

爆薬の爆轟によって媒質内を伝播する圧力波の研究 (第1報)

鈴木明人*, 小川輝繁**, 福山郁生**, 青木章哲***

PETNの爆轟による水中圧力伝播とモルタルブロック内の圧力伝播実験を行なった。本研究により下記の結論と知見を得た。

- 1) モルタルブロック内を伝播する圧力波の最高圧力とエネルギー密度は水中を伝播する圧力波に比較して大巾に低下する。
- 2) モルタルブロック内を伝播する圧力波の最高圧力およびエネルギー密度はモルタルブロックの破碎程度の影響を受けることが実験に使用した薬量を変えた時の相関係数の変化により確認された。

1. 緒言

海底穿孔発破においても、振動および圧力波を軽減させるために、段階発破を行なうことが望まれるが、この場合には、死圧による不発残薬が生じる恐れがあるため、前段の爆薬の爆轟によって生じる圧力波の大きさを正確に把握する必要がある。

媒質内を伝播する圧力波の大きさは、薬量・爆源からの距離などの他に圧力波が伝播する媒質の性状によっても変り、また使用する爆薬の種類によっても僅かながら変化する。従って特性の明らかなペンスリット (PETN) を使用して圧力波の伝播実験を行ない、次に、現場実験の解析を行ない隣接孔に作用する圧力を検討した。

本論文は2報からなり、第1報では主として小型実験結果を述べ、第2報では現場実験の解析結果を述べる。

小型実験は水中伝播圧力の測定と岩盤を模したモルタルブロック内での圧力伝播測定とにわかれる。

2. 水中での圧力波の伝播実験

実験水槽中でPETNの水中爆轟時の圧力伝播特性を測定した。実験に使用したPETNは、比重 $1.0g/cm^3$ 、爆速 $5,800m/sec$ である。これを6号電気雷管

で起爆した。

2. 実験方法

実験水槽 (3m×5m×3.5m) 中に Fig.1と Fig.2 に示すように爆薬および圧力計を配置した。

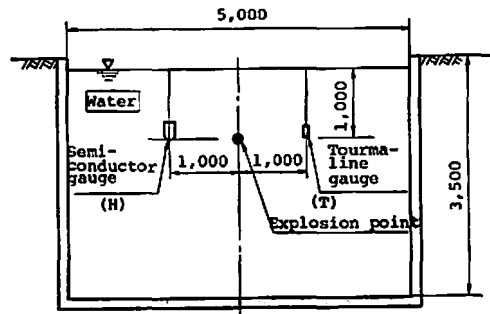


Fig. 1 Explanatory figure of the experiment. calibration of semiconductor gauge which faces to the bottom

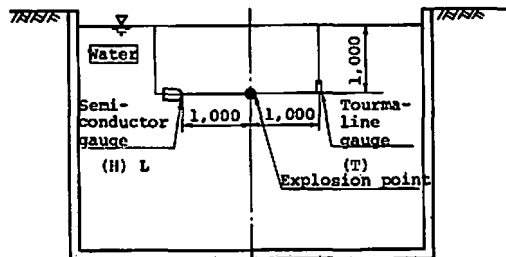


Fig. 2 Semicondutor gauge faces to the explosion point

圧力計は電気石ゲージ式圧力計および半導体ゲージ式圧力計 HKM-375型であり、それぞれの圧力計よ

昭和58年12月25日受理

*大成建設技術研究所

〒245 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1

TEL 045-812-1211

**横浜国立大学工学部

〒240 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 156

TEL 045-335-1451

***日本カーリット保土ヶ谷工場

〒240 神奈川県横浜市保土ヶ谷区仏向町 1625

TEL 045-331-3041

り増巾器を通して、トランジェントレコーダーに記録する。

使用爆薬量は、雷管のみの場合と、薬量1g, 3gおよび10gの場合に分け、ガラスビンに封入したものを使用した。起爆時刻の確認のために爆薬に脚線を巻き付け、この線の破断時刻を起爆時刻とした。

2. 2 水中での圧力波伝播測定結果

1 爆源での爆轟時に生じる水中圧力を測定し、PETNの爆轟によるピーク圧力と薬量・距離の関係を求め、併せて圧力計の方向性を調べた。

2. 2. 1 6号電気雷管のPETN換算薬量の算定

爆薬の薬量が多い場合には、電気雷管の薬量を無視した計算を一般に行っているが、爆薬量が少ない場合には補正する必要がある。補正計算には、基準圧力計となる電気石ゲージの測定圧力と半導体ゲージで爆源方向を向いている場合の圧力値を使用する。

水中圧力波のピーク圧力 p (kg/cm^2) は、薬量 W

(kg)、距離 R (m) の関数であり、 $P=k(W^{1/3}/R)^n$ で与えられるものとする。また6号電気雷管のPETN換算薬量を x (g) とする。

実測したピーク圧力の平均値 \bar{P} を求めて、これを上記関係式に代入すると、(1)式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} 25.9 &= k \left\{ (x/1000)^{1/3} \right\}^n \\ 40.2 &= k \left\{ [(x+1)/1000]^{1/3} \right\}^n \\ 62.7 &= k \left\{ [(x+3)/1000]^{1/3} \right\}^n \\ 98.3 &= k \left\{ [(x+10)/1000]^{1/3} \right\}^n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

