

報 文

穿孔径と装薬径との発破効果に及ぼす
影響に関する一考察

(昭和31年3月31日受理)

村 田 勉・田 中 一 三

(日本油脂株式会社武蔵工場)

§ 1. 緒 言

爆破作業を行うに当つては、先ずその条件に適した爆薬の種類とサイズを選択する必要がある。これの基準とすべき爆薬の性能に関しては前報¹⁾に述べたが、サイズの決定については又別の観点から考えなければならない。しかし現在の所、爆薬のサイズの効果についてはまとまった研究報告が見られないので、筆者等はここに簡単なが一応の参考資料を得るために、穿孔径とそれに挿入すべき爆薬の径との発破効果に及ぼす影響について、理論的な考察を加えることとする。

§ 2. 軽装填の場合の爆破係数

前報¹⁾に於て筆者等の論じたものは、爆薬の装填密度がそのまま爆薬密度に等しい場合であつて、これは穿孔径と爆薬径との等しい、いわゆる密装填(density loading)にあたる場合である。一般には爆薬径が穿孔径よりも小さいところの軽装填(file loading)が多いので(図1)、これに対して考察を加える必要がある。

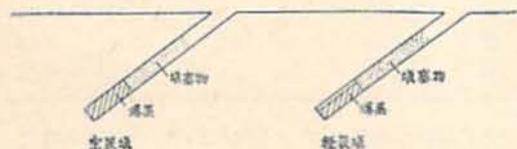


図1 密装填と軽装填

今薬径を d_a 、ボアホール径を d_0 、薬長を l とすると、爆薬を球形としたときの等価半径 a_0 及びボアホール全体の等価半径 a_b は、次の関係式によつて結び付けられることになる。

$$(4/3) \pi a_0^3 = (\pi/4) d_a^2 l$$

$$(4/3) \pi a_b^3 = (\pi/4) d_0^2 l$$

$$\therefore (a_0/a_b)^3 = (d_a/d_0)^2 \dots \dots \dots (1)$$

そしてこの a_0 が前報に於ける a_0 に相当し、この外側に圧縮半径 a_1 及び粉砕半径 a があり、これらはそれぞれ次の式で与えられる。

$$a_1 = (1 + k_1 \rho_0^2 \rho_0) a_0 \dots \dots \dots (2)$$

$$a = (1 + k_2 \rho_0^2 \rho_0) a_0 \dots \dots \dots (3)$$

ここに q_0, ρ_0 は、それぞれ等価半径 a_0 なる点に於けるガス流動速度及びガス密度である。

爆薬表面のガス噴出速度 q_0 は、前報にも示したように爆速を D とするとき

$$q_0 = D \sqrt{\frac{(1 - \alpha \rho_0)(\gamma - \alpha \rho_0)}{\gamma^2 - 1}} \dots \dots \dots (4)$$

で表わされる。一方ガス流動速度の距離による減衰の様相は、村田²⁾の研究より

$$\left(\frac{r}{r_0}\right) \frac{q}{q_0} = \exp\left[-\frac{1}{2}\left\{1 - \left(\frac{q}{q_0}\right)^2\right\}\right]$$

で与えられる。ここに r, r_0 は距離で、それぞれ流動速度 q, q_0 なる点に対応する。上式は $(r/r_0) = 2.0$ 以下では、近似的に

$$q = q_0 (r_0/r)^2 \dots \dots \dots (5)$$

と書くことができるので、筆者等は半径 a_0 なる点に於けるガス流動速度として

$$q_0 = q_0 (a_0/a_b)^2 = q_0 (d_a/d_0)^2 \dots \dots \dots (6)$$

を得ることができる。他方 ρ_0 に関しては、最初の爆轟ガス密度 ρ_0 を用いて質量の保存式

$$q_0 \rho_0 a_0^2 = q_0 \rho_0 a_0^2$$

より

$$p_0 = p_0 (d_0/d_0)^2 \dots \dots \dots (7)$$

が求められる。

以上の結果から爆破係数 c を求める手続きは、前報¹⁾ §4 と同じ順序で行うことができる。

先ず

$$a_0 = (3L/4\pi\rho_0)^{1/3}$$

と(1)式から得られる

$$a_b = a_0 (d_b/d_0)^{2/3}$$

を(3)式に代入して

$$a = (1+k_2q_0^2\rho_0) (d_b/d_0)^{2/3} a_0 \dots \dots \dots (8)$$

を得る。これを標準装薬の条件式

$$(a/2w)^3 p = \sigma_t / 0.55 \dots \dots \dots (9)$$

に代入すれば

$$\frac{3}{4\pi} \frac{L}{\rho_0} \frac{(1+k_2q_0^2\rho_0) (d_b/d_0)^2}{8w^3} p = \frac{\sigma_t}{0.55}$$

