

水中せん孔爆破に伴う水中圧力波 (第2報)

——自由面爆破の基礎実験——

小川 輝繁*, 福山 郁生*, 伊藤 一郎**

一自由面爆破に伴う水中圧力波についてモルタルブロックを使った水槽実験によって検討した結果、この圧力波は2種類の波動の合成されたものであることが明らかとなった。その1つは爆破により生じたきれつなどを通り、また破壊された岩塊の漏斗孔からの突出に伴って爆発生成ガスが水中に噴出することによって発生するものであり、他の1つは地盤中を伝播してきた弾性波動が水中へ透過することによって生ずる圧力波である。本論文では前者をガス圧力波、後者を地盤-水圧力波と名づけ、それぞれの波動について検討を加えた。その結果、自由面に垂直な方向へ伝播する圧力波はガス圧力波が卓越しており、この方向となす角度が大きくなるにつれてガス圧力波は小さくなり、地盤-水圧力波が卓越するようになることが明らかとなった。

1. 緒言

水中爆破においても一自由面爆破では漏斗孔が生ずるので、この部分の岩盤は破壊されて弾性体でなくなる。さらに、漏斗孔から爆発生成ガスや破壊された岩塊が噴出する。これらが前報¹⁾が検討した無自由面爆破の場合とは異なる点である。そのため、漏斗孔の生成が圧力波に与える影響について検討する必要がある。今回は水槽内に設置したモルタルブロックを使って一自由面爆破の模型実験を行い、圧力波の特性について検討したので報告する。

2. 実験方法

Table 1 に示す2種類のモルタルブロックを使用した。A モルタルブロックは前報¹⁾の実験のものと同じであり、無自由面爆破の場合との比較のデータを得る目的に供した。B モルタルブロックは一自由面爆破の実験用につくったものである。一自由面爆破では抵抗線長が短いので厚さを薄くすることができ、その分だけ直径が大きくしてある。なお、B ブロックの密度は 2.0g/cm^3 、弾性縦波速度は実測によると 2700m/S 、弾性横波速度 1850m/S である。

モルタルブロックの上面から垂直下向きに孔径 22mm の装薬孔をせん孔し、この中にテトリルペレット (薬量 10g 、密度 1.5g/cm^3) を装填し、急結モルタルで填塞した。

一自由面爆破によって生ずる水中圧力波は、地盤中を伝播してきた弾性波が水中へ透過して生ずるものと、爆発生成ガスや破壊された岩塊が漏斗孔より噴出する時に生成したものが合成されたものと考えられる。本論文では、前者を地盤-水圧力波、後者をガス圧力波と呼び、この両者に分けて検討することにする。地盤-水圧力波を抑制した圧力波を得るためには Fig. 1 に示すようなモルタルブロックを使用した。このブロックでは地盤-水圧力波は発泡スチロールによってさえぎられるが、ガス圧力波は、その伝播経路と考えられる部分には発泡スチロールがないので抑制さ

Table 1 Mortar block

| | Mixing proportion W:C:S* | Height (m) | Diameter (m) |
|----------------|-----------------------------|---------------|-----------------|
| A Mortar block | 1:2:4 | 0.8 | 1.3 |
| B Mortar block | 1:3:6 | 0.4 | 2.0 |

* W: Water, C: Cement, S: Sand

Table 2 Properties of polystyrene

| | |
|----------------------|---|
| Density | 0.0175g/cm^3 |
| Compressive strength | 30kg/cm^2 |
| Young's modulus | 11.0kg/cm^2 |
| Specific heat | $0.27\text{kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$ |