これら(1)式においては k , n , x の3変数があるので3つの関係式より、 k および n を消去し、 x の式とし、 $x=0.42$ を求めた。次にこの $x=0.42$ を残る1関係式に代入し、同様の数値計算を行い $x=0.42$ を決定した。

このようにして求めた電気雷管のPETN換算薬量0.42gを用いてピーク圧力と薬量の関係を図化するとFig.3となる。

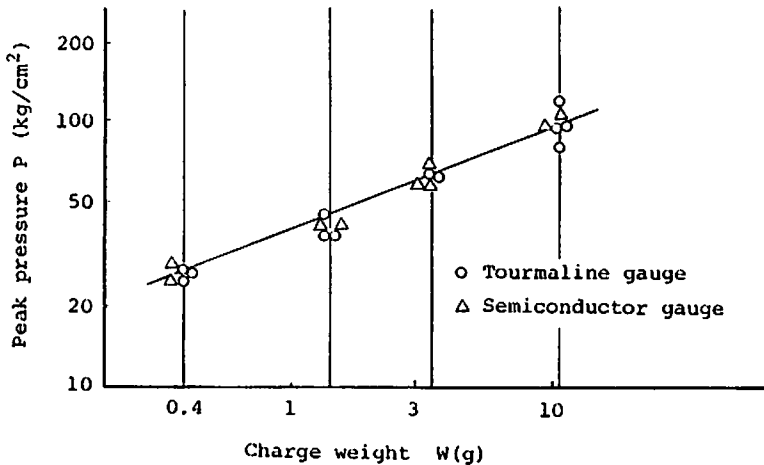


Fig. 3 Peak pressure vs. charge weight, observed at 1m distance from the explosion point, under water (Source PETN+No.6 electric detonator)

Fig. 3の各点を通る直線を最小二乗法で求めると6号電気雷管でPETNを爆轟させた時に水中に伝播する圧力波のピーク圧力は $R=1\text{m}$ の実験式として

$$P_w = 654.2 (R/W^{1/3})^{-1.25} \quad (2)$$

をうる。

2. 2. 2 半導体ゲージの方向補正

半導体ゲージは防水加工したために、受圧面の方向により測定圧力に差が出ることが予測されたが、実験の結果でも受圧面を爆源方向に向けた場合と下向きに向けた場合とで測定圧力に差が生じた。

実験によって得られた測定値を横軸にして両対数グラフにプロットしたものがFig.4である。図のように、

両方法による測定値とも、それぞれに直線関係にあり、しかも両直線は一定の間隔(1.57倍)を保つ平行線となっている。即ち受圧面が下向きの場合には、これを1.57倍すると、爆源方向に向けたときの測定値に換算される。

