

〔7〕 最大腔圧点の計算

最大腔圧点の位置は区間 (0, 1) にあることが〔6〕の計算にて知られる。(23) 式より

$$k_m = \frac{e(1+F) - f(1+E)}{E+F+2}$$

e, f, E, F に区間 (0, 1) に応ずる値を用いて

$$k_m = \frac{1153 \times (1+0.07946) + 0.17(1+5.847)}{5.847+0.079+2} = 157$$

この値を(12)式に代入して

$$c_m - \eta\omega = 1.652, \quad c_m = 2.532$$

k_m, c_m の値を(20)式に代入して

$$P_m = 187800$$

を得る。以上によつて計算された弾道諸元を図示すると次の如くなる。(前頁参照、但し P は kg/cm^2 にて示す)

V. 結 論

以上によつて特徴数を異にする多数の火薬を混合し

て一つ装薬とした場合の砲内弾道解法が得られた。而してこの解法に当つて仮定として $\eta = \frac{1}{8}$ を用いたが、之は Charbonnier の解法²⁾ に於いて暗に用いられたところであつて解法の理論的精度を甚しく低下することはないであらう。即ちこの解法は従来の解法の精度を概ね保存しつつ更に多種火薬の混合装薬の解法に適する如く拡張したものである。また算例に於いて知り得る如くその計算は極めて簡単実用的と思考せられる。

以上の解法を連続的に拡張すれば恐らくは黒色火薬に適合すべき理論式が得られるのではあるまいか。この点は爾後の研究に俟つ。

文 献

- 1) 山家信次, 増田信男: 火薬燃焼の幾何学的関係について, 火兵学会誌, 26. 13 (昭和8年)
- 2) 山家信次, 砲内弾道学講義: 第二篇第VI章 Charbonnier の弾道学

新発破理論の実際面への適用

—引張り主応力破壊説—

(昭和31年1月20日 受理)

村 田 勉・田 中 一 三

(日本油脂株式会社武豊工場)

§1. 緒 言

岩石発破の際の破壊現象はかなり複雑なもので、一般にはこれを理論的に解析することは相当面倒であり、簡単な二、三の数式を以て律し得られるものではない。先に筆者等¹⁾、自由面を有する発破の問題を力学的に考究し、先ず発破の微分方程式をたててこれを適当な境界条件の下になるべく厳密に解き、岩石内の各点に於ける主応力の大きさと、その方向を求めることが出来た。そして破壊の要因が引張り主応力であることを前提として、普通の産業爆破の場合の一自由面発破では、漏斗指数が 1.3~1.4 附近になるような設計が最も経済的と言ふことを明らかにした。

今回はその報告を基礎として、更に実用面に進展させた結果について報告する。これによれば漏斗孔の形状はもちろん、普通発破から小割発破、大発破に至る各種の発破方式、更には高圧気体を利用する発破に対

しても、これらに伴う諸現象とともにそれぞれ満足な説明を与えることが出来て、一つの新しい発破理論を形成することが出来る。

§2. 標準装薬の条件

前報に於て、筆者等は球状装薬、一自由面発破の場合に、岩石内に発生する主応力分布を計算し、図1の如き結果を得た。そのとき境界条件として、岩石に体積変化のない場合は、普通に用いられている所の自由面に於ける条件、即ち垂直応力 $\sigma_{nn} = 0$ を用いたが岩石に体積変化を考える一般の場合では、特に自由面のみで dilatation (体積変化) $\theta = 0$ を用いた²⁾。これは理論に新しさを導入するものであるが、発破現象が極めて短時間であつて、自由面では僅かの体積変化が破壊をもたらすと考えられるからである。

図1で矢印は圧縮主応力の方向を示し、引張り主応力はこの線に直角である。従つて前報では引張りによ

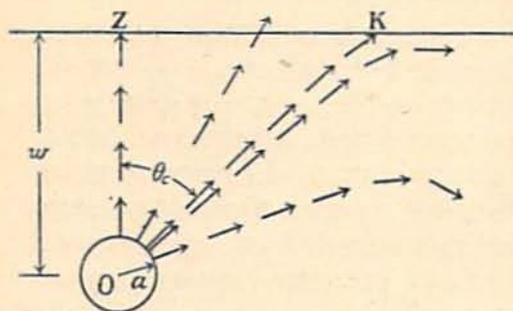


図1 発破の際の応力分布

つて生ずる亀裂の方向が、図の矢印の方向に一致することを述べておいた。

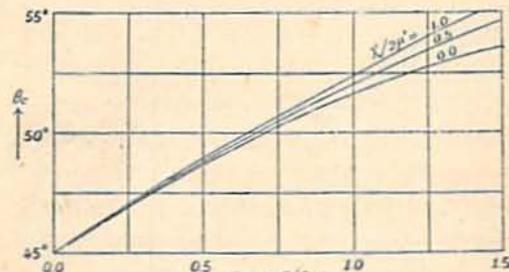
K点は漏斗孔の淵点と仮称するもので、その位置は $\angle ZOK$ を θ_c とすると

$$\theta_c = \sin^{-1}$$

$$\sqrt{\frac{1+3(a/2w)^2-3(a/2w)^2(1+\lambda'/2\mu')-18(a/2w)^3}{2-18(a/2w)^3}} \quad (2.1)$$