昭和52年5月6日受理

*横浜国立大学工学部安全工学科 甲233 横浜市区南大岡2-31-1

**京都大学工学部資源工学科 宇606 京都市左京区吉田本町

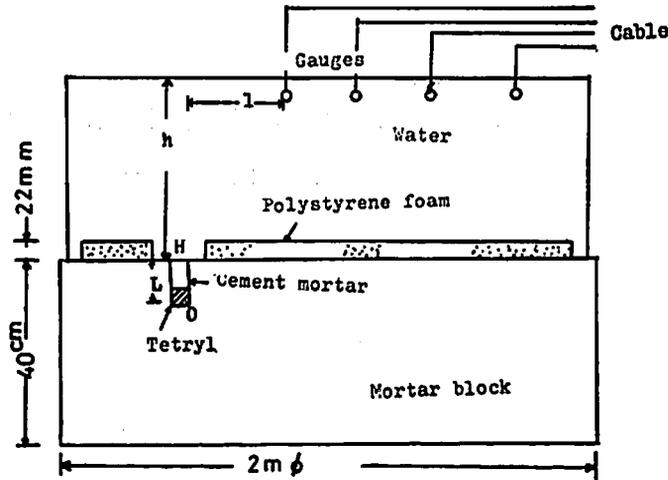


Fig. 1 Schema for "gas pressure wave" observation

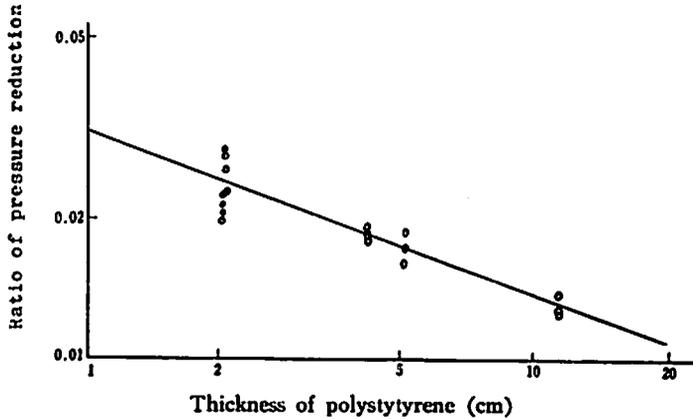


Fig. 2 Pressure-attenuating characteristic of polystyrene foam

れないで伝播する。Table 2 には使用した発泡スチロールの物性を示した。Fig. 2 は発泡スチロールの圧力軽減率を示したもので、10g のテトリルを水中爆発させ、爆源と発泡スチロールの距離を 1 m とし、発泡スチロール前後において圧力を測定して得た結果である。この結果から明らかなように、発泡スチロールは水中圧力波の軽減効果がきわめて良好な材料である。さらに、地盤一水圧力波を抑制しない場合の圧力波も測定した。

圧力はモルタルブロック上部の水中に配置した電気石ゲージによって受感して電気信号に変換し、これをトランジェントレコーダに記憶した後、X-Y レコーダにより再生した。

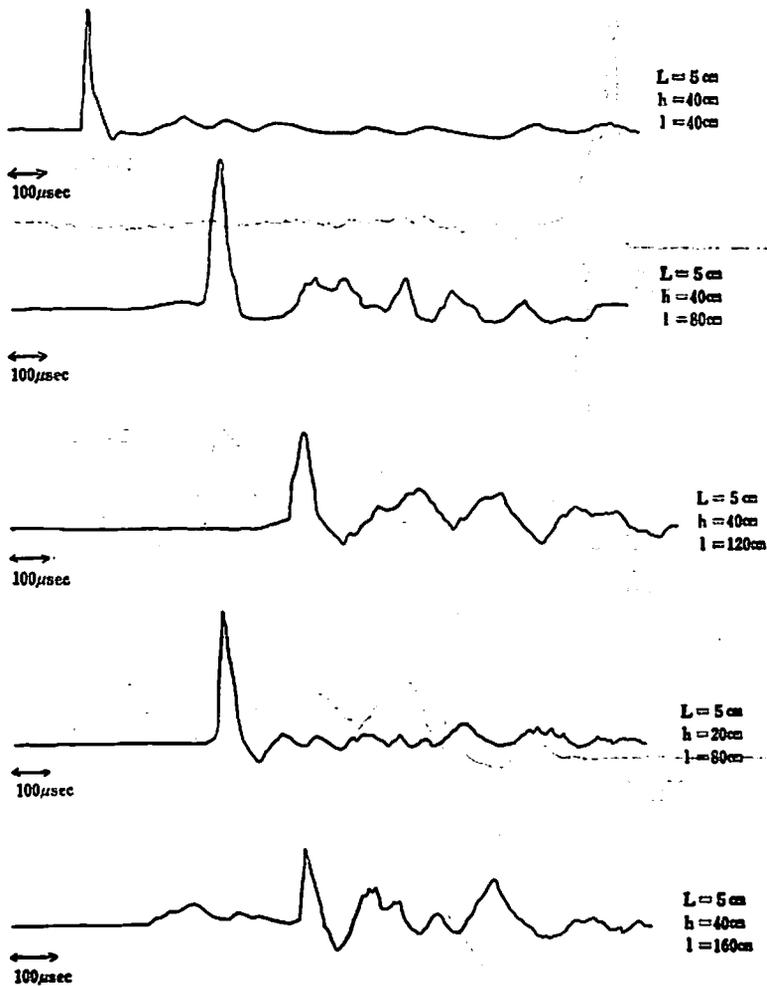
なお、本論文において爆源や測点の位置を説明するために用いた記号は、Fig. 1 に示すとおりである。すなわち、爆源を O、装薬孔の入口を H とし、最小