2. 3 水中圧力波の実測波形

水中圧力波測定によって得られた観測波形の代表例をFig.5(a)~(d)に示す。

3. モルタルブロック内の1爆源の爆轟による圧力波の伝播実験

モルタルブロックに爆破孔および計測孔を設け、爆源から計測孔までの距離を変化させて、水槽内で圧力測定を行ない、モルタルブロック内を伝播する圧力波

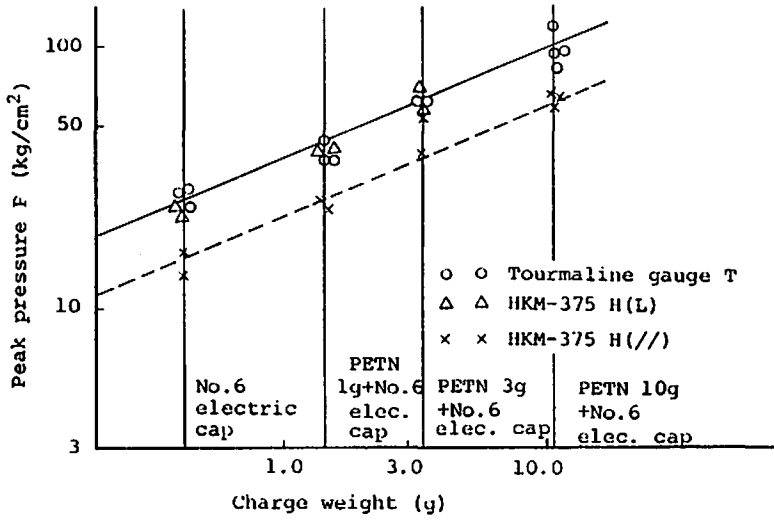


Fig. 4 Calibration for the direction of the semiconductor gauge

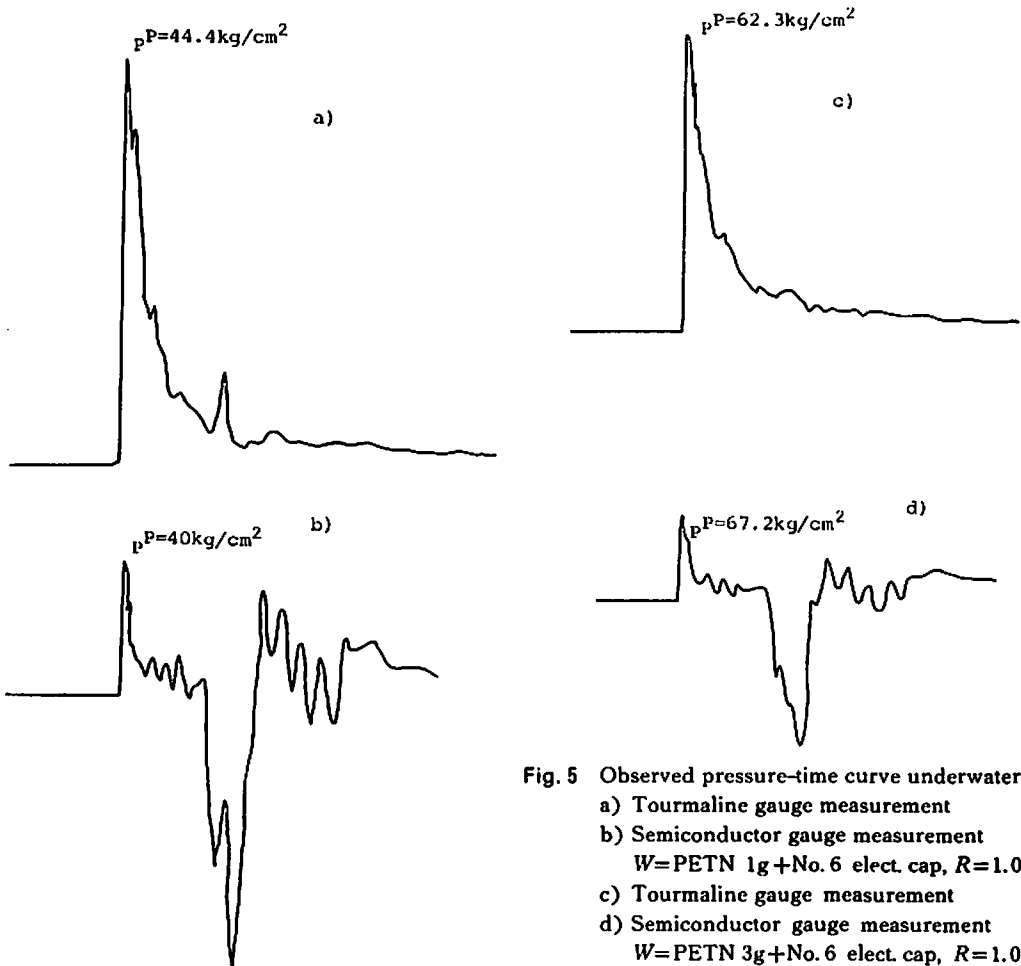


Fig. 5 Observed pressure-time curve underwater
 a) Tourmaline gauge measurement
 b) Semiconductor gauge measurement
 $W = \text{PETN } 1\text{g} + \text{No. } 6 \text{ elec. cap, } R = 1.0\text{m}$
 c) Tourmaline gauge measurement
 d) Semiconductor gauge measurement
 $W = \text{PETN } 3\text{g} + \text{No. } 6 \text{ elec. cap, } R = 1.0\text{m}$

の挙動を求めた。

3.1 使用材料および実験方法

実験に使用したモルタルブロックは直径120cm、高さ80cmの円筒型である。このモルタルブロックの比重は 2.08g/cm^3 、圧縮強度は 372kg/cm^2 、引張強度は 25.4kg/cm^2 、静弾性係数は $1.78 \times 10^9\text{kg/cm}^2$ 、ポアソン比は0.19、P波速度は 3630m/sec 、S波速度は 1700m/sec である。

爆破孔および圧力計測孔の深さは全て20cmであり、孔径は爆破孔の場合、薬量1gあるいは3gでは22mm、薬量が10gでは25mmとした。また計測孔は電気石ゲージの場合、孔径22mm、半導体式圧力計の場合、34mmとした。爆破孔と計測孔の間の距離は10cmから50cmまで10cm間隔で変えた。実験状況の模式図をFig.6 a) ~ c) に示す。