$$\therefore L = \frac{32\pi\sigma_t}{3 \times 0.55 p} \frac{w^3 \rho_0}{(1+k_2q_0^2\rho_0)^3 (d_b/d_0)^2}$$

となり、Hauser の公式

$$L = cw^3$$

と比較すれば爆破係数 c として

$$c = \frac{6.09 \times 10^4 \sigma_t}{p} \frac{\rho_0}{(1+k_2q_0^2\rho_0)^3 (d_b/d_0)^2} \dots \dots \dots (10)$$

が得られる。ここで前報と同じく、 L を kg 、 w を m の単位にするために、 c にはあらかじめ 10^3 が乗じてある。

最後に p の計算が残るが、これには Abel-Noble の式

$$p = fL / (V - \alpha L) \dots \dots \dots (11)$$

を用いて先ずボアホール内の圧力 p_0 を求めると、 $p_0 = fL / (V_0 - \alpha L)$ に於て $V_0 = (\pi/4) d_0^2 l$ 、 $L = (\pi/4) d_0^2 l \rho_0$ と置けばよく、これから

$$p_0 = \frac{f \rho_0 (d_0/d_0)^2}{1 - \alpha \rho_0 (d_0/d_0)^2} \dots \dots \dots (12)$$

を得る。(12) 式の p_0 は、いわば等価半径 a_0 なる球内の圧力であり、(10) 式中の p は半径 a_1 なる球内の圧力であることを考えれば

$$p = p_0 \left(\frac{a_0}{a_1} \right)^{3\gamma} = \frac{p_0}{(1+k_1q_0^2\rho_0)^{3\gamma}} \dots \dots \dots (13)$$

が得られ、これらを(10)式に代入すれば

$$c = 6.09 \times 10^4 \sigma_t \frac{1 - \alpha \rho_0 (d_0/d_0)^2}{f} \frac{(1+k_1q_0^2\rho_0)^{3\gamma}}{(1+k_2q_0^2\rho_0)^3}$$

となる。更に q_0 、 ρ_0 には、(6)、(7) 式を用い、前報を参照して $\alpha = 0.5$ と置けば、結局軽装填の場合の爆破係数 C を与える公式として、次式が得られることになる(軽装填であっても填塞は充分行われているとするのはもちろんである)。

$$C = 6.09 \times 10^4 \sigma_t \frac{1 - 0.5 \rho_0 (d_0/d_0)^2}{f} \times \frac{\{1+k_1q_0^2\rho_0 (d_b/d_0)^{10/3}\}^{3\gamma}}{\{1+k_2q_0^2\rho_0 (d_b/d_0)^{10/3}\}^3} \dots \dots \dots (14)$$

上式右辺の左側の分母は、 d_b/d_0 の増加に伴って大きくなるが、右側の分母は、 d_b/d_0 が大きくなるとあるところまでは小さくなる性質を持っている。従って上式のみからでは密装填と軽装填との場合の、爆破係数の比較は困難である。これは実際に数値的に当ててみなければわからない。

§ 3. 装填直径比を変えた場合の爆破係数の計算例

次に(14)式を用いた計算例として、前報に引用した4種類の爆薬 A, B, C, D について

- (i) 密装填 $d_b = 36\text{mm}$
 $d_0 = 36\text{mm}$ $d_b/d_0 = 1.0$
- (ii) 軽装填 $d_b = 36\text{mm}$
 $d_0 = 30\text{mm}$ $d_b/d_0 = 1.2$