抵抗線長 \overline{OH} を L、爆源から測点までの水平距離を l、測点からモルタル表面までの垂直距離を h で表わす。

3. 実験結果および考察

3-1 観測された圧力波の種類

地盤一水圧力波を抑制して得られた圧力波形の例を Fig. 3 に、抑制しない場合の圧力波形例を Fig. 4 に示す。波は急激な立ち上りもったパルス状の圧力波（図において○印で示したもの）と振動状の圧力波が合成されたものである。Fig. 4 の (b), (c) では振動状の波の振幅はパルス状の波の振幅に比べてやや小さい程度であるが、Fig. 3 の (d) の波形では振動状の波の振幅はパルス状の波の振幅に比べてはるかに小さい。これより、地盤一水圧力波を抑制した実験では振動状の圧力波が抑制されていることがわかる。そのため、振動状の圧力波は地盤一水圧力波であり、パルス状の圧力



L: Length of path of the least resistance
 h: Distance from the surface of mortar block
 l: Horizontal distance from explosion source

Fig. 3 Wave-forms observed in tests in which polystyrene foam is used

波はガス圧力波と考えられる。この点をさらに明確にするために、波動の伝播時間について検討した。Fig. 5は、爆薬に巻いたトリガー線が切断してからパルス状の圧力波を受感するまでの時間 t_{0V} と H 点から測点までの斜距離との関係を示したものである。図の直線の勾配は 1480m/S であり、これは水中の音波の伝播速度と一致している。一方、観測された圧力波の初動部分は、モルタル中の弾性縦波が水中へ透過して生じた波動であると仮定して、トリガー線が切れてから波動が境界面に達するまでの時間 t_{RM} と波動のモルタル内の伝播時間 R_M との関係を求め、その結果を Fig. 6 に示した。なお、 t_{RM} は次式によって求めた。

$$t_{RM} = t_r - \frac{R_{IV}}{C} \quad (1)$$

ここで、 t_r : トリガー線が切断してから圧力波の初動部を受感するまでの時間
 R_{IV} : 波動の水中部分の伝播距離
 C : 水中の音速

Fig. 6 は B モルタルブロックによる実験結果を示したものであるが、図の直線勾配は 2700m/S となり、これは B モルタルブロック弾性縦波の伝播速度と一致する。これらの結果より、圧力波の初動はモルタル中を伝播してきた弾性縦波が水中へ透過して生じたものであり、パルス状の圧力波はガス圧力波であると言える。