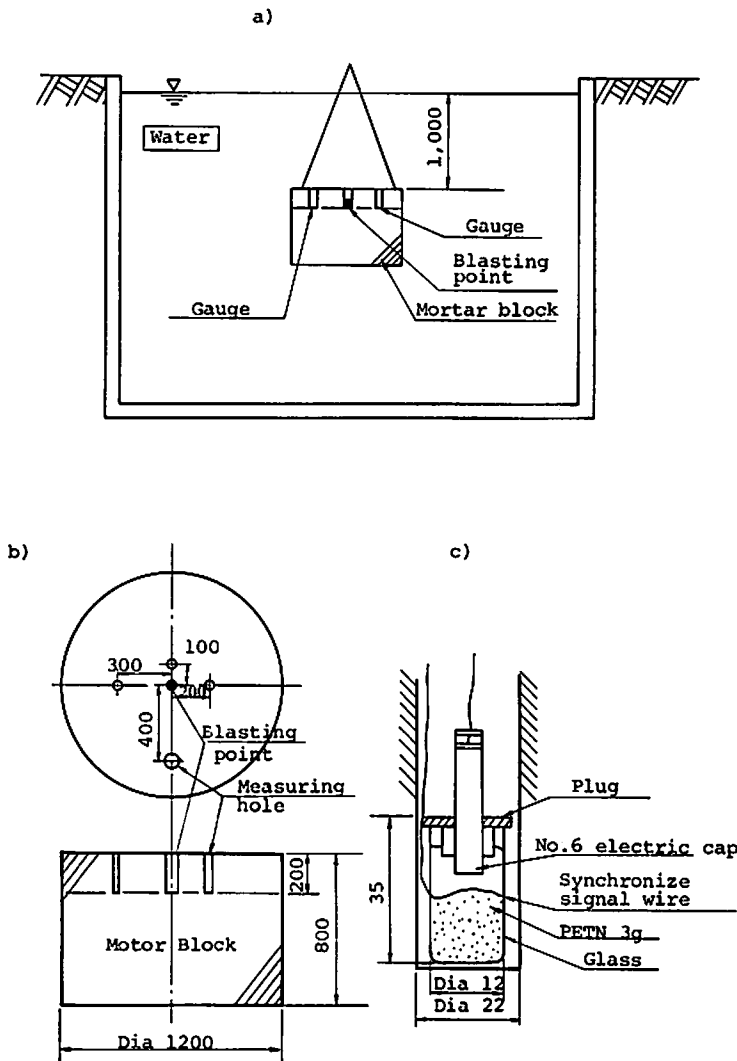


Fig.6 Measuring method of pressures generated in mortar block

- a) Explanatory figure of the experiment. Measuring the pressure in the mortar block.
- b) Detail of gauge arrangement
- c) Detail of the explosive charge

実験では爆破孔に爆薬を設置し、急結モルタルでタ
ンピングした後、モルタルブロックを水槽中に吊り降

し、電気雷管で起爆させ、モルタルブロックを伝播す
る圧力を測定した。

3. 2 実験結果

3. 2. 1 圧力と距離の関係

モルタルブロック内で孔間隔を5段階、薬量を3段階づつ変えて計15回以上の圧力測定を行った。この圧力波のピーク圧力と距離の関係を最小二乗法で計算した結果、各々の薬量について下記の実験式が得られる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{PETN 1g の場合 } pP_1 = 2755 (R)^{-1.58} \\ \text{相関係数 } \gamma = 0.87 \\ \text{PETN 3g の場合 } pP_3 = 15,165 (R)^{-1.98} \\ \text{相関係数 } \gamma = 0.94 \\ \text{PETN 10g の場合 } pP_{10} = 3742 (R)^{-1.39} \\ \text{相関係数 } \gamma = 0.91 \end{array} \right\} (3)$$

ここで pP の単位は kg/cm^2 であり、 R のそれは cm である。

次にピーク圧力と換算距離の関係を求めるために各実験毎に縦軸にピーク圧力 (kg/cm^2) を記し、横軸に換算距離 $R/W^{1/3}$ ($\text{m/kg}^{1/3}$) を記して両対数グラフで Fig. 7 a) ~ c) に示した

各薬量毎に最小二乗法でピーク圧力と換算距離の関係を計算すると下記の実験式が得られる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{PETN 1g の場合 } pP_1 = 60.3 (R/W^{1/3})^{-1.58} \\ \text{相関係数 } \gamma = 0.88 \\ \text{PETN 3g の場合 } pP_3 = 70.7 (R/W^{1/3})^{-1.97} \\ \text{相関係数 } \gamma = 0.94 \\ \text{PETN 10g の場合 } pP_{10} = 52.2 (R/W^{1/3})^{-1.39} \\ \text{相関係数 } \gamma = 0.91 \end{array} \right\} (4)$$

(4)式を見ると係数 k と n が薬量によってかなり変わっていることがわかる。

次に、全ての実験結果について Fig. 7 と同様に縦軸にピーク圧力を取り、横軸に換算距離をとって示したものが Fig. 8 である。Fig. 8 の各点に最小二乗法を適用すると(5)式が得られる。