の二つの場合の爆破係数を計算してみよう。但し式中の ρ_0 としては、爆薬の仮比重 λ の値をそのまま用いる。

表1 供試爆薬の特性

薬種	f l-kg/cm ²	D km/sec	ρ_0 kg/l	q_0 km/sec	$q_0^2 \rho_0$
A	7,010	3.8	1.15	2.75	8.68
B	8,650	5.4	1.45	2.77	11.10
C	9,350	4.4	1.11	3.30	12.09
D	9,370	3.9	1.00	2.96	8.76

先ず爆薬の特性は表1の如くであり、岩石の特性は

$$\sigma_t = 2.33, \quad k_1 = 0.0574, \quad k_2 = 0.141$$

とする。これ等は何れも前報¹⁾ §7 の実験例に基づくものである。計算の方法は(14)式にこれ等の数値を代入するだけで簡単であるから、結果のみを書くと次のようになる。

即ちどの爆薬も軽装填を行うことにより、爆破係数

表2 装填直径比を異にするときの
各爆薬の爆破係数

薬種	C (密装填) $d_b/d_0=1.0$	C (軽装填) $d_b/d_0=1.2$	増加%
A	3.56	4.04	10.7
B	1.70	2.56	50.6
C	2.48	2.98	20.2
D	3.12	3.29	5.5

O が大きくなり、爆破効果を減ずることがわかる。この傾向は、特に比重の大きい爆薬Bに於て著しい。

(d_b/d_0) の変化に伴う O の変化は、(14)式の両辺を対数微分した次式で表わされる。

$$\frac{\delta O}{O} = \left[\frac{\rho_0 (d_b/d_0)^3}{1 - 0.5\rho_0 (d_b/d_0)^{10.3}} + 10q_0^2 \rho_0 (d_b/d_0)^{7.3} \right. \\ \times \left. \left\{ \frac{\gamma k_1}{1 + k_1 q_0^2 \rho_0 (d_b/d_0)^{10.3}} - \frac{k_2}{1 + k_2 q_0^2 \rho_0 (d_b/d_0)^{10.3}} \right\} \right] \delta \left(\frac{d_b}{d_0} \right)$$

この式で δO がマイナスになること、即ち爆破係数が減少するようなことは、普通の発破条件では起り得ない。従つて一般には、装填直径比の大きくなるほど爆破係数も大きくなり、発破効果は低下するものである。この関係をはつきりさせるために、今表2で計算した爆薬のうちA, Bを選んで、これらの爆破係数が d_b/d_0 の変化とともに如何に変わるかを、もつと詳しく計算してみると、次の表3のようになる。

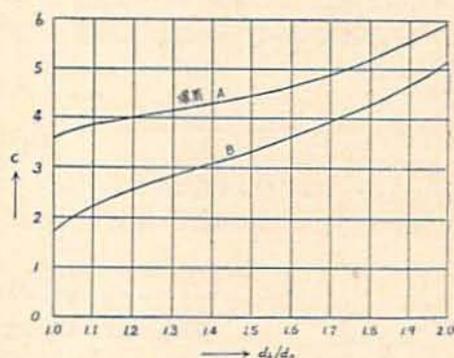
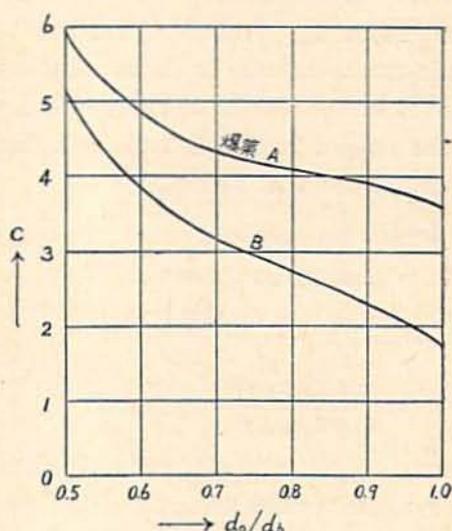
表3 装填直径比を広範囲に変えたときの
爆破係数の変化

d_b/d_0	爆薬 A		爆薬 B		C
	第1分数	第2分数	第1分数	第2分数	
1.0	0.606	0.415	0.318	0.378	1.70
1.1	0.747	0.365	0.464	0.340	2.24
1.2	0.857	0.329	0.571	0.316	2.56
1.3	0.942	0.312	0.661	0.303	2.84
1.4	1.009	0.300	0.729	0.299	3.10
1.5	1.061	0.295	0.784	0.299	3.34
1.6	1.109	0.296	0.830	0.311	3.66
1.8	1.167	0.316	0.889	0.339	4.27
2.0	1.222	0.342	0.946	0.386	5.18