3-2 ガス圧力波の波形的特徴

爆源直上方向に伝播する波動はパルス状であるが、この場合の立ち上がり時間 T_r と最小抵抗線長 L およ

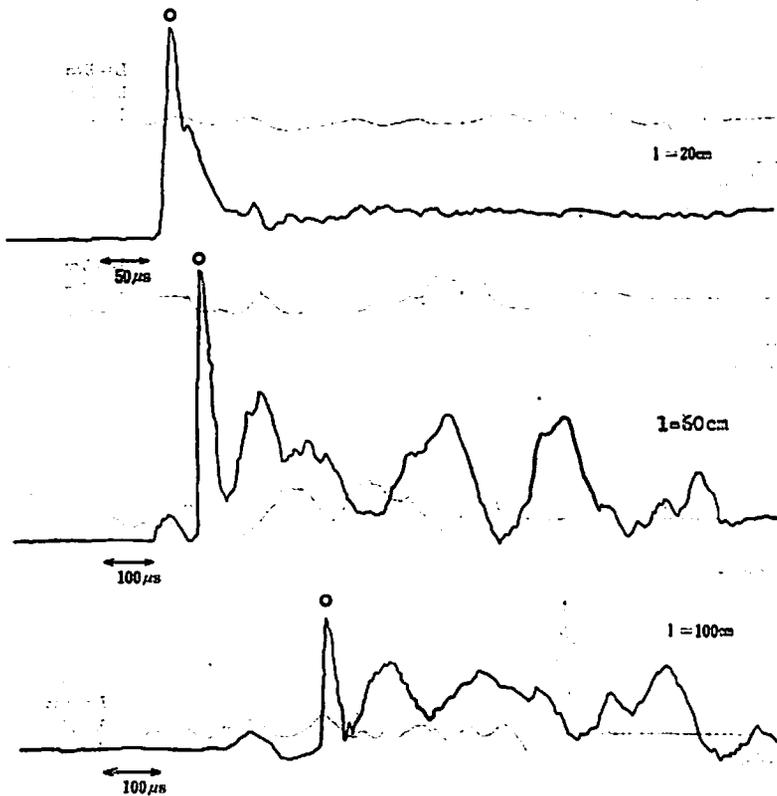
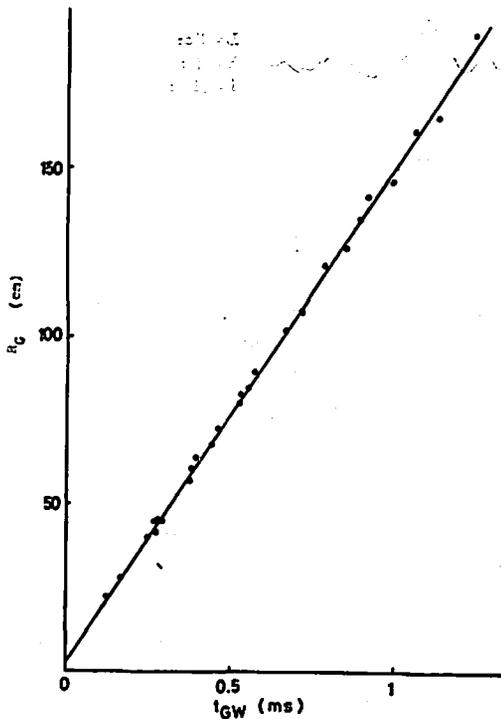


Fig. 4 Wave-forms observed in tests in which polystyrene foams are not used ($L=5\text{cm}$, $h=20\text{cm}$)



R_G : Distance from H point

Fig. 5 Relation between t_{GW} and R_G ($L=5\text{cm}$)

びモルタル面から測点までの距離 h との関係を図 7 に示した。漏斗孔の生ずる場合も無自由面爆破での圧力波と同様、波動の立ち上がり時間 T_1 は L が小さくなる程、また h が大きくなる程短くなっている。また、爆源直上方向での圧力波のパルス幅は L , h に関係なくほぼ一定で、その大きさは無自由面爆破の場合とほぼ同程度である。

3-3 ガス圧力波と地盤-水圧力波の圧力値の比較

一自由面爆破では漏斗孔の部分は破壊されるので、ここでは弾性理論は成り立たない。そのため、弾斗孔直上方向へ伝播する圧力波はガス圧力波が卓越するものと考えられる。Fig. 8 は、A モルタルブロックの実験で得られた爆源直上方向 ($l=0$) の測点における圧力最高値 P_s と L との関係を示したものである。図中の実線は前報¹⁾で述べた無自由面爆破実験での関係を示したもので、点線はこれを外挿したものである。○印および×印でプロットした値は一自由面爆破の実測値である(△印については後述する)。また、Fig. 9 は 6 号電気雷管を爆源に用いて同様の実験を行って求めた P_s と L との関係を示したものである。これより、爆源直上方向に伝播する波動については、ガス圧力波の圧力最高値は地盤-水圧力波について得