$$pP = 64.2 (R/W^{1/3})^{-1.73} \quad (5)$$

ここで、相関係数 $\gamma = 0.91$ である。

3. 2. 2 モルタルブロック内を伝播する実測波形
モルタルブロック内を伝播する圧力波形の例を Fig. 9 a) ~ c) に示す。

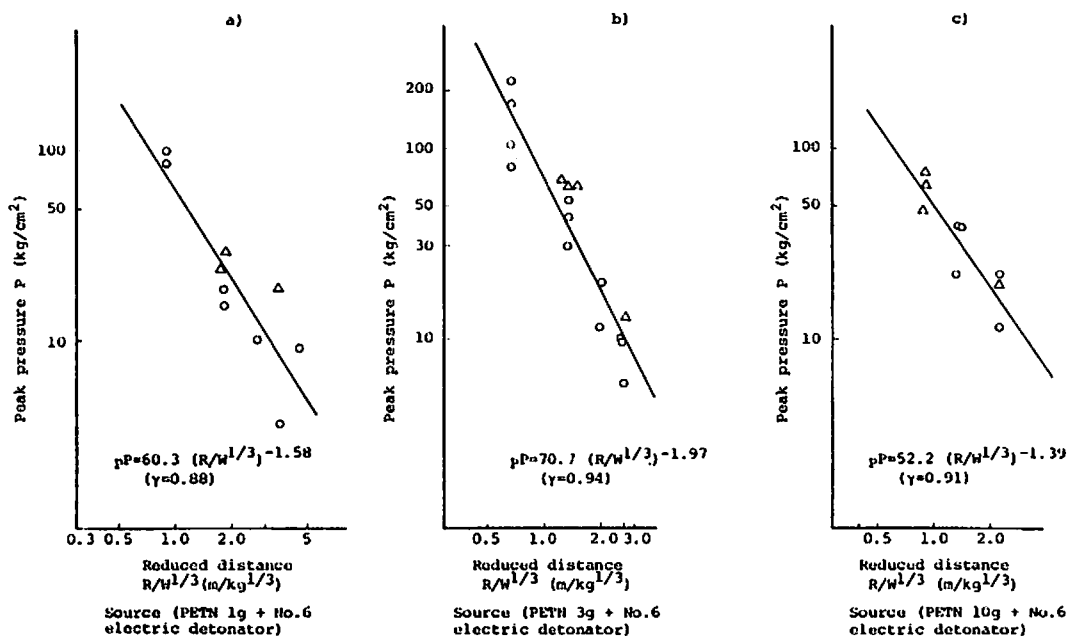


Fig. 7 Peak pressure vs. reduced distance in mortar block

4. 実験結果の検討および考察

4. 1 ピーク圧力の距離減衰について

実験は、爆源周辺の媒質を水とモルタルブロックの2種類に変えて行っている。ここでは爆薬を球形と考え、また、爆薬と各媒質の境界は密着しているものとする。さらに、球形爆薬と媒質との接触面の微小部

分を取り出すと、平面状態の圧力波伝播と考えることができ、音響理論を適用することができる。

そこで、以下に述べるような仮定を設けて爆源表面の圧力を推定する。

仮定・1、水中を伝播する圧力波の圧力と、薬量・距離の関係式 $P = k (R/W^{1/3})^{-n}$ において、減衰定数

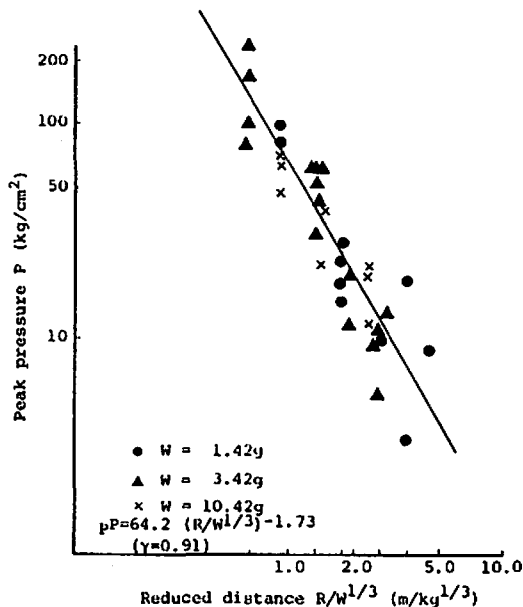


Fig. 8 Peak pressure in mortar block vs. reduced distance
Source (PETN+No. 6 electric detonator)

k および係数 n は一定である。

仮定・2 モルタルブロック中を伝播する圧力波の減衰定数 k および係数 n も一定である。

ここで爆薬の密度 $\rho_{exp}=1.0$ 、爆速 $D=6,000\text{m/sec}$ 爆轟圧力を P_{exp} とし、モルタルブロックの密度 $\rho_m=2.08$ 、 P 波速度 $pC_m=3.630\text{m/sec}$ とすると薬室表面に入射するピーク圧力 pP_m は

$$pP_m = \{(2 \cdot \rho_m \cdot pC_m) / (\rho_m \cdot pC_m + \rho_{exp} \cdot D)\} P_{exp} \quad (6)$$

となり、各数値を代入すると $pP_m=1.11 \cdot P_{exp}$ となる。

次に爆薬と水との境界面では、水の密度 $\rho_w=1.0$ 、水中の伝播速度 $C_w=1460\text{m/sec}$ とすると、水に入射するピーク圧力 pP_w は

$$pP_w = \{(2 \cdot \rho_w \cdot C_w) / (\rho_w \cdot C_w + \rho_{exp} \cdot D)\} P_{exp} \quad (7)$$

