

## 爆轟圧に関する研究

佐々 宏一・伊藤 一郎\*

水中衝撃波法 (Aquarium Technique) を用いて数種の爆薬の爆轟圧を測定し、今までに測定した7種の爆薬 (8条件) の爆轟圧の実測結果と、次式を用いて算出した爆轟圧の計算値とを比較検討した。

$$P_d = 0.4157D^2 \Delta (1 - 0.5430\Delta + 0.1925\Delta^2) \quad (\text{単位は C.G.S.})$$

その結果、爆速がほぼ 4,000m/sec 以上の化合爆薬や膠質ダイナマイトの場合には、実測爆轟圧と計算爆轟圧との間に顕著な差違は認められないが、硝安を多く含んだ低爆速 (4,000~3,500m/sec) の粉状爆薬 (あかつき爆薬と Belite A60%) の実測爆轟圧は、計算値よりもやや高いという結果が得られた。

## 1. 緒言

近年、電子計算機の発達によつて従来解き得なかつたような複雑な条件の場合に材料内に発生する応力状態の解析が可能となつてきた。たとえば、爆轟衝撃の場合について考えてみると、爆轟衝撃による材料の変形状態や破壊の様相などを爆轟圧と材料の性質、たとえば状態方程式、などを用いて行なつた数値計算の結果から解析しうようになつてきた。<sup>1), 2), 3)</sup> このことは、爆轟衝撃による材料の変形や破壊状況の解析を多くの条件の場合について行なうことによつて、目的に合致した火薬類の性能を合理的に検討しうることを示唆している。このようなことをするためには、上記のように爆轟圧に関するデータがまず必要となる。さらにまた、爆轟理論の検討という観点からも爆轟圧の実測結果は興味あるものと考えられる。そこで今回は、さきに公表した爆轟圧の測定法を用いてさらに数種の爆薬の爆轟圧の測定を行ない、その結果を用いて爆轟圧と爆速および密度との関係について検討したので、その結果について報告する。

## 2. 爆轟圧の測定原理および方法

爆轟圧を測定するために用いた水中衝撃波法の原理および方法はすでに前報<sup>4)</sup> に示してあるので、ここではその概略を簡単に説明することにする。

いま、Fig. 1 に示すように、爆薬を用いて水を衝撃する場合に、薬包の端面、すなわち、爆轟波の進行方向に直交する面から水中へ投射される水中衝撃波の薬

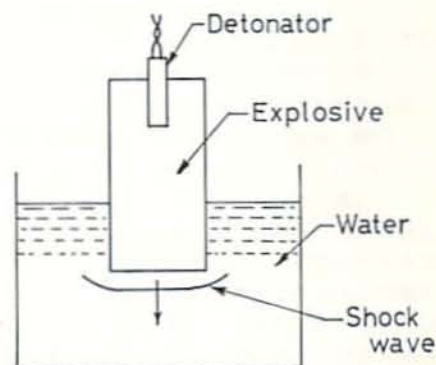


Fig. 1 Principle of Aquarium Technique.

包と水との境界面上における圧力を  $P_w$ 、その位置における水中衝撃波の伝播速度を  $C_w$ 、水の密度を  $\rho_w$  とすると、これらと水を衝撃した爆轟波の爆速  $D$ 、爆轟圧  $P_d$  および爆薬の密度  $\Delta$  との間には、境界面上においては圧力および変位は連続であるという条件から次の (1) 式の関係が得られる。

$$P_d = \frac{\rho_w \cdot C_w + \Delta \cdot D}{2\rho_w \cdot C_w} \cdot P_w \quad (1)$$