表には(14)式中の二つの分数の数値を並記しておいた。これで見ると d_b/d_0 の増加に伴い、(14)式の第1の分数は増加の一途をたどるが、第2の分数は最

初の間は減少し、やがて極小点に達して後は増加することがわかる。従つてこれ等の積である O は、変曲点を持った増加函数である(図2)。

図2から、逆に d_b/d_0 に対する O の変化を図示すれば図3の如くなる。これは穿孔径一定の場合、薬径を変化させたときの爆破係数の変化であつて、発破の實際家が穿孔径と薬径とを選定する際、参考になるものである。

図2 装薬径に対し穿孔径を大きくした
場合の爆破係数の変化図3 穿孔径に対し装薬径を逐次大きくした
場合の爆破係数の変化

§ 4. 結 論

筆者等は、岩石発破に於ける穿孔径とこれに装填する装薬径との関係が発破効果に如何に影響するかについて理論的考察を加え、次のような結果に到達した。

1) 穿孔径 d_0 より装薬径 d_b が小さい軽装填の場合

合には、爆破係数 O は、岩石、爆薬の特性とともに次式で表わされる。

$$O = 6.09 + 10^4 \sigma_t \frac{1 - 0.5 \rho_0 (d_0/d_b)^2}{f} \times \frac{\{1 + k_1 q_0^2 \rho_0 (d_0/d_b)^{10.3}\}^{27}}{\{1 + k_2 q_0^2 \rho_0 (d_0/d_b)^{10.3}\}^3}$$

ここに σ_t は岩石の引張り破壊係数、 k_1, k_2 は岩石の圧縮、粉砕係数、 f は爆薬の火薬力、 ρ_0 は最初の爆薬ガス密度 (仮比重 Δ に等しい)、 q_0 は爆轟ガスの薬包よりの噴出速度である。 q_0 は次式で爆速 D と結び付いている。

$$q_0 = D \sqrt{\frac{(1 - \alpha \rho_0)(\gamma - \alpha \rho_0)}{\gamma^2 - 1}}$$

α = ボリウム、 γ はガスの比熱比である。

2) 軽装填の場合の爆破係数は、本文中の事例にも

示したように密装填に比して大となり、発破は密装填の方が効果的であることがわかる。

筆者等はここに一つの試みとして、穿孔径と装薬径が発破効果に及ぼす影響について理論的取扱いを行つてみたが、これについては装填直径比をいろいろ変えた発破試験を、実際に行つてみられることが望ましい。又この問題に関しては、別の観点からの理論的考察も考えられるので、更に多くの理論的並びに実験的研究のなされることを希望する。

文 献

- 1) 村田勉・甲中一三：工火協誌 12, No. 1, 18 (1956).
- 2) 村田勉：火研報乙第 145 号, 「爆発衝撃波の伝播に関する研究」(1938).

Effect of the Diameters of Bore-hole and Explosive Charge on the Rock Blasting.

by Tsutomu Murata and Kazumi Tanaka

In the previous paper,¹⁾ we have introduced a formula to calculate the blasting coefficient in the case of density loading.

Let L be the weight of charge (kg), w be the line of least resistance (m), then we obtain the next formula

$$L = cw^3 \dots\dots\dots (1)$$

and the blasting coefficient c is

$$c = 3.58 \times 10^4 \frac{\sigma_t (1 - 0.5 \Delta)}{f} \cdot \frac{(1 + k_1 q_0^2 \Delta)^{27}}{(1 + k_2 q_0^2 \Delta)^3} \dots\dots\dots (2)$$

where

- σ_t : the tensile strength of the rock to be blasted
- k_1 : the compression coefficient of the rock
- k_2 : the crushing coefficient of the rock
- f : "force" or the specific energy of the explosive
- Δ : the cubic density of the explosi-

ve
 q_0 : the initial velocity of the explosion gases from explosive
 and q_0 is combined with the detonation velocity D as follows,

$$q_0 = D \sqrt{\frac{(1 - \alpha \Delta)(\gamma - \alpha \Delta)}{\gamma^2 - 1}} \dots\dots (3)$$

where α is the covolume of explosion gases, and γ is the ratio of specific heats of them.