で与えられる。ここに w は最小抵抗線、 a は爆発圧の作用半径(装薬半径とは必ずしも一致しない)、 λ' 、 μ' は筆者等が拡張された Laméの常数と呼んだものである。図で θ_c より小さい角度を以て O を出る亀裂は、方向を示す矢印をたどって自由面に達することが出来るが、 θ_c より大なる角度のものではそれが不可能になる。従つてこれを逆に考えれば、如何に強力な爆薬を使用しても、薬量を増して a を大きくしない限り、漏斗孔は OK を結んだ亀裂線より外側には生じ得ないことになる。即ち K は漏斗孔の淵点となる点であり、これが K 点を淵点と呼んだ理由である。

K 点の位置は式(2.1)より明らかな如く、最小抵抗線 w が一定ならば、作用半径 a によつて変り、 a の大きい程漏斗孔も大きくなる可能性がある(図2)。しかし淵点 K を与える θ_c が如何に大きくなつても、爆薬の力が OK 線の全長に亘つて亀裂を生じさせる

(横軸の目盛は 10^{-1} 倍して読む)図2 $a/2w$ の変化に伴う θ_c の変化

に充分でなければ、これがそのまま真の漏斗孔にはなり得ない。また前述の如く、爆薬の力が如何に強大でも、(2.1)式で与えられる θ_c より大きな漏斗孔は出来ないのであるから、爆薬の力が丁度 OK 線に亀裂を生じさせるに必要にして充分なときが、最も有効且つ経済的な発破ということが出来るわけである。換言すれば、これが標準装薬の条件に外ならない。

OK 線の上では、爆源から最も遠い K 点の受ける応力が最小であるから、標準装薬の条件には K 点での破壊条件を用いばよく、 K 点の引張り応力は、(2.1)式で得られる θ_c を使つて

$$\sigma^K = 4 \left(\frac{a}{2w} \right)^3 p \cos^3 \theta_c \sin^2 \theta_c \quad (2.2)$$

と書くことが出来る。上式は前報の (10.4) 式

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{3p}{2} \left(\frac{a}{w} \right)^3 \cos^3 \theta \left\{ -\frac{2}{3} - 2 \left(\frac{a}{2w} \right) \right. \\ &\quad \left. + 2 \left(\frac{a}{2w} \right)^2 \left(1 + \frac{\lambda'}{2\mu'} \right) + 12 \left(\frac{a}{2w} \right)^3 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \right\} \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{3p}{2} \left(\frac{a}{w} \right)^3 \cos^3 \theta \left\{ \frac{1}{3} + \left(\frac{a}{2w} \right) \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{a}{2w} \right)^2 \left(1 + \frac{\lambda'}{2\mu'} \right) - 6 \left(\frac{a}{2w} \right)^3 \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \right\} \end{aligned}$$

の何れかに、(2.1)式を代入すれば得られる(K 点では $\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta}$ が成り立つ)。

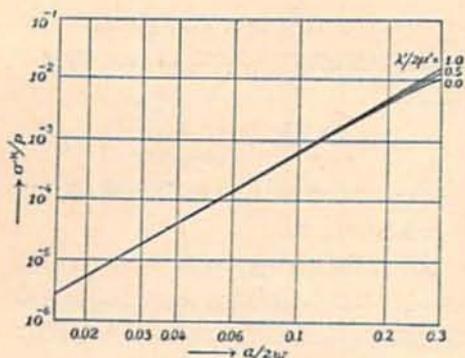
(2.2)式中の θ_c は(2.1)式によつて $a/2w$ の函数であるから、(2.2)式は結局 $a/2w$ の函数になる。これを明らかにするため、 $a/2w$ の各値について(2.2)式の数値計算を行つてみると、表1の如き結果が得られ、これを対数グラフに表わした図3から、(2.2)式の近似式として

$$\sigma^K = 0.55 \left(\frac{a}{2w} \right)^{2.9} p \quad (2.3)$$

の成り立つことがわかる。従つて岩石の引張り破壊係

表1 $a/2w$ 対 σ^K/p の計算結果

$\frac{a}{2w}$	σ^K/p		
	$\lambda'/2\mu'=0$	$\lambda'/2\mu'=0.5$	$\lambda'/2\mu'=1.0$
0.02	5.46×10^{-6}	5.48×10^{-6}	5.58×10^{-6}
0.04	4.21×10^{-5}	4.22×10^{-5}	4.26×10^{-5}
0.06	1.35×10^{-4}	1.36×10^{-4}	1.37×10^{-4}
0.08	3.05×10^{-4}	3.08×10^{-4}	3.11×10^{-4}
0.10	5.64×10^{-4}	5.75×10^{-4}	5.87×10^{-4}
0.15	1.65×10^{-3}	1.74×10^{-3}	1.82×10^{-3}
0.20	3.40×10^{-3}	3.84×10^{-3}	4.23×10^{-3}
0.25	6.01×10^{-3}	7.43×10^{-3}	8.71×10^{-3}
0.30	9.90×10^{-3}	1.38×10^{-2}	1.71×10^{-2}

図3 $a/2w$ 対の $\sigma K/p$ 対数グラフ

数を σ_t とすれば

$$\frac{\sigma_t}{0.55} = \left(\frac{a}{2w}\right)^3 p \quad (2.4)$$

がK点に亀裂の発生する条件、即ち換算すれば標準装薬の条件ということになる。

ここで岩石内に生ずる亀裂の形状について一言述べよう。この理論では、図1からも明らかな如く、発破の際に現れる亀裂は爆源から放射状を呈して拉がることが推定され、これはまた高速度写真による矢張発破の現象の解析結果³⁾とも一致するのである。