一方、薬包端面近傍の水中衝撃波は一次元的な衝撃波とみなしうるから、水中衝撃波の圧力  $P_w$  と衝撃波伝播速度  $C_w$ 、衝撃波内粒子速度  $v$  および密度  $\rho_w$  との間には、周知の (2) 式の関係が存在する。

$$P_w = \rho_w \cdot C_w \cdot v \quad (2)$$

さらに、 $C_w$  と  $v$  との間にはある一定の関係が存在するから、あらかじめ  $C_w$  と  $v$  との関係求めておけ

\*昭和46年8月20日受理  
京都大学工学部資源工学教室、京都市左京区吉田本町

ば、 $\rho_w$  ( $\cong 1.0\text{g/cm}^3$ ) と  $C_w$  とを測定することによって  $P_w$  の値を求めることができる。なお、水中衝撃波の  $P_w$  と  $C_w$  との関係はすでに M.A. Cook らによって求められているので、(Fig. 2), 今回はそのデータを用いて  $C_w$  の実測結果から  $P_w$  を求めるという方法を採用した。

薬包端面と水との境界面から水中へ投射される水中衝撃波の初期の伝播速度  $C_w$  の値を求めるために、今回は、水中衝撃波の波頭においては水の電気伝導度が非常に低下しているという現象を利用して、衝撃波の到達を電気的に検出するという方法を用いた。すなわち薬包端面上および端面から 3mm または 5mm の点に設置した 2 対の電極を用いて水中衝撃波がこれらの位置に到達する時間を測定し、それらから上記の区間内の水中衝撃波の平均伝播速度を算出し、さらにその値とさきに実施した薬包端面近傍における水中衝撃波の伝播ともなる爆轟圧の減衰状態の実測結果とを用いて薬包端面上の衝撃波伝播速度  $C_w$  を求めるという方法を採用した。このようにして求められた  $C_w$  の値と、Fig. 2 に示した関係とを用いて  $P_w$  の値を求め、これらの値を (1) 式に適用して爆轟圧を算出した。

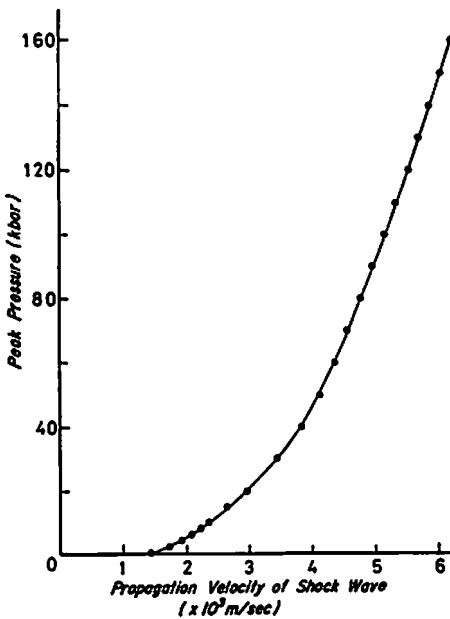


Fig. 2 Shock Parameter Results for Water ( $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ), (after M.A. Cook)

### 3. 爆薬および実験条件

爆轟圧の測定は次に示す 5 条件について行なった。

1. TNT ( $\Delta = 0.8\text{g/cm}^3$ )
2. TNT ( $\Delta = 1.0\text{g/cm}^3$ )
3. PETN ( $\Delta = 0.9\text{g/cm}^3$ )

### 4. 2号楯ダイナマイト ( $\Delta = 1.5\text{g/cm}^3$ )

### 5. あかつき爆薬 ( $\Delta = 1.0\text{g/cm}^3$ )

実験に際しては、まず、外径 44mm、内径 38mm のボール紙筒の内部に薬長が薬径のほぼ 4.5 倍 (約 17cm) となるように爆薬を装填した。したがって、薬量は装填密度によって異なることになる。使用した薬量は次のとおりである。

TNT ( $\Delta = 0.8\text{g/cm}^3$ ) の場合、	160g
TNT ( $\Delta = 1.0\text{g/cm}^3$ ) の場合、	200g
PETN ( $\Delta = 0.9\text{g/cm}^3$ ) の場合、	180g
2号楯ダイナマイトの場合、	300g
あかつき爆薬の場合、	200g

なお、これらの爆薬の起爆には、至完爆長をできるだけ短くするために、6号電気雷管 7本を束ねたものを同時に起爆して行なった。さらに、薬包の水中へ入れる方の端面から 20mm の位置に先端を TNT でコーティングしたイオンギャップを挿入して水を衝撃した爆轟波の爆速も同時に測定した。