となり、各数値を代入すると、 $pP_w=0.39 \cdot P_{exp}$ となる。

雷管の薬量を無視した薬量 W の爆薬が球形であるとして、その半径 a_e の換算距離を求めるため、次式を用いた。

$$\frac{4\pi a_e^3}{3} = \frac{W}{\rho_{exp}} \quad (8)$$

これより半径の換算距離 ($a_e/W^{1/3}$) が 0.06 と求められた。

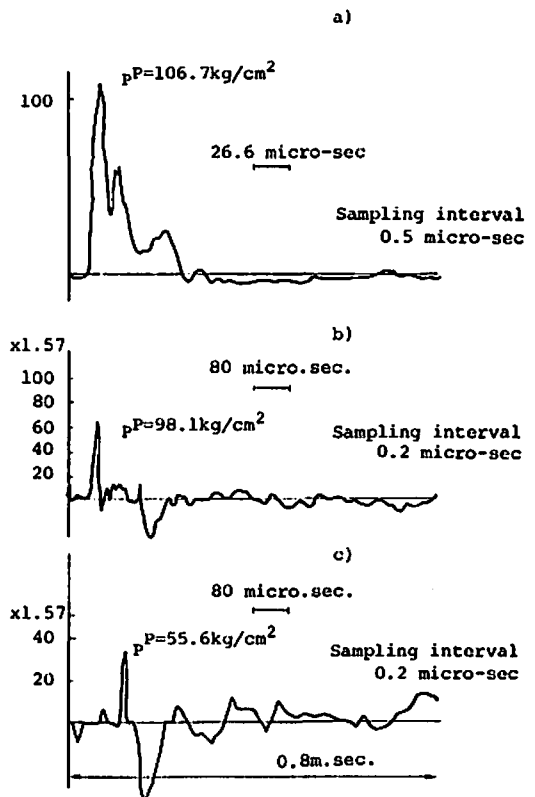


Fig. 9 Pressure-time records observed in mortar block
Source (PETN 3g+No. 6 electric cap)
a) $R=10\text{cm}$ b) $R=20\text{cm}$
c) $R=40\text{cm}$

水中における1爆源の実験で得られた。水中圧力波のピーク圧力と換算距離の関係式は(2)式であり、モルタルブロック内で1爆源を爆轟させた時に得られたピーク圧力と換算距離の関係式は(5)式である。

この両実験式を同一図に示したものが Fig. 10 である。このようにモルタルブロック内での圧力の方が水中の圧力より低いことがわかる。

この原因を検討するために、計測位置について考える。モルタルブロック内の計測方法を示すと Fig. 11 のようになる。

Fig. 11 より明らかなように圧力計に直接入射する圧力波は、モルタルブロック中より水中に入射した圧力波となる。従って

$$P_w = \{(2 \cdot \rho_w \cdot C_w) / (\rho_m \cdot pC_m + \rho_w \cdot C_w)\} P_m \quad (9)$$

$$\therefore P_m = (\rho_m \cdot pC_m + \rho_w \cdot C_w) / (2\rho_w \cdot C_w) P_w \approx 3.1 P_w$$