§3. 装薬孔周壁の拡大及び粉碎層

前報にも述べた如く、発破の際に現れる爆源附近の様相は、次の三つの層に分けて考えることが出来る(4図)。

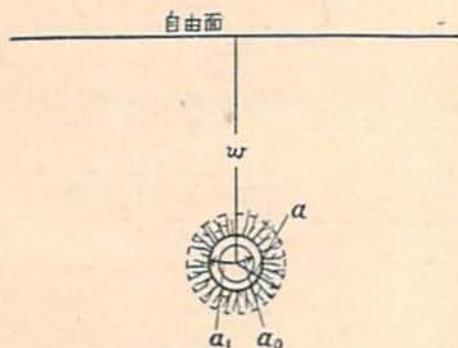


図4 爆源附近の状態

(i) 装薬半径 a_0 これは装薬を球形と見做したときの半径で、薬量を L 、装薬比重を d とすれば

$$a_0 = \left(\frac{3}{4\pi} \frac{L}{d}\right)^{1/3} \quad (3.1)$$

に相当する。

(ii) 拡大層半径 a_1 爆発によって押し拉げら

れた半径で、 $r=a_0$ なる点の変位が $a_0 pa/4\mu'$ であることから

$$a_1 = (1 + pa/4\mu') a_0 \quad (3.2)$$

に等しい。ここに pa は爆薬の猛烈的な性質に関係した量で、動圧と呼ばれるものである。

(iii) 粉碎層半径 a 動圧によって拡大された装薬半径の外側に、更に岩石の粉碎された層がある。この層は極めて微粉碎された岩石から成り立っているのので、この内面に圧力が作用すれば、一時的にはこの層が流体の如く均等に圧力を伝達すると考えられる。従つてあとから拡大半径 a_1 の内壁に作用する静圧 p はそのまま粉碎層半径 a の内壁に作用する如く見做される。この半径が前節まで述べて来た作用半径 a である。この値もまた動圧によって決まると考えられるので

$$a = (1 + epa) a_0 \quad (3.3)$$

と置くことが出来る。ここに e は岩石の特性によって定まる一つの定数である。

さて漏斗孔の形状を定める式(2.1)及び標準装薬の条件式(2.4)は何れも粉碎半径 a 及び圧力 p を含んでいる(p の計算には後述の如く拡大半径 a_1 を必要とする)ので、ここで(3.2)及び(3.3)式の内容を詳しく調べておく必要がある。これらの式中に現れる動圧 pa は、爆薬から噴出するガスの速度及び密度によって定まるべきものであるから、ディメンション的に考えて $pa \propto q^2 d$ とおくことが出来る。ここに q は薬柱よりのガスの噴出速度である。従つて(3.2)、(3.3)式はそれぞれ

$$a_1 = (1 + k_1 q^2 d) a_0 \quad (3.4)$$

$$a = (1 + k_2 q^2 d) a_0 \quad (3.5)$$

と書くことが出来る。ここに k_1, k_2 は $1/4\mu'$ その他を含んだ岩石の特性に関する定数で、言わばそれぞれ圧縮係数、粉碎係数とも呼ぶべきものである。

爆発生成ガスの薬柱からの有効噴出速度 q に関しては、村田⁴⁾の理論式

$$q = \sqrt{\left(\frac{\gamma}{\gamma-1} + \frac{\alpha d}{1-\alpha d}\right) 2R_2 T_0} \quad (3.6)$$

を採用する。ここに γ はガスの比熱比、 α はコポリウム、 R_2 は爆発生成ガスの気体定数、 T_0 は爆発温度である。 $R_2 T_0$ を火薬力 f に等しいと置き、理想爆速に関する Jouguet の式⁵⁾

$$D = \frac{1}{1-\alpha d} \sqrt{(\gamma+1)2f} \quad (3.7)$$

を組合わせると、(3.6)は

$$q = D \sqrt{\frac{(1-\alpha d)(\gamma-\alpha d)}{\gamma^2-1}} \quad (3.8)$$

このことは過装薬のときの爆点が、あくまで最初の爆源の位置から決定されることによる。

上述の如く試験発破が過装薬であつたときには、予め爆破係数 σ がわかつていないと、岩石の特性を知る手がかりが握めない。この間の事情は後述の弱装薬についても同じである。爆破係数 σ は、試験発破が丁度標準装薬で行われれば簡単に求められるが、それ以外の場合には算出しにくいように思われる。しかし実際には、過装薬又は弱装薬であつても、爆破係数 σ に関する大凡の値は推定出来るのであつて、それは次の弱装薬の項で述べることにする。

§6. 弱装薬発破

弱装薬発破に関して、前報²⁾では定性的に触れたに過ぎないので、本報では少くも定量的な解析を行つてみる。図7に於て OB をボアホール、 O を爆源の位置、 w を最小抵抗線とすると、薬量 L が与えられればそれを球と見做したときの装薬半径 a_0 が定まり、これから (3.5) 式によつて a が求められる。所でこれらの w , a から、図2によつて θ_c 即ち漏斗孔の淵点の位置が決定されるが、一方そのときの p が (2.4) の破壊条件を満足しないと、こうして得られた淵点 K は実際の漏斗孔の淵点とはなり得ない。これがいわゆる弱装薬の場合にあたるのであるが、しからば弱装薬の漏斗孔は如何にして生成されるか、これについて筆者等は次の如くに考へている。