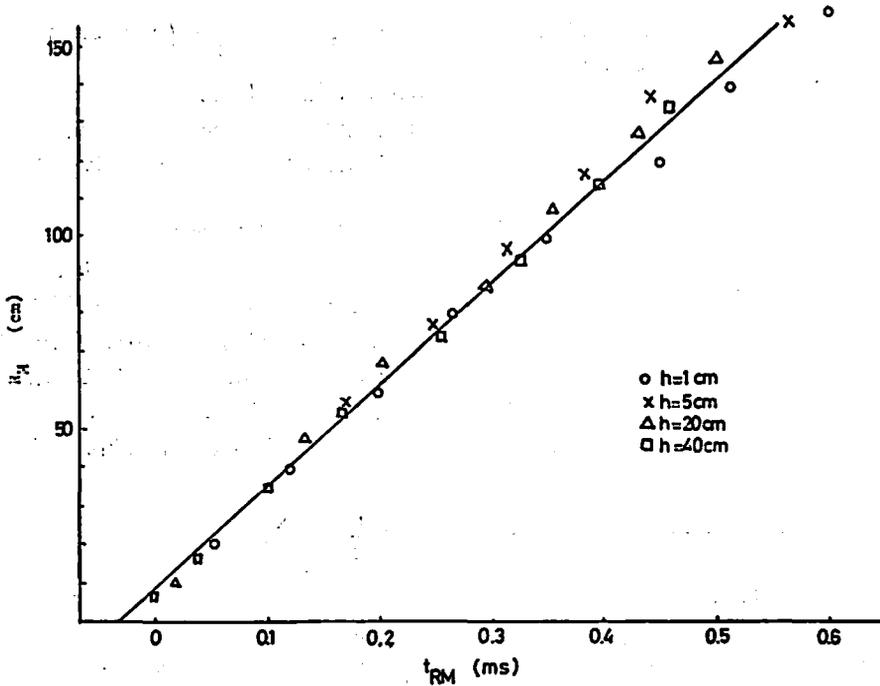


Fig. 6 Relation between t_{RM} and R_M ($L=5\text{cm}$)

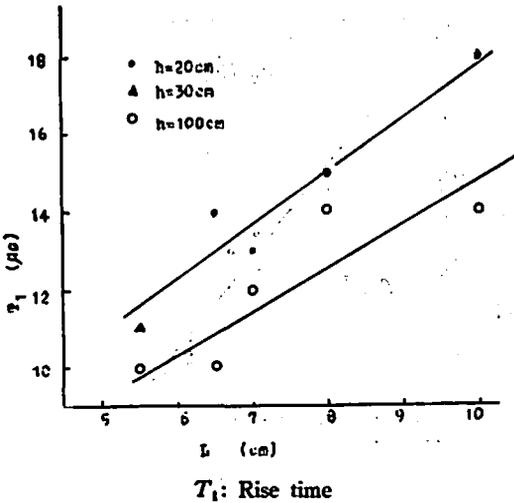


Fig. 7 Relation between T_1 and L

られた結果を外挿して求められる値よりやや小さいことがわかる。また、この外挿線と実測値との差は L が小さい程あるいは h が大きい程大きい傾向が見られる。そこで、 $\alpha=0^\circ$, $h=0$ でのこの両者の差を調べた。A モルタルブロックの実験によって得られた $h=20\text{cm}$ ($L=5.5\text{cm}$ については 30cm) および 100cm の圧力最高値を前報¹⁾の(4)又は(5)式に代入して、ガス圧力波の $\alpha=0^\circ$ 方向への距離減衰指数 ($\gamma=\gamma_\phi=\gamma_\theta$) を求め、この値を次式に代入して、 $\alpha=0^\circ$, $h=0$ での

