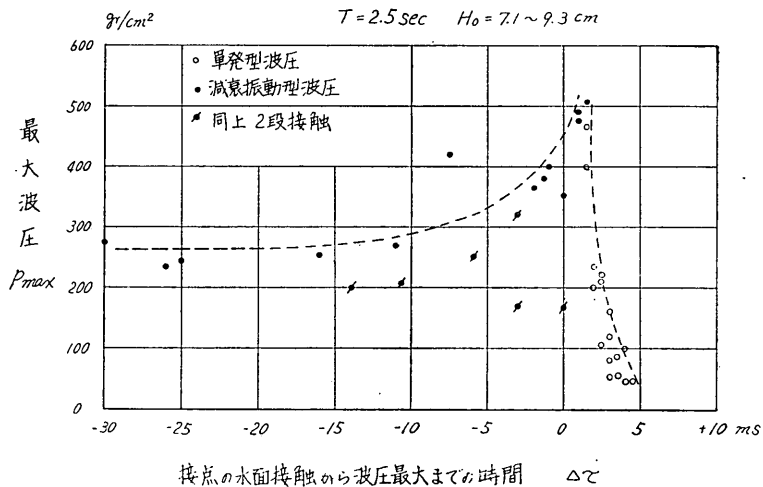
序論でも述べたように、若し壁面の波圧計が接点の接触の2ms後の時刻よりも前に最大波圧を示していれば、その時にはまだ水の壁が波圧計に到達していないのであり、その最大波圧は空気の圧縮を伴っているものと見なければならぬ。図-8はその1例で、(a)では接点の接触信号の3.5ms前、(b)では14msも前に最大波圧が生じており、空気層の圧縮を考えなくてはこのような現象を説明できない。一方図-7の単発型の衝撃砕波圧の例では、接点の水面接触から3ms後に波圧が最大となっており、これだけからは空気層の有無を判定することはできない。しかし波圧の立ち上りは接点の水面接触とほぼ同時刻に始まっており、少なくとも波圧上昇の前半においては空気層の圧縮を考えなければならぬ。

このような接点の水面接触と波圧最大の時刻の前後関係を調べたのが図-10(a),(b)である。これによると、減衰振動型の衝撃砕波圧では、その最大値は接点の水面接触の前に発生し、あるいはその後になったとしても1~3ms以上遅れることはない。また図-8(b)の例のように、接点が2回水面と接触(水面と離れる時にはパルスが発生しない)することがあり、このような場合2回目の水面接触はほぼ波圧の減衰振動が終る頃に起きていた。このような点から見て、減衰振動型の衝撃砕波圧は、砕波の前面と壁面との間に空気が封じ込まれた時に発生すると考えられる。

一方、単発型の衝撃砕波圧は、接点の水面接触の1~3ms後を境界にして減衰振動型の衝撃砕波圧とはっきりと分けられており、この境界線から離れるにつれて p_{max} の値が急速に減少している。Bagnoldの空気圧縮説によれば、式(1)に示されるように p_{max} は、はさみ込まれた空気層の初期厚さDに反比例する。一方砕波前面の前進速度



図—10 (a) 接点の水面接触時刻と最大波圧 ($T=2.0\text{sec}$)



図—10 (b) 接点の水面接触時刻と最大波圧 ($T=2.5\text{sec}$)

は、空気層が厚いほど減速の度合いが強い。従って、上記の p_{max} と Δt の傾向は、Bagnold の説を定性的に裏付けるものといえる。この単発型の衝撃碎波圧は、図—10の結果などから見て空気層の封じ込みが不十分、あるいは上方に口を開いたまま空気層の圧縮が起る時に発生するのではないかと思われる。

なお、接点の位置を波圧計中心の 4mm 前に移した例では、接点が数回水面との接触を記録することが多く、この前後で空気層と水塊との境界面が振動しているのではないかと想像された。

以上のように、衝撃碎波圧の発生は主として碎波前面と直立壁との間にはさみ込まれた空気層の

圧縮によるものであることが検証されたのであるが、ここで衝撃碎波圧の力積について若干考察を加えてみよう。Bagnold の理論においては、直接に衝撃圧を生ぜしめるものは空気層の圧縮であるけれども、その空気層の圧縮の原動力は水塊の前進運動量である。有効厚さ K の水塊の運動量 ρUK (ただし $\rho = w/g$: 水の密度) がどれだけの時間をかけて消滅させられるかによって、衝撃碎波圧の最大値が規制されるのである。従って、運動量の法則によって、波圧の時間積分値は ρUK に等しくなければならない。すなわち、

$$\int p dt = \rho UK \dots\dots\dots (4)$$

今回の実験では、次に述べる理由により波圧の時間積分値を特に計算はしなかった。しかし、3—3で求めた最初のピークの継続時間と最大波圧との積 $p_{max} \times \tau$ の値を約0.6倍^{注1)}すれば、波圧の時間積分値となる。付表—1に記載のとおり、 $p_{max} \times \tau$ は 0.7~3.0 gr·sec/cm² であり、平均で 1.6gr·sec/cm² である。U=1.5m/sec としてKの値を求めると、K=2.7~12cm, 平均で6.3cm となる。この値は、既往の諸実験の結果と比べて6割程度大きく出ている。これは、波圧計の取付面が僅かながら凹んでいたため、圧縮された空気塊がこのくぼみに逃げ込み、いくらか強い圧力を生じる結果になったものではないかと思われる。これが正しいとすれば、これは逆に空気塊の圧縮が衝撃砕波圧の発生の主役となっていることを示すものといえよう。