Now, in the case of file loading, the diameter of charge is smaller than that of bore-hole, so there is free space surrounding the charge.

Therefore, the coefficient of blasting c should be larger than that calculated from the formula (2). Let d_b be the diameter of bore-hole, d_0 be the diameter of charge in it, then we get the coefficient of blasting c as follows,

$$c = 6.09 \times 10^4 \sigma_t \frac{1 - 0.5 \rho_0 (d_0/d_b)^2}{f}$$

$$\times \frac{\{1+k_1 q_0^2 \rho_0 (d_b/d_0)^{10/3}\}^{3/2}}{\{1+k_2 q_0^2 \rho_0 (d_b/d_0)^{10/3}\}^3} \dots (4)$$

where ρ_0 is the initial density of explosion gases and is regarded approximately as the density Δ of explosive itself.

As an example, we will calculate the case of some blasting for a rock using a special explosive.

The properties of the explosive are

$$f=8,650 \text{ l-kg/cm}^2$$

$$D=5.4 \text{ km/sec}$$

$$\rho_0=1.45 \text{ kg/l}$$

$$q_0=2.77 \text{ km/sec}$$

And the mechanical properties of the rock are

$$\sigma_t=2.33$$

$$k_1=0.0574$$

$$k_2=0.141$$

Then the blasting coefficients of density loading and file loading are as follows,

$$(1) \text{ density loading } (d_b/d_0=1.0)$$

$$e=1.70$$

$$(2) \text{ file loading } (d_b/d_0=1.2)$$

$$e=2.56$$

The above explosive is a gelatinous dynamite.

In the case of powdery explosive of lower density, the difference between the blasting coefficients of density loading and of file loading is not so much large as in the case of gelatinous dynamite above cited.

- 1) T. Murata, K. Tanaka: J. Ind. Expl. Soc., Japan, 12, No. 1, 18 (1956)
(Nihon Yushi Co., Ltd. Taketoyo Plant)

電氣雷管に関する研究 (第5報)

(昭和31年5月10日受理)

木下四郎・加藤清視・有村武人

(日本化薬株式会社 折尾作業所火工品研究課)

緒 言

電氣雷管を使用して発破^{1), 2), 3), 4)}を行つた際往々にして不発残留となる電氣雷管があるが、この原因は色々あり、大別すれば次の三つに分けられる。その一つは電氣雷管本来の故障、即ち電橋の断線、抵抗の異常、点火玉の故障、耐水性の欠陥等であり、その二は使用上のミス^{4), 5)} 或は不完全な結線、モンピングの蒸脚線に傷をつけること等であり、その三は電源不足で発破器の出力不足等であることはよく知られている。

我々が不発残留となつたものを調べてみると電氣雷管は全然異常ない場合が多いのであるが、これは前記のその二、その三の原因に起因する残留が多いからである。このうちその二の潮流電流ある場合については

既に電氣雷管の研究(第4報)⁶⁾に於いて述べたがその三の原因である電源不足の場合の電氣発破について検討した結果を報告する。例えば或鉱山で残留雷管が比較的多かつたのでその原因を色々調べてみたが電氣雷管自体には故障は見られず母線、結線法、漏電に対する考慮等も充分であつたが、たまたま使用しているコンデンサー式発破器のネオンランプ点灯電圧を測定したところ500Vで点灯するのが定格であるにも拘わらず400V位で点灯するものがあることが分つた。400Vで充電した場合と500Vで充電した場合とではエネルギー的には電圧の自乗の比となるので後者は前者の1.5倍となるので不発残留を生じた主な原因は400Vで点灯する発破器を使用したためだろうと推定される。そこで残留防止対策として400Vで点灯するものは500Vで点灯する様に発破器を調整すれば不発