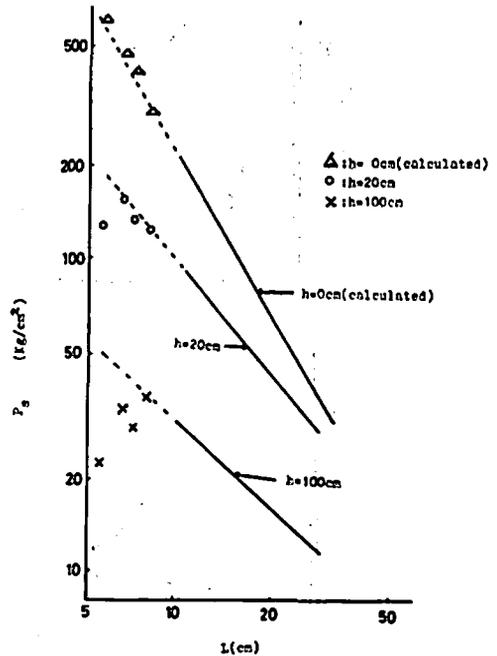


Fig. 8 Observed peak pressure P_0 v. s. L
(source: Tetryl 10g)

ガス圧力波の圧力最高値 (P_0) _{$\alpha=0^\circ$} を求めて Fig. 8 に Δ 印で示した。

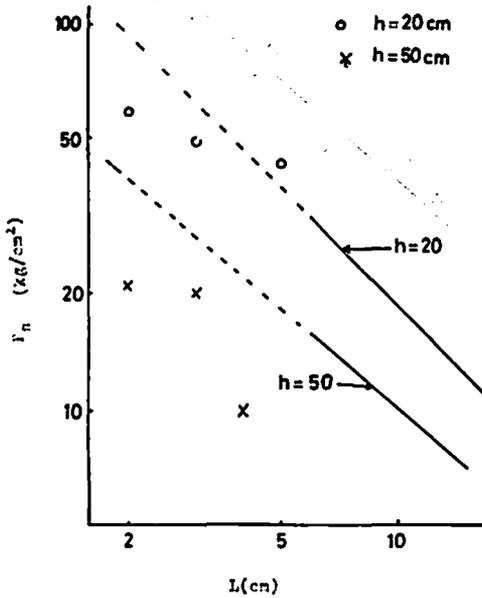


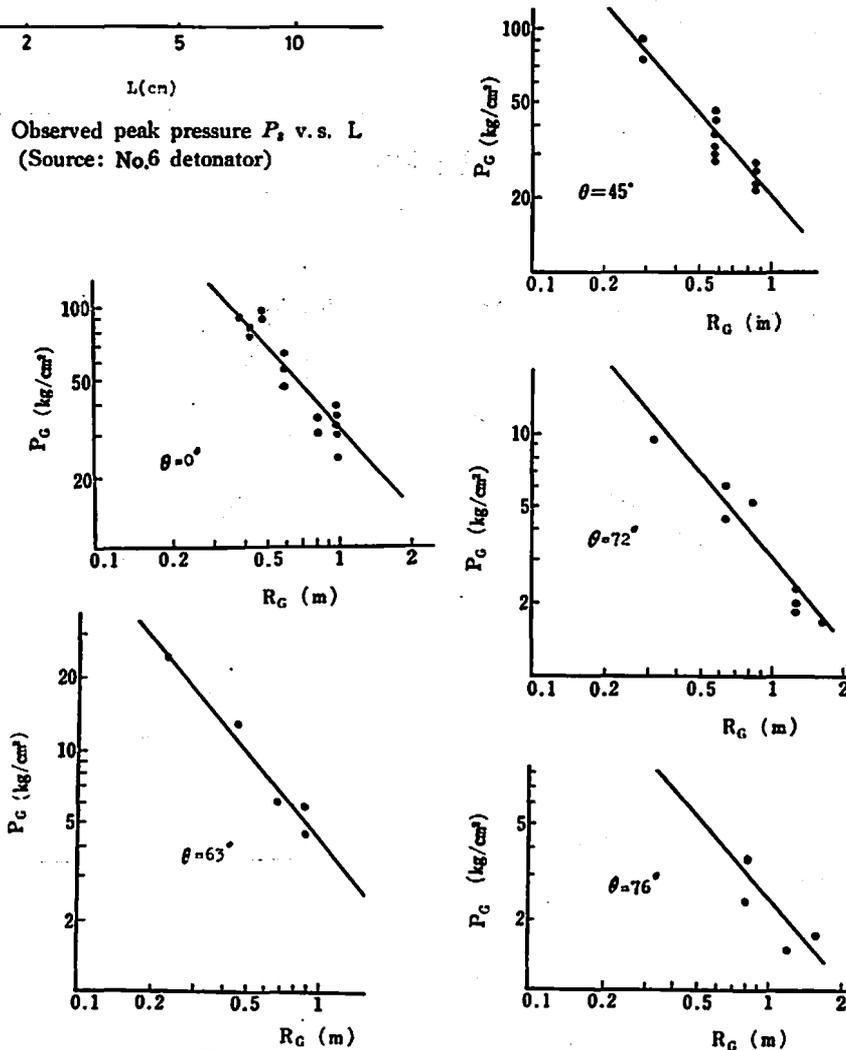
Fig. 9 Observed peak pressure P_n v. s. L
(Source: No.6 detonator)