図—5に示すように、強い衝撃砕波圧が発生する場合には、そのはさみ込む空気層の厚さによってそのピークの値が著しく変動する。従って、このようなピークの値に対して波圧公式を導いても、構造物設計の立場からはどの値を採用すべきか判断に苦しむことになる。一方、式(4)の波圧の時間積分値、あるいは直立壁全体に働く砕波の力積は波の特性に応じたほぼ一定の値になることが知られている。従って、この全力積一定の条件の下で、ケーソンの滑動などに対する有効波力の大きさを考えていけば、より現実的な波力公式を導けるのではないかと考えられる。

3—6 測定系の振動特性の影響

一般に知られているように、衝撃圧の測定では測定系(ピックアップ+増幅器+記録器)の応答特性について十分考慮しておかなければならない。振動現象に対する応答の問題は、定常振動に対する強制振動の共振曲線から論じられることが多い。しかし、衝撃砕波圧の場合は第1波に対する応答が問題なので、その特性は共振曲線の与えるもの

注1) 最初のピークの波形は、写真1~2に見るように三角パルスと正弦波パルスの中間である。三角パルスならば $\int p dt / p_{max} \cdot \tau = 0.5$ であり、正弦波パルスなら $2/\pi = 0.637$ である。

注2) この結果は、別に港研資料(1967年7月)として発表の予定である。

とは異なる。いろいろな形の衝撃荷重に対する1自由度振動系の応答を計算した結果^{注2)}によれば、ほぼ次のような性質がある。

- i) 衝撃圧の作用時間 τ が振動系の固有周期 T_n よりかなり短かければ、その最大値は衝撃圧の力積を T_n で割った値に比例する。振動系の減衰が小さければ、上記の最大値にはほぼ等しい振幅の残留振動を伴う。
- ii) 衝撃圧が矩形パルスのように瞬間的に立ち上る波形のときは、 τ が T_n より十分長くても応答波形の最大値は衝撃圧のピーク値の2倍となり、一般に強い残留振動を伴う。
- iii) 衝撃圧の立ち上り時間が有限の場合は、 τ が T_n よりも十分長ければ、応答波形は衝撃圧の波形にほぼ等しくなる。残留振動の振幅は、 τ/T_n が大きいほど、また振動系の減衰が大きいほど小さくなる。
- iv) τ と T_n が同程度の大きさのときは、応答波形の最大値が衝撃圧のピーク値の1.5~1.8倍になる可能性がある。ただし振動系の減衰定数が適当($\beta \approx 0.7$)であれば、 $\tau \approx T_n$ でもかなり良好な応答が得られる。

今回の実験では2. で述べたように、波圧計を2種、記録器を4通りに変えて測定を行なったので、その結果をとりまとめたのが付表1~5である。付表1~4は半導体ゲージ型波圧計を用いた波高別の測定結果で、付表—5はUゲージ型波圧計の結果も含めピーク波圧について総括したものである。

これらの結果を比べてみると、まずペン書オシログラフ(付表—4, 5—IV)による測定波圧のピークの値が著しく低く、しかも測定値の変動が小さいことが目につく。これは、ガルバノメーターの固有周期0.04secに比べて、今回実験した衝撃砕波圧の継続時間が $\tau = 0.001 \sim 0.02 \text{sec}$ と短かいためで、i) で述べた力積応答領域に入っている。波圧の記録波形はすべて同形の減衰振動で、第1波の継続時間はほとんど0.03secであり、3—2で述べた衝撃砕波圧の波形型の差は全く見られない。

さらに、付表—1~3で直記式オシログラフとオシロスコープによる値を比べて見ると $T = 2.5$

sec の波では直記式オシログラフによる測定値の方がオシロスコープによる値よりも低く出ているが、 $T=2.0\text{sec}$ の波ではほぼ同程度である。前にも述べたように衝撃砕波圧の現象は非常に偶然性が強いので、波の調整が難かしく、また測定回数も相当多くないと信頼性のある比較ができない。この意味で今回の測定は必ずしも十分なものではなかった。

次に、固有振動数の低いUゲージ型波圧計による測定結果は、付表—5 (V~VII) のようにピーク波圧の平均値は半導体ゲージ型波圧計による値よりもやや大き目である。これは、波圧計自身の減衰定数が非常に小さいため、前述のiv) 項の影響が出たためではないかと思われる。このUゲージ型波圧計による衝撃砕波圧の測定波形(オシロスコープによる)は、写真—4にその数例を示すように波圧計の固有振動が誘発されているのが特徴で、このような記録から衝撃圧の原波形を再現するのは困難である。