### 4. 実験結果および考察

Table 1 は実験結果を一まとめにして示したものであつて、この表には今回の実測結果のみならず、参考のために、前報に示した数種の爆薬の爆轟圧の測定結果も合せて示し、さらに実測データが正規分布をすることを考えて信頼係数を 0.95 (危険率: 0.05) とした場合の爆轟圧の信頼区間値、および (4) 式として示した Jones による爆轟圧の計算式に実測した密度と爆速との値を代入して計算した爆轟圧の計算値をも参考のために示しておいた。

さて爆轟理論においては爆轟波を一種の衝撃波とみなし、その基礎式の一つとして (2) 式と同じ形の (3) 式の関係が用いられている。

$$P_d = \Delta \cdot D \cdot W \dots\dots\dots (3)$$

ここに  $W$  は爆轟波内の粒子速度である。さらに、衝撃波の場合には、一般にその伝播速度は波内粒子速度  $V$  の一次関数であるから<sup>3)</sup>、爆轟波の場合も  $W$  は  $D$  の一次関係であると考えられることができる。したがって、多くの研究者によって呈示されている爆薬の密度と爆速とから爆轟圧を算出する式は、いずれも爆轟圧を密度の関数と爆速の 2 乗との積という形で示されている<sup>4)</sup>。すなわち、

$$\text{Jones : } P_d = 0.4157\Delta(1 - 0.5430\Delta + 0.1925\Delta^2) \cdot D^2 \dots\dots\dots (\text{C.G.S.}) \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{Paterson : } P_d = 0.3846\Delta(1 - 0.3316\Delta + 0.0007\Delta^2) \cdot D^2 \dots\dots\dots (\text{C.G.S.}) \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{Cook : } P_d = 0.3353\Delta(1 - 0.3016\Delta + 0.0826\Delta^2) \cdot D^2 \dots\dots\dots (\text{C.G.S.}) \dots\dots\dots (6)$$

したがって、上記のいずれの計算式の場合も

$$(P_d/D^2) = f(\Delta) \dots\dots\dots (7)$$

Table 1 Summized Results of Experiment

Explosive	$\Delta$ (g/cm <sup>3</sup> )	Detonation velocity			Detonation pressure			$P_{(4)}$ (kbar) Calculated	
		n	$\bar{D}$ (m/sec)	$S_d$ (m/sec)	N	$\bar{P}_d$ (kbar)	$S_p$ (kbar)		$\phi$ (kbar)
T N T	0.8	7	3910	140	7	41.1	7.0	7.7	34
T T N	1.0	7	4590	240	7	64.9	8.1	8.9	57
P E T N	0.9	5	4760	330	5	55.0	9.7	15.5	58
No.2 Enoki dynamite	i)	7	5370	220	6	139	25.2	32.4	112
Akatsuki	ii)	7	3490	210	7	42.3	4.9	5.3	33
PETN/TNT (60/40)		—	7200	—	16	240	25.6	14.6	235
Geogel 60%	iii)	—	6200	—	5	170	15.7	25.2	148
Belite A 60%	iv)	—	3300	—	18	46	8.6	4.6	32

## Glossary of symbols in Table 1

i) Ammonia Semi-gelatine dynamite.

ii) Ammonium nitrate explosive (Nitroglycerin gel : 5 ~ 6 %, Ammonium nitrate : 73 ~ 75 %, Cellulose etc. : 3 ~ 5 %).

iii) Straight gelatine dynamite.

iv) Ammonia dynamite.

n, N : Number of data.

 $\bar{D}$ ,  $\bar{P}_d$  : Mean values of detonation velocity and detonation pressure. $S_d$ ,  $S_p$  : Standard deviation. $\phi$  : Confidence interval of detonation pressure for confidence coefficient=0.95. $P_{(4)}$  : Detonation pressure calculated by using formula(4).