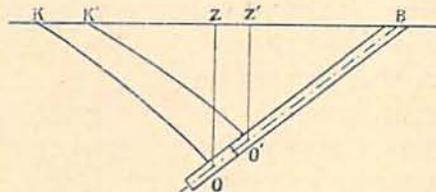


図7 弱装薬発破

最初の爆源 O から、上のようにして求めた淵点 K が破壊条件に満たないとき、爆発生成ガスは出口を求めて最も弱い方向、即ちボアホール OB の方向に逃げようとする。そしてガスが OB に沿うて上昇すれば、それにつれて圧力の作用点が変わつて最小抵抗線は短くなり、逆に圧力作用球の半径 a は、ガスの膨脹とともに増加する。従つて何時かはこれらが次の破壊条件式を満足するようになるであろう。

$$\left(\frac{a'}{2w'}\right)^3 p' = \frac{\sigma_r}{0.55} \quad (6.1)$$

上式で $'$ を附したものは、圧力作用点が O 点を離れ

たときの、それぞれ対応する量を表わすもので、 w' が前節図5の S にあたる。今 (6.1) 式が満たされたときの圧力作用点を O' とすれば、図7で示されるように $O'K'$ が漏斗孔の形状となるのである。

上述の考え方からみれば、弱装薬では標準装薬に比して見掛けの $a/2w$ (このときは $a'/2w'$) が大きくなるので、漏斗指数も大きくなる。また弱装薬ではボアホールの穿孔角度が、漏斗孔の形状に対して相当大きな因子になっていることもわかるであろう。これらは何れも実際の結果と、よく符合する所である。

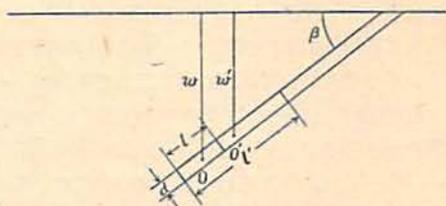


図8 弱装薬発破の際の圧力作用中心点の移動

以上述べたことを定量的に扱つると次のようになる。図8に於て最初の爆源を O 、実際に出来た漏斗孔から判定した作用圧力の中心を O' とし、その他の量は図に示した如くにとつとする。

O' を圧力の中心とした場合には、前述の (6.1) 式の破壊条件が満たされていた筈であるから

$$\left(\frac{a'}{2w'}\right)^3 p' = \sigma_r / 0.55 \quad (6.1)$$

が成り立つ。

図8で直径 d 、長さ l 及び l' なる円柱の体積をそれぞれ V , V' とすると、

$$V'/V = (a_0/a_0')^3 = (a_1/a_1')^3 = (a/a')^3$$

を仮定して、(6.1) 式の左辺は

$$\begin{aligned} \left(\frac{a'}{2w'}\right)^3 p' &= \left(\frac{a}{2w}\right)^3 p \cdot \left(\frac{a'}{a}\right)^3 \left(\frac{w}{w'}\right) \left(\frac{p'}{p}\right) \\ &= \left(\frac{a}{2w}\right)^3 p \left(\frac{w}{w'}\right)^3 \left(\frac{V'}{V}\right)^{7-1} \end{aligned}$$

となる。一方

$$2(w-w')/\sin\beta = l/l'$$

であるから

$$V'/V = l'/l = 1 + 2(w-w')/l \sin\beta$$

を得て、結局 (6.1) 式は

$$\left(\frac{a}{2w}\right)^3 p = \frac{\sigma_r}{0.55} \left(\frac{w'}{w}\right)^3 \left(1 + 2\frac{w-w'}{l \sin\beta}\right)^{7-1} \quad (6.2)$$

となる。

これから過装薬の場合の (5.2) 式に相当するものを導くには、弱装薬のときの漏斗孔が $a'/2w'$ で決まる

ことから、上式を変形して

$$\left(1 + 2 \frac{w-w'}{l \sin \beta}\right)^{7/3} = \left(\frac{0.55p}{\sigma_t}\right)^{1/3} \frac{a'}{2w'} \quad (6.3)$$

とする。右辺中の $a'/2w'$ は、弱装薬の漏斗指数 n' が測定出来れば図6から求めることが出来、左辺の w , $w'=S$ も測定出来るから、結局上式から、 p 及び σ_t の知識が得られるわけである。ここで弱装薬の漏斗指数 n' は過装薬のときのそれと違って、漏斗孔半径を、実際に出来た漏斗孔の深さで割つたものとしなければならない。これは弱装薬の淵点が、図7の O でなく O' を爆源として決定されるからである。

さて先に得た (6.2) 式は、また前節に導入した装薬適正率 i が

$$i = (0.55p/\sigma_t)^{1/3} \cdot (a/2w)$$

を満足することから

$$i^3 = \left(\frac{w'}{w}\right)^3 \left(1 + 2 \frac{w-w'}{l \sin \beta}\right)^{7-1}$$

と変形され、 $i^3 = L/cw^3$ を用いれば

$$L = cS^3 \left(1 + 2 \frac{w-S}{l \sin \beta}\right)^{7-1} \quad (6.4)$$

とすることが出来る。ここで前節にならつて $w'=S$ とおき直した。かくて (6.4) 式により、一般に薬量 L と最小抵抗線 w が与えられれば、弱装薬の場合は漏斗孔の深さ S とその他の発破の条件 l, β 等から爆破係数 e が算出出来ることになる。