このような波圧計の固有振動は、衝撃砕波圧の立ち上り時間が極めて短かいために誘発されるもので、測定記録の解析のためにはできるだけこれを除くことが必要である。波圧計自身の減衰定数を大きくできれば理想的であるが、これは機構上むずかしい。次善の策としては、電気的なフィルターを付属させるか、あるいは記録器のガルバノメーターの方で減衰を効かせるのが良い。この場合、ガルバノメーターの固有振動数を波圧計の固有振動数の1/2程度に選ぶのが良いようである。

いずれにせよ、衝撃砕波圧の現象は図—5のようにそのピーク値および作用時間が広範囲に分布するので、波圧計および記録器の所要振動特性を一義的に示すことはむずかしい。ピーク値が100 wH 以上の衝撃砕波圧を測定するには、今回使用したような計器が必要である。しかし、10~20 wH 程度の砕波圧が対象であれば、Uゲージ型波圧計とオシログラフの組み合わせでも十分と思われる。

4. 結 論

以上に述べた実験の結果から、衝撃砕波圧に関

して次のようなことが言えるものと思われる。

- 1) 直立壁に砕波が衝突して衝撃砕波圧を発生するときは、砕波前面と直立壁との間の空気層の圧縮を伴うものと見られる。
- 2) 空気層のはさみ込みが不十分なときは単発型の衝撃波圧、十分に封じ込められたときは減衰振動型の衝撃波圧が発生する。
- 3) 衝撃砕波圧のピークの値とその継続時間は、ほぼ反比例する。すなわち、波圧の時間積分値はほぼ一定である。

なお、本実験の計画および取りまとめは合田が行ない、計測は原中が担当した。

参 考 文 献

- Bagnold, R. A. 1939 : Interim Report on Wave-Pressure Research, *Journal of the Institute of Civil Engineers*, Vol. 12, p. 202—226.
- 林泰造・服部昌太郎・林憲吉 1958 : 砕波の波圧と力積, 第5回海岸工学講演会講演集, p. 21-27.
- 広井勇 1908 : 小樽築港工事報文(前編), 北海道庁,
- Iversen, H. W. 1952 : Laboratory Study of Breakers, *Gravity Waves*, U. S. Dept. of Commerce, *National Bureau of Standards, Circular*, 521, p.9~32.
- Mitsuyasu, H. 1962 : Experimental Study on Wave Force against a Wall, *Report of Transportation Technical Research Institute*, No. 47, 39pp.
- Mitsuyasu, H. 1966 : Shock Pressure of Breaking Waves, *Proc. of the Tenth Conf. on Coastal Eng., Tokyo*.
- Rouville, A. de, Besson, P., et Pétry, P. 1938 : Etat Actuel des Etudes Internationales sur les Efforts dus aux Lames, *Ann. Ponts et Chaussées*, Vol. 108 (II),
- (昭和42年4月5日受付)

付表一 オシロスコープによる測定結果 (半導体型波圧計)

T (sec)	H ₀ (cm)	測定回数	波形別出現回数			ρ _{max} (gr/cm ²)			ρ _{max} × τ (gr·sec/cm ²)		
			A	B	C	最大	平均	最小	最大	平均	最小
2.5	7.8	57	26	31	0	1340	464	60	3.12	1.55	0.78
	8.1	79	26	52	1	980	381	90	3.08	1.66	0.96
	8.5	52	7	45	0	1140	385	80	2.69	1.81	1.23
	8.9	49	2	45	2	800	292	130	2.40	1.80	0.90
2.0	8.2	35	0	33	2	330	197	110	1.85	1.47	0.66
	8.5	36	0	24	12	380	142	105	1.73	1.42	1.12
	8.7	42	0	19	23	305	133	90	1.68	1.46	1.14

付表二 直記式オシログラフ(1000c/s) による測定結果 (半導体型波圧計)

T (sec)	H ₀ (cm)	測定回数	波形別出現回数			ρ _{max} (gr/cm ²)			ρ _{max} × τ (gr·sec/cm ²)		
			A	B	C	最大	平均	最小	最大	平均	最小
2.5	7.8	15	3	12	0	595	328	205	1.81	1.57	1.19
	8.1	10	0	10	0	565	318	200	2.10	1.77	1.50
	8.5	10	0	10	0	480	265	200	1.88	1.75	1.69
	8.9	10	0	10	0	305	224	160	1.95	1.80	1.60
2.0	8.2	10	0	10	0	230	176	140	1.54	1.41	1.19
	8.5	10	0	10	0	180	133	110	1.50	1.27	1.20
	8.7	10	0	3	7	130	103	85	1.38	1.13	0.77

付表三 直記式オシログラフ(500c/s) による測定結果 (半導体型波圧計)