となりモルタルブロック内の圧力波は、計測圧力の約

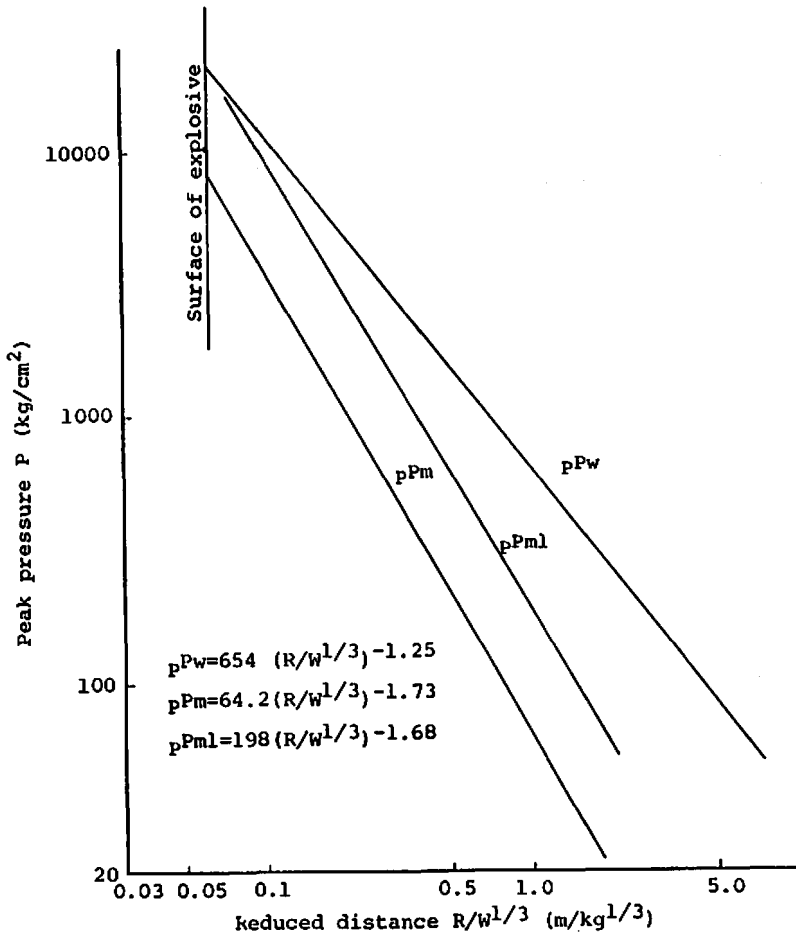


Fig. 10 Peak pressure under water and in mortar block vs. reduced distance

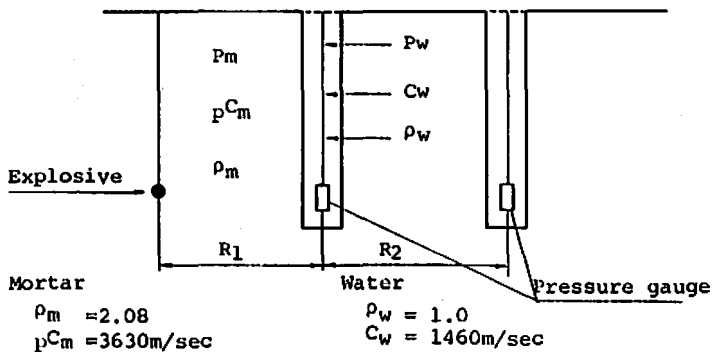


Fig. 11 Modified measuring point

3倍と考えられる。

そこで、Fig. 10において実測値の3倍の点を通る直線をかくと

$${}_pP_{ml} = 193 (R/W^{1/3})^{-1.73}$$

となり、爆薬の表面で ${}_pP_w$ とほぼ等しくなる。

ところが、前出のように、

$${}_pP_w \approx 0.39 P_{exp}, \quad {}_pP_m \approx 1.11 P_{exp}$$

であり、モルタルブロック内のピーク圧力は、この3倍効果を考慮して補正しても大巾に低いものになっており、モルタルブロックと水とは P_{exp} が違うものと考え

える必要がある。

即ち PETN の爆発エネルギーの大きな部分がモルタルブロックの破砕の為に消費されるため、モルタルブロックの中に投射される圧力波のエネルギーは水中に投射されるものに比べて小さいものと考えられる。

4.2 流動エネルギー密度の検討および考察

4.2.1 流動エネルギー密度の計算

爆薬の爆轟により生じる圧力波は不連続な圧力上昇をもつ波動であり、圧力波は外界に対して仕事を行なう。爆源より球面圧力波が伝播すると仮定すると、半径 R の表面でなす仕事量 $E_{sw}(R)$ は(11)式のようにになる。

$$E_{sw}(R) = 4\pi \int_{t_0(R)}^t r^2 \cdot P \cdot v dt \quad (11)$$

ここに v は媒質の粒子速度である。

また、粒子速度 v は

$$v = \frac{P - P_0}{\rho_0 \cdot C_0} \quad (12)$$

ここで、 P_0 は初期圧力、 C_0 は媒質の音速、 ρ_0 は媒質の密度である。

(12)式を(11)式に代入する。また、 P_0 は P に比べて十分に小さいので無視すると、

$$E_{sw} = \frac{4\pi R^2}{\rho_0 \cdot C_0} \int_0^t P^2(t) dt \quad (13)$$

エネルギー密度 E_f は(13)式を球の表面積 $4\pi R^2$ で除したものであり、次のようになる。

$$E_f = \frac{1}{\rho_0 \cdot C_0} \int_0^t P^2(t) dt \quad (14)$$

本実験では圧力波形の正圧の部分を積分して、エネルギー密度を求めた。

水中吊し発破の場合には、薬量 W とエネルギー密度の関係式は

$$E_{fw} = 102 W^{1.12} \quad (15)$$

相関係数 $\gamma = 0.99$ となる

ここで E_{fw} の単位は J/m^2 であり、 W の単位は g である。次にモルタルブロック内でのエネルギー密度と換算距離の関係は Fig. 12 に示すとおりであり、

$$E_{fm} = 128 (R/W^{1/3})^{-3.90} \quad (16)$$

となる。但し $0.1 \leq R \leq 0.5$

ここで E_{fm} の単位は J/m^2 であり、 W の単位は kg で R の単位は m である。

これを各薬量毎に距離 R (cm) との関係求めて実験式で示すと次のようになる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{薬量 1g の場合 } E_{fm1} = 11.4 \times 10^6 R^{-4.75} \\ \text{相関係数 } \gamma = 0.94 \\ \text{薬量 3g の場合 } E_{fm3} = 6.83 \times 10^6 R^{-4.03} \\ \text{相関係数 } \gamma = 0.93 \\ \text{薬量 10g の場合 } E_{fm10} = 2.07 \times 10^6 R^{-2.5} \\ \text{相関係数 } \gamma = 0.64 \end{array} \right\} \quad (17)$$

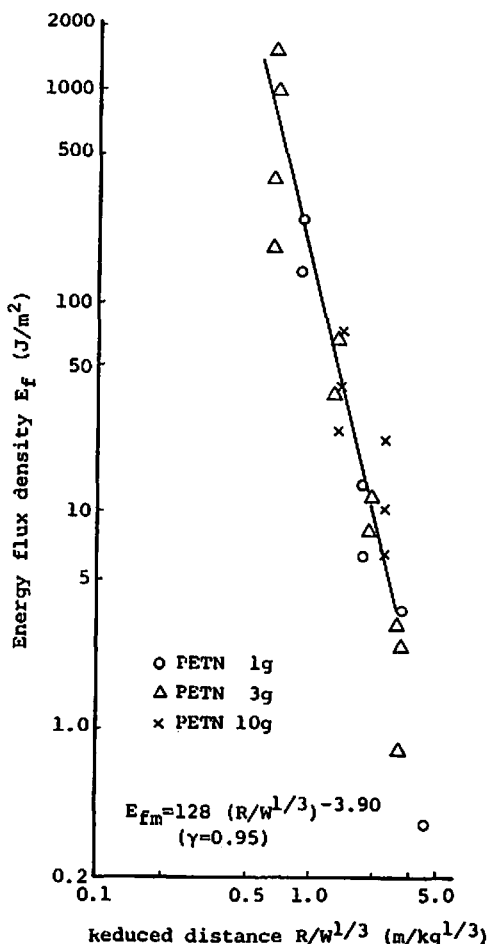


Fig. 12 Reduced distance vs. energy flux density in mortar block, caused by blasing with 1 source