特に簡単な場合として、標準装薬に極めて近いような弱装薬では、上式で $w=S$ として

$$L = cS^3 = cm^3 w^3$$

なる公式が得られる。ここに $m=S/w$ で定義される量で深度比と呼ばれ、一種の漏斗指数である。式中に m が3乗の形で現れているのは爆破の際のエネルギーが、岩石内に亀裂として3次元的に消費されると考えた所からくるものである。しかし実際に生成した亀裂を調べてみると、体積素片当りの亀裂数は爆源附近では大であるが自由面近くでは減少し、爆源を遠ざかるにつれて爆源から漏斗孔壁に沿うた亀裂のみが主力となつて、言わば2次元的な拉がりを持つと考えられる。従つて e の推定には上式の m を2乗置にとつた方が事実に近いようである。即ち

$$L = cm^2 w^3 \quad (6.5)$$

である。(6.5) 式で L, m, w は何れも試験発破の結果実測出来る量であるから、われわれはこれにより爆破係数 e の推定を行うことが出来る。尙この考え方は、山本教授の著書²⁾にも現れている。

(6.5) 式は標準装薬に近い弱装薬について成り立つ

ものであるから、著しい弱装薬では (6.4) 式に替つて計算することが必要である。(6.4) 式は同じ形に書いて

$$L = cm^2 \left(1 + 2 \frac{w-S}{l \sin \beta}\right)^{7-1} w^3 \quad (6.6)$$

とすることが出来る。

過装薬に関してもそれが著しい過装薬でない限り、やはり (6.5) 式に到達することが想像される。但し過装薬では $m > 1$ なるに反し、弱装薬では $m < 1$ である点が異なる。標準装薬では $m=1$ なる故、(6.5) 式は Hauser の公式 $L = cw^3$ に還元される。

さて試験発破の解析に際し、漏斗指数 n を用いるか深度比 m を用いるかにつき一言しよう。主応力の方向は1図に示した如く淵点 K に近い外方では、自由面のすぐ下を自由面と平行に走る部分があるこの部分では自由面に垂直な引張り応力がそのまま作用することとなり、その上部は薄層のため抵抗力小さく、そのため薄い剝離を起し易い。従つて漏斗孔の淵の位置が不明確になり、漏斗指数 n が定めにくいことが多い。これに反し漏斗孔の深さ S は却つて定め易いから、寧ろ深度比 m を用いて発破試験結果を解析するのが合理的である。

§7. 試験発破の実例

以上述べたことから、試験発破による爆破係数並びに岩石の特性の計算を、実地について例示してみよう。次に挙げる表3, 表4は、ある鉱山の最硬岩に対し4種類の爆薬を用いて行つたクレータテストの条件及びその結果である。

先ず目的はこれら4種の爆薬について、爆破係数 e を求めることにある。爆破係数は表4のような成績が与えられれば、前述の (6.5) 式を用いて推定することは出来るのであるが、ここでは仮りに表4の成績が爆薬Aに関する No. 1~4 の4個しかないとして、残りの爆薬に関しては、直接 (4.11) 式から算出するという方法をとつてみよう。

A, B, C, D 4種の爆薬に関する主な性能は表5如くである。

表5のうち、実際に与えられるのは、 f, D, d のみで、残りはこれらの数値を用いて計算したものである。 P_0 は (4.10) 式より、 q は (3.8) 式から求められるが、 q の計算には $\gamma=1.25$, $\alpha=0.5$ (表2の計算値より平均をとる) とした。

表4の成績からまず (6.5) 式によつて爆破係数 e を推定する。この結果が表中 e (実験値) の行に書き

表3 試験発破の条件

試験 番号 No.	穿孔長 B (m)	穿孔 角度 B	薬種	薬量 L (kg)	薬長 l (m)	最 小 抵抗線 w (m)
1	0.91	40	A	0.40	0.36	0.46
2	0.75	40	A	0.40	0.36	0.38
3	1.13	45	A	0.60	0.54	0.61
4	1.11	44	A	0.60	0.54	0.62
5	0.86	41	B	0.45	0.32	0.45
6	1.02	41	B	0.45	0.32	0.55
7	0.89	40	C	0.40	0.38	0.42
8	1.03	45	C	0.40	0.38	0.59
9	0.86	46	D	0.40	0.36	0.48

表4 試験発破の成績

試験 番号 No.	最 小 抵抗線 w (m)	漏斗孔 の深さ S (m)	深度比 m	漏斗 指数 n	爆破係数 c	
					実験値	理論値
1	0.46	0.55	1.20	1.32	2.88	3.30
2	0.38	0.50	1.32	1.38	4.22	
3	0.61	0.39	0.64	0.94	3.50*	
4	0.62	0.61	0.97	1.26	2.60	
5	0.45	0.56	1.24	1.58	3.16	2.08
6	0.55	0.64	1.16	1.36	2.00	
7	0.42	0.50	1.19	1.40	3.80	2.22
8	0.59	0.33	0.56	0.91	2.65*	
9	0.48	0.45	0.94	1.11	4.12	

表5 爆薬の性能

爆薬	f (kg/cm ² -l/kg)	D (km/ sec)	d (kg/l)	P ₀ (kg/ cm ²)	q (km/ sec)	q ² d
A	7,010	3.8	1.15	21,000	2.75	8.68
B	8,650	5.4	1.45	37,700	2.77	11.10
C	9,350	4.4	1.11	26,500	3.30	12.09
D	9,370	3.9	1.00	22,800	2.96	8.76

入れている。表中*印を付したものは著しい弱装薬のため(6.6)式から計算したものである。この数字を見ると、同じ爆薬Aに関するNo.1~4の4個の数値の間にも、かなりばらつきのあることがわかる。従つて筆者等は爆薬Aの爆破係数として、この平均値 $c_A=3.30$ を用いてみよう。