T (sec)	H ₀ (cm)	測定回数	波形別出現回数			ρ _{max} (gr/cm ²)			ρ _{max} × τ (gr·sec/cm ²)		
			A	B	C	最大	平均	最小	最大	平均	最小
2.5	7.8	6	5	1	0	350	231	95	1.58	1.32	1.06
	8.1	10	5	5	0	505	367	120	1.60	1.23	0.96
	8.5	5	0	5	0	420	324	245	1.53	1.45	1.33
	8.9	10	2	8	0	520	234	100	1.53	1.41	1.10
2.0	8.2	14	8	6	0	360	204	82	1.46	1.26	0.97
	8.5	10	0	10	0	320	237	140	1.37	1.16	1.00
	8.7	10	0	10	0	270	211	130	1.33	1.18	0.91

付表-4 ペン書オシログラフによる測定結果 (半導体型波圧計)

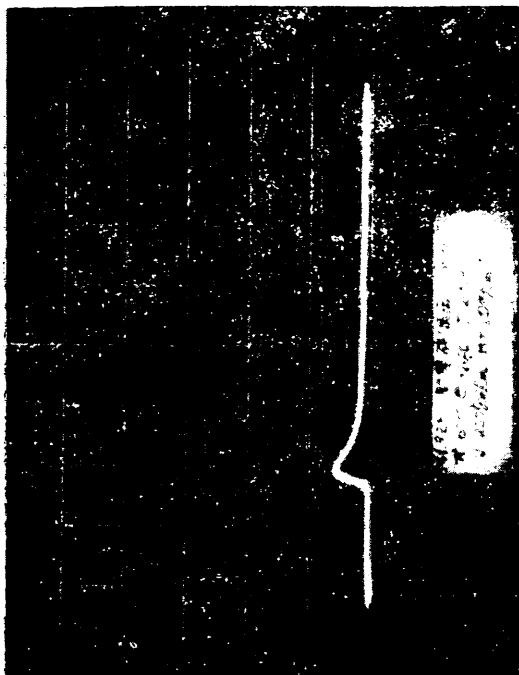
T (sec)	H ₀ (cm)	測定回数	p _{max} (gr/cm ²)			p _{max} × τ (gr·sec/cm ²)		
			最大	平均	最小	最大	平均	最小
2.5	7.8	10	57	52	43	1.7	1.6	1.4
	8.1	10	61	57	53	1.8	1.7	1.4
	8.5	10	73	59	52	2.0	1.8	1.5
	8.9	10	66	62	55	2.0	1.8	1.6
2.0	8.2	10	59	56	51	1.8	1.7	1.4
	8.5	10	62	53	48	1.8	1.6	1.4
	8.7	10	62	51	44	1.8	1.5	1.3

付表-5 測定計器の組合せによるピーク波圧測定値の変化

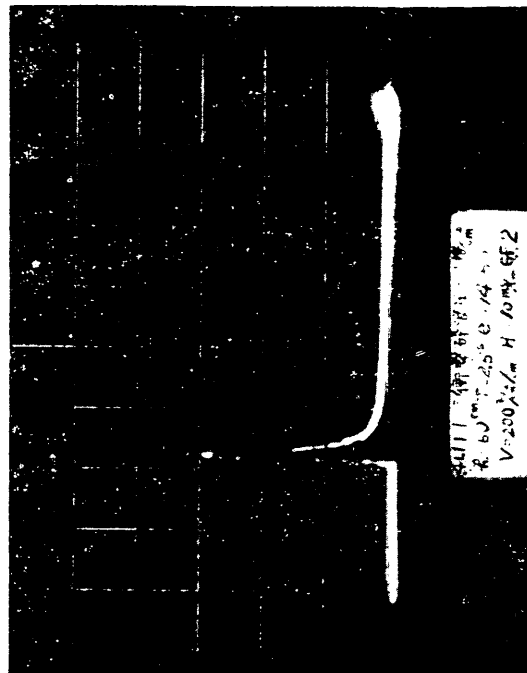
番 号	測定系の固有振動数 波圧計 記録器注)	T=2.0sec			T=2.5sec				
		測定回数	p _{max} (gr/cm ²)		測定回数	p _{max} gr/cm ²			
			最大	平均	最小		最大	平均	最小
I	6,600c/s 約10,000c/s	113	380	156	90	237	1,340	383	60
II	" 1,000	30	230	137	85	45	595	289	160
III	" 500	34	360	216	82	31	520	291	95
IV	" 25	30	62	53	44	40	73	58	43
V	550 約10,000	112	570	245	80	70	940	412	105
VI	" 1,000	30	300	181	100	45	800	337	160
VII	" 500	46	300	210	132	62	808	343	130

注) オシロスコープについては、プリアンプリフィアの感度一様周波数範囲が DC~6 KC であるので、ガルバノメーターの特性との比較から類推した。また直記式とペン書のオシログラフの場合、使用した増幅器の感度一様周波数範囲が DC~1000c/s なので、これよりも低いガルバノメーターの固有振動数を代表値とした。