$$(P_O)_{\theta=0} = (P_O)_{\theta=0} \times \left(\frac{(RW_t)_{\theta=0}}{(R_O)_{\theta=0}} \right)^r \quad (2)$$

これより、爆源直上方向の $h=0$ でのガス圧力波の圧力最高値は地盤一水圧力波について得られた結果を外挿して得られる値とよく一致していることがわかる。

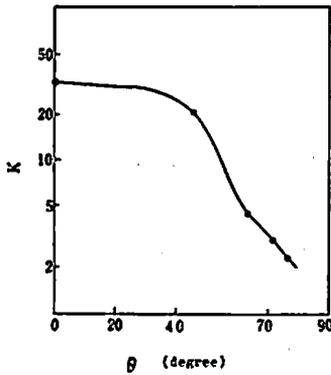
3-4 ガス圧力波の伝播特性

ガス圧力波の伝播特性をさらに詳しく検討するために、地盤一水圧力波を抑制した実験の測定結果について解析した。Fig.10は、 H 点から各測点までの斜距離 R_O とガス圧力波の圧力最高値 P_O との関係、伝播方向毎に図示したものである。なお、この場合の方向は、 O と H を結ぶ直線と伝播方向とのなす角度 θ



P_O : Maximum of gas pressure wave

Fig. 10 Relation between P_O and R_O



K: Constant for $P_0 = K \cdot R_0^{-1.13}$

Fig. 11 Relation between K and θ

で表わした。

ガス圧力波が H を中心とした球面波であると仮定すると、 P_0 は次式によって与えられる。

$$P_0 = KR_0^{-1.13} \quad (3)$$

ただし、 K は常数である。

そこで、Fig.10 に示した P_0 および R_0 の測定値を(2)式に代入して K の値を計算し、方向角毎に K の平均値を求めた。さらに、これを(3)式の K の値に代入すると、それぞれの方向毎に次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= 32R_0^{-1.13} & (\theta = 0^\circ) \\ P_0 &= 20R_0^{-1.13} & (\theta = 45^\circ) \\ P_0 &= 4.6R_0^{-1.13} & (\theta = 63^\circ) \\ P_0 &= 3.1R_0^{-1.13} & (\theta = 72^\circ) \\ P_0 &= 2.4R_0^{-1.13} & (\theta = 76^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Fig.10 に示した直線は(4)式の関係を表わしたものである。これより実測で求めた P_0 と R_0 との関係はほぼ(4)式を満足することがわかる。(4)式では R_0 の指数を一定としているので、係数 K の値を比較することにより、伝播方向によるガス圧力波の大きさの差異を検討することができる。そこで、方向角 θ と係数 K との関係を図示すると、Fig.11 が得られる。Fig.11 から明らかなように、ガス圧力波の圧力最高値には方向