(4.11)式による爆破係数 c の計算には、3個の未知数 σ_t , k_1 , k_2 を知らねばならないが、このうち k_1 は試験発破の底半径 a_1 を測定して求めることが出来る。即ち $a_1/a_0=1+k_1q^2d$ なる関係を利用する。筆者等は爆薬Aについて、 a_1/a_0 が測定によつて1.5な

ることを知つた。これから k_1 を算出すると

$$k_1=0.5/(2.75)^2 \times 1.15=0.0574 \quad (7.1)$$

となる。ここに k_1 の単位は、 q に km/sec, d に kg/l を使用して計算するものとした。

残る2個の未知数 σ_t 及び k_2 を知るためには、試験発破が過装薬であれば(5.2)式、弱装薬であれば(6.3)式を用いることになる。ここでは過装薬であつたNo.1の発破試験成績を用いてみると、先ずこの場合の装薬適正率 i は(5.1)式より

$$i=\frac{1}{w}\left(\frac{L}{\sigma}\right)^{1/3}=\frac{1}{0.46}\left(\frac{0.40}{3.30}\right)^{1/3}=1.08$$

となる。そして漏斗指数 n が1.32であることから、図6により相当する $a/w=0.105$ を得て、過装薬の関係式(5.2)に代入すれば

$$i=1.08=(0.55p/\sigma_t)^{1/3} \times 0.105$$

$$\therefore \sigma_t/p=5.11 \times 10^{-4} \quad (7.2)$$

を得る。次いで(4.6)式を用いれば

$$c=3.330=\frac{6.09 \times 10^4 \sigma_t}{p} \frac{d}{(1+k_2 q^2 d)^3}$$

$$=\frac{35.8}{(1+8.68 k_2)^3}$$

より

$$k_2=0.141 \quad (7.3)$$

が得られる。最後に σ_t は(7.2)式に(7.1)の数値を代入して

$$\sigma_t=5.11 \times 10^{-4} p=5.11 \times 10^{-4} p_0(1+k_1 q^2 d)^{3T}$$

$$=2.33 \text{ kg/cm}^2 \quad (7.4)$$

となる。ここで $T=1.25$ とした。

かくして爆破係数の計算に必要な岩石の特性、 σ_t 、はすべて求められたことになる。即ち

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

である。上の例では試験発破に過装薬の場合をとつたが、弱装薬の場合でもこの手続きは殆んど同じである。ただ(7.2)の所で σ_t/p を求めるもとの式が(5.2)の代りに(6.3)になるだけである。但しその時には、漏斗指数として n の代りに n' を用いなければならぬことは前節に述べた通りである。

さて上に得た岩石の特性値から(4.11)式

$$c=3.58 \times 10^{-4} \frac{(1-0.3d)\sigma_t}{f} \frac{(1+k_1 q^2 d)^{3T}}{(1+k_2 q^2 d)^3}$$

$$=6.09 \times 10^{-4} \frac{\sigma_t}{p_0} \frac{(1+k_1 q^2 d)^{3T}}{(1+k_2 q^2 d)^3} d$$

により、4種の爆薬の爆破係数を計算すると、次の如くなる。

$$c_A=3.30, \quad c_B=2.08$$

$$c_C=2.22, \quad c_D=2.74$$

この結果を(理論値)として表4に入れてみると、実験から(6.5)式を使つて得たものとかなりよく一致していることがわかる。爆破現象のようにばらつき易いものの中で、この程度の一致をみることは、充分理論の正当性を示しているものと考えられる。

§ 8. 引張り応力破壊説により説明が可能となる発破の諸現象

従来発破の理論としては、剪断破壊説や、弾性力学的応力破壊説や、衝撃波の反射張力破壊説などが発表されているが、筆者等の理論はそれらと全く異なり、引張り主応力による破壊が普通の工業発破の場合の主要素であり、他の要素による破壊は条件によつては起ることがあつてもそれは副次的なものに過ぎないと考えるものである。

此処でわざわざ普通の工業発破と言つたのは、例えば軍用の目的で戦車や軍艦の装甲板を貫くために、成程爆薬によるノイマン効果を利用する場合や、鉄板を破壊するために比較的少量の爆薬を張り付けてその反射面に衝撃を起させる場合等と本質的に異なる場合の爆薬の作用を考究するのが、筆者等の本論文の目的であるからである。

以下本節に於ては、従来の諸説によつては説明困難な発破の諸現象が、筆者等の力学的理論によつてよく説明し得ることを、10項目だけ述べてみたいと思う。

1. 最小抵抗線に沿つて亀裂の生ずること

図9の如く普通の発破に於ては、最小抵抗線に沿つて亀裂が生ずるが、これは例えば伊藤教授等⁹⁾の高速写真的研究でも明瞭であり、この亀裂は筆者等の引張り応力説によれば当然起るべきである。他の弾性力学説、衝撃反射説等では、この説明は困難である。何となれば、剪断破壊説では先ず爆源から自由面への45°角度で亀裂が生じなければならぬし、弾性力学説では爆源を中心とする同心円状の亀裂を生じなければならぬし、又衝撃反射説では爆源の鏡像の位置を中心とする同心円状の亀裂が生じなければならぬからである。