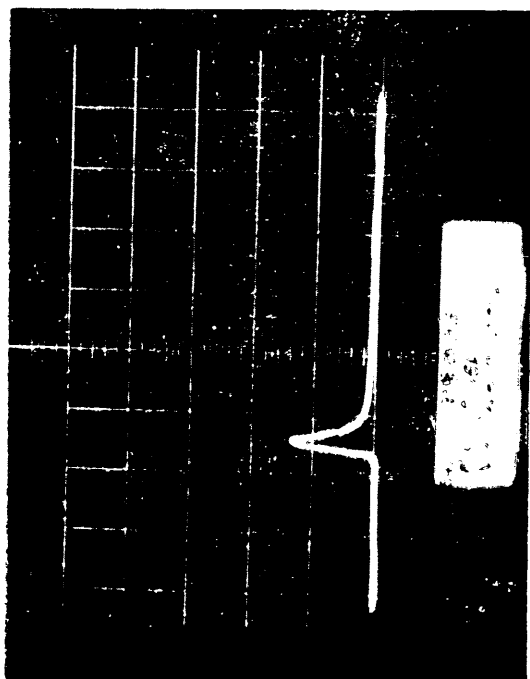
写真一 1 単発型衝撃碎波圧の例 (時間軸は a ~ c が格子間10ms, d は 5 ms)



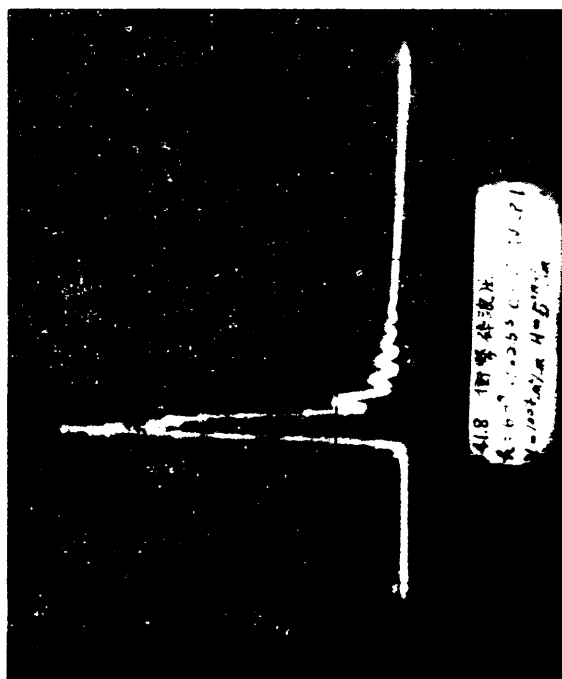
(a) $T=2.5\text{sec}$ $H_0=7.9\text{cm}$ $p_{max}=120\text{gr/cm}^2$



(c) $T=2.5\text{sec}$ $H_0=8.2\text{cm}$ $p_{max}=670\text{gr/cm}^2$

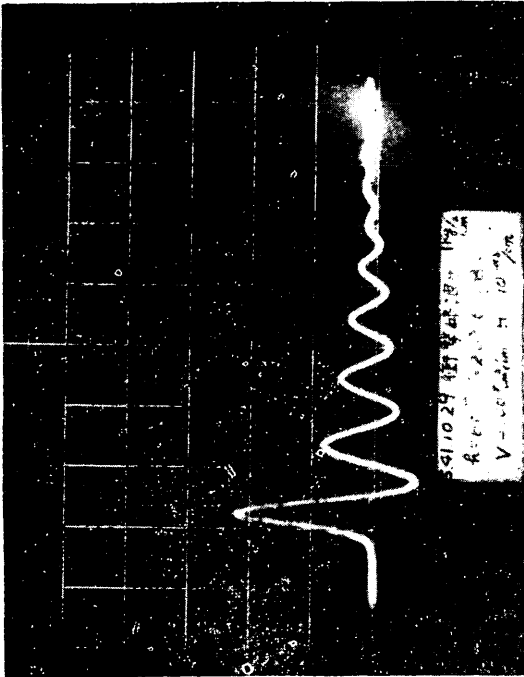


(b) $T=2.5\text{sec}$ $H_0=8.6\text{cm}$ $p_{max}=280\text{gr/cm}^2$

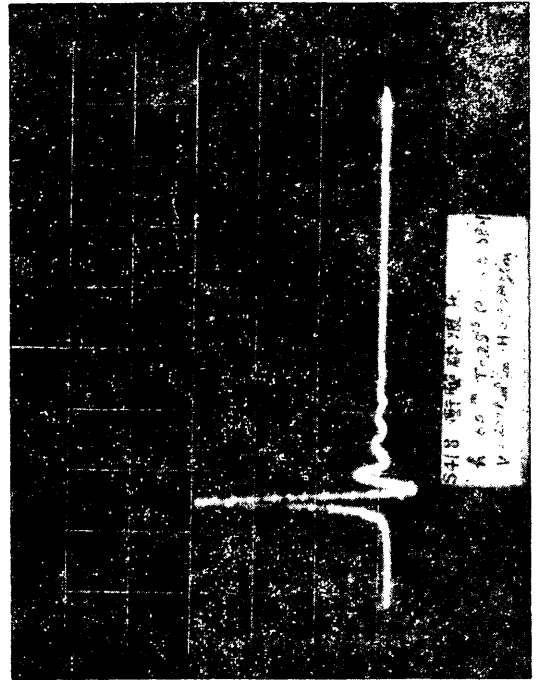


(d) $T=2.5\text{sec}$ $H_0=8.2\text{cm}$ $p_{max}=520\text{gr/cm}^2$
(縦・横軸とも倍率が他と異なる)