性があり、方向角が大きくなるにつれて、圧力最高値は小さくなることがわかる。

3-5 考察のまとめ

一自由面爆破に伴なう水中圧力波は、地盤一水圧力波とガス圧力波が重畳したものである。地盤一水圧力波は地盤と水との境界面での地盤の弾性振動が水中へ伝播したものであり、ガス圧力波は爆源により生じたきれつなどを通り、また破壊された岩塊の突出に伴う生成ガスが水中へ噴出することにより生成するものである。前者については、前報¹⁾において無自由面爆破の場合を対象として弾性理論あるいは音響理論を用いて検討し、その伝播特性を明らかにしたが、今回得られた結果もそれらと矛盾しなかった。また、この圧力波の波形の特徴は $1/h$ が小さい領域では前報の測定結果に示されているようにパルス波形であるが、Fig. 4 で明らかなように、 $1/h$ が大きくなると振動波形となる。一方、ガス圧力波の圧力波形は、Fig. 3 に示されているように比較的急峻な立ち上りをもったパルス波形である。ガス圧力波は方向性をもっており、方向角 θ が大きくなるにつれて、圧力値は小さくなる。そのため、Fig. 4 の圧力波で見られるように、 θ が数10度以下の時はガス圧力波が卓越しているが、 θ が大きくなると、ガス圧力波が小さくなるので地盤一水圧力波が卓越するようになる。

4. 結 言

一自由面爆破に伴なう水中圧力波は地盤一水圧力波の合成されたものであることを明らかにし、ガス圧力波の伝播特性について検討した。

本研究は財団法人総合安全工学研究所水中発破の安全性の検討委員会の指導を受けて行ったものであり、助言を頂いた委員各位に感謝する。また、協力して頂いた本州四国連絡橋公団の関係者に謝意を表す。

文 献

- 1) 小川輝繁, 福山郁生, 伊藤一郎: 工業火薬, 38, p.144 (1977)

A Study on Pressure Waves Caused by Underwater Borehole Blasting(2) — Pressure waves Caused by Crater Blasting —

by Terushige Ogawa*, Ikuo Fukuyama* and Ichiro Ito**

The underwater pressure waves caused by crater blasting have been studied by

carrying out model tests of mortar blocks. This underwater pressure wave is a composite wave of the following two types:

- (1) A wave caused by the gushing-out of explosion gas through cracks of mortar or rocks (Gas pressure wave)
- (2) A wave transmitted from an elastic wave in mortar or ground (Ground-water wave)

The generation and propagation of ground-water waves are in accordance with the acoustic theory. The larger the angle(θ) between the propagating direction and the line passing through the blasting point and perpendicular to the surface of the mortar or the ground is, the smaller the magnitude of the gas pressure wave is.

Consequently, in the direction of $\theta=0$, the gas pressure wave is predominant, but with the increase of θ , the weight of the gas pressure wave in the underwater pressure wave becomes smaller.

(*Faculty of Engineering, Yokohama National University, 2-31-1 Ooka, Minami-ku, Yokohama, Japan.

**Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto, Japan.)

ニュース

トンネル工事の火薬類保安対策費

—2年間で61% 割高

5団体合同安全公害対策本部火薬類対策部会の調査によると、トンネル工事における火薬類の保安対策費は、請負金額の約2%に相当し、2年間で61%も割高になっていた。これは昨年4月、会員各社が施工中のトンネル工事現場79ヶ所を抽出調査した結果判明したもので、今後この調査資料をもとに国鉄など関係官公庁に実情を説明し、工事発注事の積算基礎資料として考慮してほしい旨陳情することになっている。

トンネル工事にとまらぬ火薬1kg当りの保安対策費は49年末の調査では418円であったが、昨年4月の調査では673円と、わずか2年間で61%も増高になっていることが判明。火薬1kgの値段が670円といわれるから、火薬代金と同じ額の火薬類管理保安対策費を支出していることになる。

これは48年の火取法施行規則の改正、49年10月の

内閣通達「火薬類に対する対策強化」および51年1月の人的側面に重点をおいた第二次省令改正によって、管理保安が一段と厳しくなったため。特にプしい増高原因は人件費で1kg当たりの管理保安対策費中前回は62%、今回は82%に増加、逆に施設、運営費はともに前回調査を下回っている。

月刊建設工業 52.516 (黒田)

プラズマ観察用に超高速カメラ開発

高温プラズマの動きをスローモーションに分解して観察する超高速カメラがレニングラードの科学者によって開発された。新型カメラは一種のレーザー光線システムで、量子増幅器を持つ点で在来のレーザーと異なる。百万分の1秒より短い露光時間できわめて高速度で経過する若プロセスも観察することができる。このカメラはすでにソ連科学アカデミーの研究燃でテストされて好成績を収めたという。

日刊工業 52.4.7, 52.5.19 (黒田)