と表わすことができる。ここに  $f(\Delta)$  は  $\Delta$  の関数である。そこで、今回の実測結果を  $\bar{P}_d/\bar{D}^2$  と  $\Delta$  の関係として図示してみた。それを示したのが Fig. 3 である。Fig. 3 には (4) 式の関係が破線で示してある。さらにまた、Fig. 3 に示したそれぞれの爆薬の実測爆轟圧の平均値から求めた点を中央とする縦の線分は Table 1 に示した信頼区間幅より算出した  $\bar{P}_d/\bar{D}^2$  の信頼区間幅を示したものである。

まず、実測データから求めたそれぞれの爆薬の爆轟圧の平均値と、(4)式を用いて算出した爆轟圧の値とを対比してみると、PETN ( $\Delta=0.9$ g/cm<sup>3</sup>) 以外はいずれも計算値より平均値の方が高い値を示している。しかし、実測データにはばらつきがあるから、平均値と計算値とを対比するだけでは、実測した爆轟圧の方が(4)式による計算値よりも高い値であるということとはできない。そこでつぎに、Fig. 3 に示した信頼区間との関係をみてみることにする。信頼係数0.95に対する信頼区間とは、上記のように有限個のデータから算出した信頼区間内に求めようとしているもの(この場合は爆轟圧)の真の値(これは同一条件で無限

$\bar{P}_d/\bar{D}^2$  : Mean value and confidence interval of  $\bar{P}_d/\bar{D}^2$ .  
 ----- : Relation of  $\bar{P}_d/\bar{D}^2$  vs.  $\Delta$  calculated by using formula (4).  
 ○1: TNT ( $\Delta=0.8$ )      ○2: TNT ( $\Delta=1.0$ )  
 ●3: PETN ( $\Delta=0.9$ )    ●4: No.2 Enoki dy.  
 ●5: Akatsuki            ●6: PETN/TNT  
 ●7: Geogel 60%        ●8: Belite A 60%

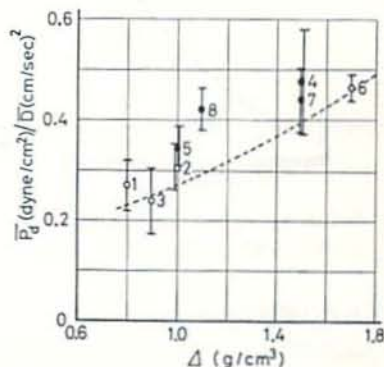


Fig. 3 Comparison of the Measured Detonation Pressures with the Ones Calculated by Using Formula (4).

回の測定を行なった場合に得られる無限個のデータの平均値とみなすことができる)が存在していると推定した場合に、それが正しい確率が0.95であるような区間である。いいかえれば、上記の条件で無限回の爆轟圧測定を実施した場合に得られる平均値が Fig. 3 に示した線分内にあると推定した場合に、その推定が正しいという確率が0.95であるということになる。そこでこのことを念頭に置きながら Fig. 3 をみると、白丸で示した化合爆薬の場合はすべて(4)式を用いて計算した計算値が信頼区間内に存在している。したがって、今回の実測結果では(4)式を用いて計算した計算値と化合爆薬類の爆轟圧の値との間に差があるとみなすことはできない。つぎに、ダイナマイトの爆轟圧をみると、その平均値(黒丸)をみるかぎりではダイナマイトの実測爆轟圧の方が計算値よりも高い爆轟圧を示している。しかし、2号極ダイナマイトと Geogel 60% の場合には、化合爆薬の場合と同様に計算値がそれらの信頼区間内に存在している。したがって、上記の2つの薬種に関しては計算値と実測値との間に差があるとみなすことはできない。しかし、あかつき爆薬の場合と Belite A 60% の場合には計算値は信頼区間内に存在していない。したがって今回の実測データからは、この2種のダイナマイトの爆轟圧は(4)式を用いて計算した爆轟圧よりも高い値であると推定しても、それが限まっている確率は0.05と非常に低いから、95%の確からしさをもつて差があるということになる。そこで、あかつき爆薬と Belite A 60% の組成、爆速などに注目してみると、これらはいずれも硝安を多く含んだ粉状の低爆速爆薬であることがわかる。