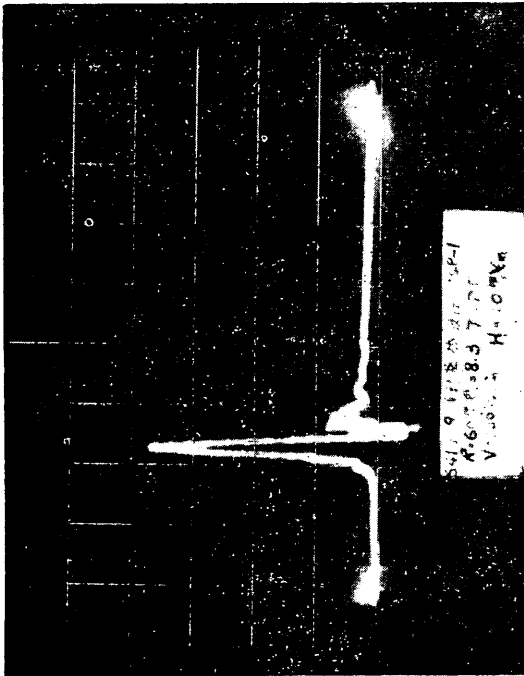
写真—2 減衰振動型衝撃碎波圧の例 (時間軸は格子間10ms)



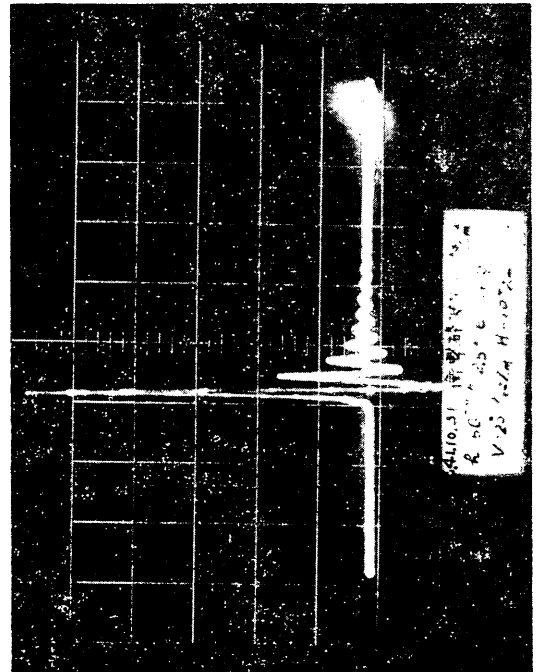
(a) $T=2.0\text{sec}$ $H_0=8.8\text{cm}$ $p_{max}=225\text{gr/cm}^2$



(c) $T=2.5\text{sec}$ $H_0=9.0\text{cm}$ $p_{max}=620\text{gr/cm}^2$

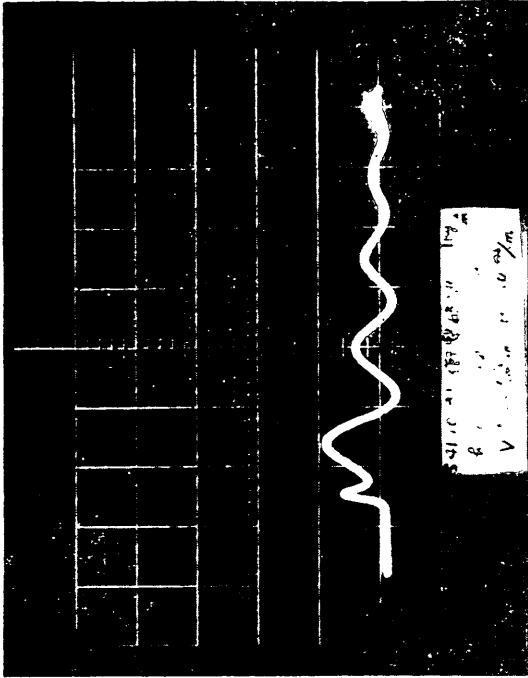


(b) $T=2.0\text{sec}$ $H_0=9.1\text{cm}$ $p_{max}=370\text{gr/cm}^2$
(後続の波圧振動が不規則な例)