4.2.2 エネルギー密度の検討と考察

水中吊し発破時の圧力波のエネルギー密度を換算距離との関係で求めると

$$E_{fw} = 231,000 (R/W^{1/3})^{-3.36} \quad (18)$$

相関係数 $\gamma = 0.99$ となる。

但し $R = 1.0m$ の場合であり E_{fw} の単位は J/m^2 であり、 W の単位は kg である。

ここで確認のために、水中でのエネルギー伝播量を検討すると、球全体で考えた場合に

$$\begin{aligned} E_{fw} &= 4\pi R^2 \times 102 W^{1.12} \times \frac{1}{4.186} \\ &\approx 306.4 \text{ cal/g} \end{aligned}$$

となり、田中(克)³⁾等が密度 $\rho = 0.9g/cc$ の PETN で求めたエネルギー $E_f = 337.2 \text{ cal/g}$ との差は約10%となり、今回の実験が小薬量で行なわれ、また雷管薬量を計算している点から考えても妥当な結果と考えられ

る。

4.3 モルタルブロックの破壊に対する検討

PETN 1gの爆轟をモルタルブロック内で行なった場合には、モルタルブロックにはクラックは発生せず、急結モルタルのタンピング部が爆圧で吹き出されており、いわゆる鉄砲の現象を示す。また、PETN 3gの場合ではクラックはまれにしか発生せず上部コンクリートが破壊する現象が認められた。

PETN 10gの場合には、ほとんどの場合、モルタルブロックに亀裂が生じ、モルタルブロックが完全に破壊された例も多い。モルタルブロックが破壊される場合の破壊形状は圧壊ではなく、方向性を持って2つに破壊しており、エネルギーは破壊エネルギーとして消費されるため、計測圧力は低下すると考えられる。また、爆破孔の上部のモルタルブロックが破壊された場合にも測定圧力は低下していた。

5 結 言

岩盤内で爆薬を爆轟させた時に岩盤内を伝播する圧力波の性状を検討するために、模擬岩盤として考えたモルタルブロック内を伝播する圧力波の測定を行なった。ここで実験によって得られた結論を示す。

爆薬の爆轟によって媒質中を伝播する圧力波のピーク圧力は、水中を伝播する場合とモルタルブロック内を伝播する場合とで異なり、モルタルブロック内を伝播する圧力は大巾に低下する。また、計算によれば、

圧力波がモルタルブロック内を伝播する場合でも、圧力計が孔壁と接している場合と圧力計が孔壁に接しないで周辺が水で覆われている場合とを比較して計算すると前者は後者の約3倍となる。

また、爆源として使用した爆薬量とも関係があり、モルタルブロックが完全に破壊される場合の相関係数はモルタルブロックの破砕形状がクレーター状になるような発破の場合に比較して低下する。従って岩盤内を伝播する圧力波は岩盤の破砕の影響を受けると考えられる。

本研究によって爆薬をモルタルブロック内で爆轟させた場合に伝播する圧力波を、水中吊し発破を行なった場合に水中に伝播する圧力波との関係で検討することができ、モルタルブロック内を伝播し隣接孔に作用する圧力を推定することが可能となった。

文 献

- 1) 田中一三「水中爆発によるガス球挙動(第2報)」
工火誌, Vol. 40 No. 4 P306~312 1979
- 2) 田中克己, 吉田正典, 米田罔昭, 水島容二郎「水中爆発による爆薬エネルギーの精密測定」
工火誌 Vol 42 No. 4 P239~247 1981
- 3) 鈴木明人, 小川輝繁, 福山郁生, 色部厚, 青木章哲, 鏑原劭「モルタルブロック中の圧力波の伝播について」
工業火薬協会講演要旨集 1983年 5月

Pressure Wave Propagation in Different Mediums (I)
by Detonation of Explosives

by AKeto SUZUKI*, Terushige OGAWA, Ikuo FUKUYAMA**
and Akinori AOKI***

Experiments on pressure wave propagation in water and on that in mortar blocks caused by detonation of PETN were carried out. From the experiments, following conclusions and new findings were obtained.

- 1) The peak pressure and the energy density of the pressure wave propagating in mortar blocks are diminished greatly in comparison with those of the pressure wave propagating in water.
- 2) The peak pressure and the energy density of the pressure wave propagating in mortar blocks are affected by the degree of fracture of the mortar blocks. This has been confirmed by the change of the correlation coefficient of the experimental formula as the degree of the fracture was altered with the change in the quantity of the explosives used in the experiments.
- 3) As the result of the pressure propagation experiments in mortar blocks, it become possible to estimate the pressure acting on the explosives in the neighboring hole.

(*Taisei Kensetsu Gijyutsu Kenkyujo, 245 Yokohama-shi, Totsuka-ku,
Nasemachi 344-1

**Yokohama National University, 240 Yokohama-shi, Hodogaya-ku,
Tokiwadai 156

***The Japan Carlit Co., Ltd. Hodogaya Factory, 240 Yokohama-shi,
Hodogaya-ku, Bukko-cho 1625)