以上のように、爆轟圧の測定を実施した薬種がそれほど多くないので明瞭には言えないが、現在までの実測結果をみるかぎりでは、TNT や PETN などのように爆速が 4000m/sec 以上の化合爆薬や膠質ダイナマイトの爆轟圧は(4)式の関係を用いて概算しうるが、

硝安を多く含んだ低爆速の粉状爆薬の爆轟圧は(4)式より求めた計算値よりも高い値を示すのではないかと推定することができた。

## 5. 結 言

今回は水中衝撃波法を用いて数種の爆薬の爆轟圧を測定し、得られた爆轟圧の実測結果と、前報に示した筆者のうちの一人である佐々がカナダに滞在中に測定した爆轟圧の実測データとを用いて、爆薬の密度および爆速と爆轟圧との関係について検討した。その結果、今までに得られた実測データからは、爆速がほぼ 4000m/sec 以上の化合爆薬や膠質ダイナマイトの実測爆轟圧と、密度と爆速との値から爆轟圧を理論的に算出する計算式を用いて計算した爆轟圧との間には顕著な差違は認められないが、硝安を多く含んだ低爆速の粉状爆薬の場合には実測爆轟圧の方が計算値よりもや高い値を示すという結果が得られた。

なお、今回の実験は旭化成工業株式会社あいはの工場で実施させていただいたものであり、さらに、上記の推定を確かめるための実験は日本油脂株式会社武豊工場で実施させていただいた。ここに記して感謝する次第である。

## 文 献

- 1) J.T Cherry : Int. Jour. Rock Mech. Min. sci., vol. 4, p.1~22, 1963.
- 2) M. L. Wilkins : Methods in Computational physics vol. 3, p.211~263, Academic press, 1963.
- 3) 佐々, 伊藤 : 材料, 21巻, 221号, 昭和47年2月。
- 4) 佐々, 伊藤 : 工業火薬協会誌, 27巻, 4号, 228~233頁, 昭和41年8月。
- 5) Rice, McQueen and Walsh et. al; Solid State physics, vol. 6, Academic press, 1958
- 6) K. Hino and T. Urakawa : 工業火薬協会誌, 17巻, 4号, 242~250頁, 昭和31年12月。

## Studies on Detonation Pressure

by K. SASSA and I. ITO

The detonation pressures of various kinds of explosives are measured by means of an aquarium technique, and the measured values of the detonation pressures are compared with the ones calculated by using the following formula.

$$P_d = 0.4157D^2 \cdot \Delta(1 - 0.5430\Delta + 0.1925\Delta^2)$$

The conclusions deduced from the data obtained up to the present are as follows.

No remarkable difference can be found between the measured values of the detonation pressures and the calculated ones in the case of the high explosives of which detonation velocities are more than about 4000m/sec. But in the case of the explosives having a large percentage of ammonium nitrate in its ingredient and of which detonation velocities are about 3000 to 3400m/sec, the detonation pressures measured seem to be slightly higher than those calculated.

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japan.)

### ニュース

#### Du Pont の黒色火薬プラントは再開されない

Du Pont は Pa の Moosic にある工業用黒色火薬プラントを再開しない、しかしこの設備は直ちに軍用に完成されるであろう。この設備は最近の爆発で損傷を受けたが今までアメリカで私立で唯一の黒色火薬製造工場であった。Du Pont の4つのダイナマイト工場の内2つは今年閉鎖された。

(Oil Paint & Drug Reporter 7-26-71 p22)

木村 真

#### 火薬検知機分析器の開発

イスラエル Rvhovath の Hydronautics-Israel Ltd はポータブルの火薬検知機を開発した。微量の

ガス分析器も同じようなものと考えることができる。新製品はイスラエル以外の他の国でも利用できるであろう。USのある会社がまだこの国も利用していないこの検出機の開発を検討している。メタルデテクター（金属検知機）は弾丸や金属製爆弾に有効であるが火薬の検知には有効でない。イスラエルの会社では空気の試料をガスクロマトグラフを基にした検知法を用いる。温度規制をすることにより表われていないものの検出を調整することができる。重量は60 lb で価格は17,500~19,400ドルである。

(Chem & Eng News. 7-5-71 p.9)

木村 真