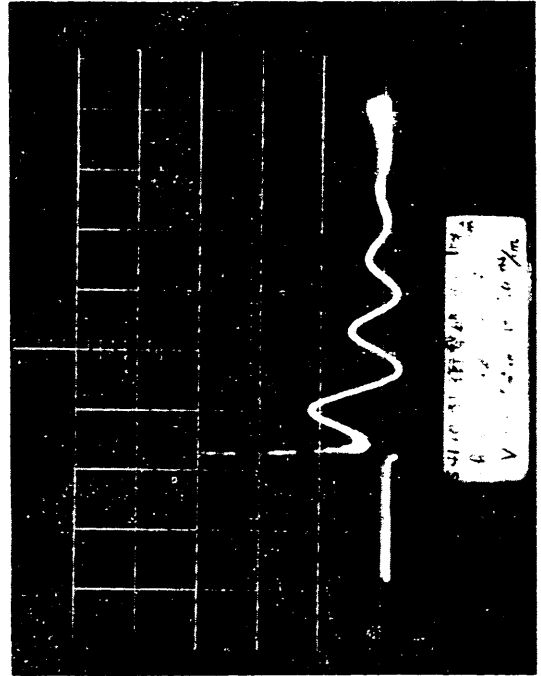


(d) $T=2.0\text{sec}$ $H_0=7.9\text{cm}$ $p_{max}=1140\text{gr/cm}^2$

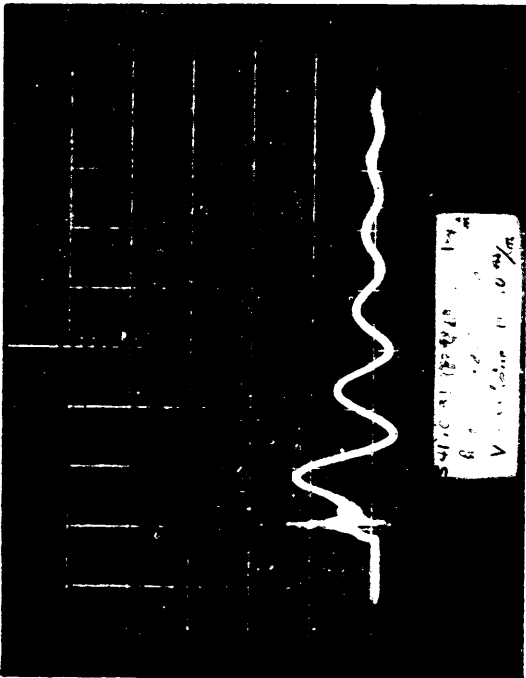
写真—3 ふたやま型衝撃碎波圧の例 (時間軸は格子間10ms)



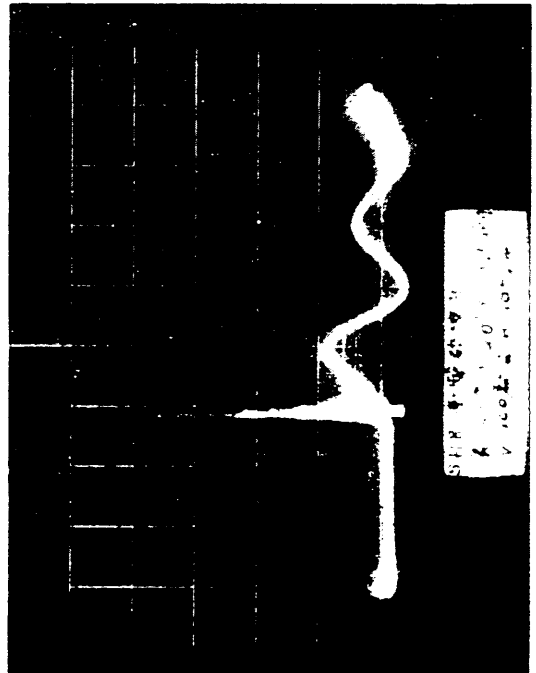
(a) $T=2.0\text{sec}$ $H_0=9.3\text{cm}$ $p_{max}=105\text{gr/cm}^2$



(c) $T=2.0\text{sec}$ $H_0=9.3\text{cm}$ $p_{max}=305\text{gr/cm}^2$
(立ち上りが非常に鋭い)

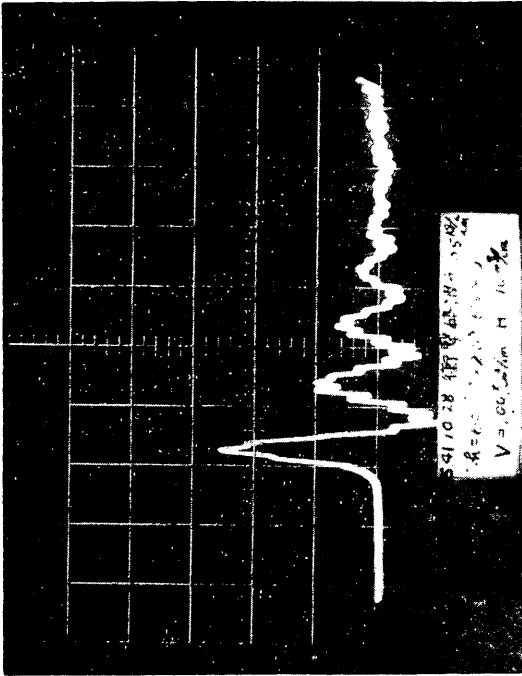


(b) $T=2.0\text{sec}$ $H_0=9.3\text{cm}$ $p_{max}=145\text{gr/cm}^2$
(やや不規則な例)