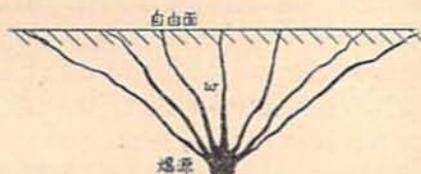


図9 発破の際の典型的な亀裂の様相

2. 弱装薬発破で漏斗孔が穿孔(bore-hole)に沿つて生ずること

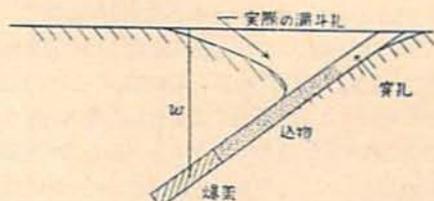


図10A 弱装薬の場合の漏斗孔の出来る位置

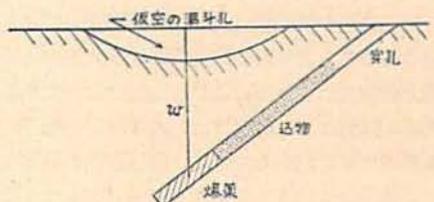


図10B 同上の場合の波動説による漏斗孔の位置

図10に示す如き弱装薬発破の場合には、Aの如く漏斗孔が出来て、Bの様には出来ない。筆者等の理論によれば、§6に述べた如く、当然図10Aの位置に漏斗孔が出来るとなる。然るに弾性力学説や衝撃反射説の如き波動説では、図10Bの如き位置に漏斗孔が出来なければならぬことになり、事実と合致しない。元来筆者等の力学的理論は発破の問題を解くにあたり、始めから自由面の位置を考慮し、それを重要な境界条件となすのに反し、弾性波の取扱いや衝撃波の取扱いは、何れも爆源より同心円状に圧力波が伝播し、たまたまそれが自由面に到達し、これらと交わり又は反射するときの条件により破壊が起るとなす点に、根本的の差異がある。

又筆者等の引張り応力説によれば、穿孔そのものがその周辺に応力を集中せしめ、破壊を生じ易からしむるのに対し、弾性波説や衝撃反射説では、穿孔そのものの影響は無視されることになる。

3. 穿孔角度が爆薬威力の有効なる発破に関係すること

既に§6に述べた如く、普通発破の場合の棒状装薬は勿論、球形装薬でも弱装薬の場合には、自由面に対し穿孔方向がある角度を持つことが爆薬の威力を発揮せしめる上に於て望ましい。但し実際の穿孔作業に當つて、理論通り爆源(爆薬の重心点)を通り θ_0 の角度を持たせるように穿つのはかなり困難であるが、心抜発破に於ては相対する穿孔によつて或程度抱かせるようにするのが効果的である。弾性波説や衝撃反射説では、穿孔の角度は爆薬の威力の有効さには無関係である。

最近チエッコスロバキヤの或鉄山⁹⁾に於て、1カ月間の掘進速度 870.5mと云う素晴らしい高速度坑道掘進の大記録を樹立したが、その際の発破の心抜は、言わば長ピラミッド形或いは長台形心抜とも称すべき方法をとつている。即ちピラミッド形心抜法を改良したものであつて、心抜を有効に行うために穿孔に角度を持たせたものである。

4. 填塞物が発破効果に重要な影響を与えること

発破の際の填塞物(込物)が発破効果に大きな影響を与えることは周知の事実であるが、筆者等の引張り応力破壊説によれば、これは当然のことである。この引張り応力による破壊には、ある時間を要し、決して瞬間的ではないからである。弾性波や衝撃波では、爆発の瞬間に圧力波内のエネルギーが定まつてしまうから、填塞物の有無は発破効果に関係がないということになる。これは事実と反すと言われねばならぬ。

5. 小割り発破にも適用出来ること

小割り発破では、図11の如く先ず最小抵抗線に沿う亀裂が出来次に対角線方向の亀裂の出来るのが普通であつて、これは大川氏等¹⁰⁾

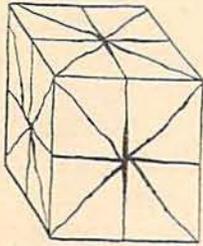


図11 小割り発破の亀裂の出来方の一例

の実験でも確かめられているが、筆者等の引張り応力破壊説によれば、応力線がそのように走るから至極当然のことである。即ち普通の発破と小割り発破とで亀裂の様相に関して根本的な差異があるわけではないことがよく了解され得る。

6. 大発破にも適用出来ること

筆者等の誘導した爆破係数 e の内容は、(4.11)式により

$$e = 3.58 \times 10^4 \frac{(1-0.3d)\sigma_t}{f} \frac{(1+k_1q^2d)^{3T}}{(1+k_2q^2d)^3} \quad (8.1)$$

であるが、この式中の分子に含まれている岩石の引張り破壊強度 σ_t は、あくまで均一な岩石についての値である。しかるに大発破の場合では、岩石の節理や亀裂が必ず存在するから、そこでは σ_t が相当小さいことになる。従つて当然爆破係数 e の値も普通発破に比して小としなければならぬことになる。