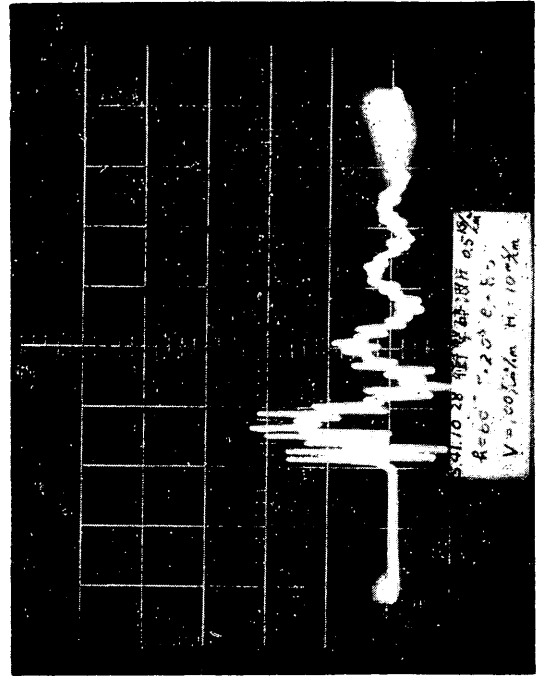


(d) $T=2.0\text{sec}$ $H_0=9.1\text{cm}$ $p_{max}=380\text{gr/cm}^2$

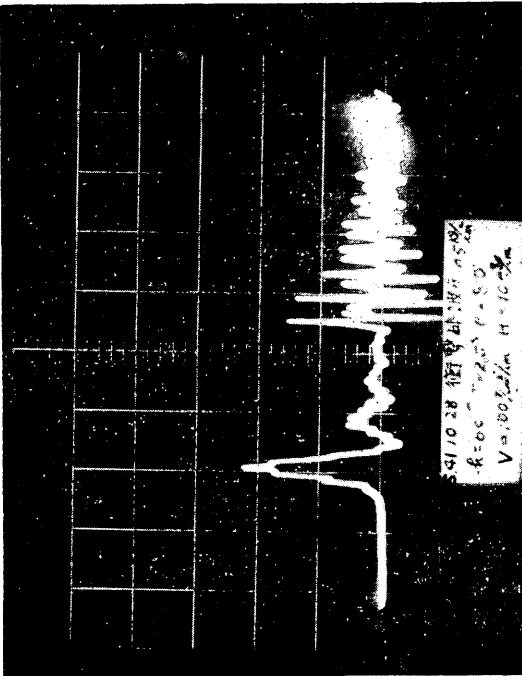
写真—4 固有振動数の低い波圧計による記録例 (時間軸の格子間10ms)



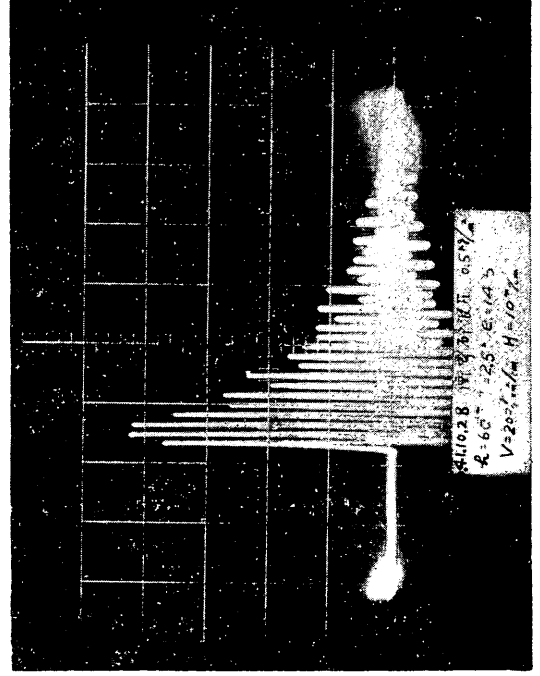
(a) $T=2.0\text{sec}$ $H_0=8.8\text{cm}$ $p_{max}=245\text{gr/cm}^2$
(減衰振動型があまり歪まずに記録されている)



(c) $T=2.0\text{sec}$ $H_0=9.3\text{cm}$ $p_{max}=240\text{gr/cm}^2$
(ふたやま型の衝撃波圧と思われる)



(b) $T=2.0\text{sec}$ $H_0=8.8\text{cm}$ $p_{max}=230\text{gr/cm}^2$
(減衰振動の終了後に別の衝撃が作用している)



(d) $T=2.5\text{sec}$ $H_0=8.2\text{cm}$ $p_{max}=860\text{gr/cm}^2$
(単発型の衝撃波圧と思われる)