岩石の節理や、前に述べた穿孔角度などが発破効果に相当大きな影響を与えることについては、最近の報告¹¹⁾にも見られるところである。

7. 高压ガスによる発破にも適用出来ること

高压炭酸ガス Cardox や、高压空気 Airdox によつても、すかしを切つた炭壁などは発破が可能である。而してこれらの高压気体には、爆薬の爆速に相当するものは考えられないから、その粉碎作用は静力学的なものであり、猛度にあたるものは存在しない。今筆者等の爆破係数の式(4.11)に於て、猛度の項 $q^2d=0$ と置き且つ理想気体としてみれば、

$$e = 3.58 \times 10^4 \sigma_t / f \quad (8.2)$$

を得る。しかるに気体の状態方程式 $pV=RT$ より、 $RT=f$ と置けば

$$p = f / V = f / d$$

となるから、これを(8.2)式に代入すると

$$e = 3.58 \times 10^4 \sigma_t d / p \quad (8.3)$$

を得る。この(8.3)式が高压ガスの圧力を知つて爆破係数を求める式である。

同様なことが水圧破碎機に関しても言えるが、その場合も爆破係数が水圧力に逆比例することは勿論である。

8. 鉛嚮拡大試験や拉底発破にも適用出来ること

鉛嚮拡大試験や拉底発破の場合には、自由面には全然漏斗孔が生じない。この様な場合にも筆者等の応力破壊説を適用することが出来る。

この種の現象では、§3で述べた粉碎半径と拡大半径とが一致すると考えられるので、爆破係数 e を求める式(4.11)で $k_1=k_2$ と置けばよい。即ち

$$e = 3.58 \times 10^4 \frac{(1-0.3d)\sigma_t}{f} (1+k_1q^2d)^{3(T-1)} \quad (8.4)$$

を用いばよい。(8.4)式を用いば、異なつた爆薬による鉛嚮拡大試験の実験結果の差をよく説明出来る。勿論その場合には σ_t として、鉛の引張り破壊応力を用いる。

9. 打揚げ発破と打落し発破

発破で廻り起された岩石の移動が、軍力に抗して行われる場合と、自由落下を行ひ得る場合とでは、同じ条件に於ても爆破効果の異なることはよく知られている。

筆者等の理論では、この現象は次のようにして説明なされる。爆破係数 e を与える式は分子に岩石の破壊応力 σ_t が入つているから、 σ_t が大ききときは爆破効果が小さくなる。今打揚げ発破と打落し発破を考えるに、前者では岩石を押上げるに要する力が岩石の破壊応力と重畳して、言わば σ_t が大きくなつた様な形となり、打落し発破ではこれと逆に、既に岩石の自重に

より引張り応力が存在しているから、 σ_1 が小さくなる。従つて打揚げ発破よりも打落し発破の方がより効果的であることは、容易に説明付けられる。しかし弾性波説や衝撃波説では、圧力波が均等に球面状に伝播するのであるから、この様な方向性の説明は困難である。

10. ミリセコンド発破の効果を説明出来ること

ミリセコンド発破では、普通の斉発発破に比して岩石が比較的脆かに砕かれることはよく知られているが、その原因についてはまだ具体的な説明が少ない。

筆者等の考えによれば、発破の場合引張り主応力による破壊の進行速度は比較的遅いものであり、尙亀裂に至らない程度の引張り応力が相当時間残留している。ミリセコンド発破では、前段の爆発によるこの様な残留応力の存在する所へ、次段の衝撃波が来て重なる結果、岩石の破砕作用が増進されるように思われる。このことは最近の伊藤教授の論文¹²⁾にも現れているが、このためには静的な残留応力の存在を仮定するので、弾性波や衝撃波説のような動的効果のみに着目した理論では説明され得ない。

§9. 結 論

筆者等は前報に於て、発破の際の岩石内の応力分布を理論的に精密に計算して、引張り主応力による破壊説を建てた。本報はその結果を更に応用面に向つて発展させて得られたものである。

即ち発破に関する引張り主応力破壊説を実用化するために式の合理的な簡易化を計り、岩石の特性と爆薬の特性とをよく結合して発破の基礎式を導いた。その際装薬近傍の状態として、装薬半径の外に爆発によつて出来る拡大半径及び粉砕半径なるものを考え、これらの爆薬の猛度的な性質と結び付いた量が、爆薬のエネルギーの外に発破に相当大きな因子として含まれることを見出した。

この理論を押し進めてゆくと、次の如く周知の経験的に得られた Hauser の公式が導き出される。

$$L = cv^2$$

即ち本式が純理論的に得られたわけである。そして式中の爆破係数 c が

$$c = 3.58 \times 10^4 \frac{(1-0.3d)\sigma_1}{f} \frac{(1+k_1q^2d)^{3T}}{(1+k_2q^2d)^3}$$

の如き内容に相当することがわかる。この c は爆薬に関する特性としての火薬力 f 、爆発ガスの薬柱からの噴出速度 q 、装薬密度 d 、並びに岩石の特性としての引張り破壊強度 σ_1 、圧縮係数 k_1 、粉砕係数 k_2 を含ん

でいる。尙噴出ガス速度 q は

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

によつて爆速 D と結び付いている。ここに γ は比熱比、 α はボリウムである。

筆者等は上述の如く、引張り主応力による破壊理論並びに爆破係数 c の内容を知ることにより、これから演繹される結果として、以下に示すような発破に伴う諸現象をよく説明することが出来た。即ち発破に於ける漏斗孔の形状、穿孔角度及び積塵物の効果、大発破、小発破及び高圧ガスによる発破、打揚げ発破と打落し発破、拡張発破、鉛場拡大試験、ミリセコンド発破等である。

また弱装薬、過装薬を判別する指数として、適正装薬率 i 並びに深度比 m を用い、これら標準装薬にない発破の場合の公式を幾つか導入した。例えば過装薬に於ては適正装薬率 i によつて

$$i = (0.55p/\sigma_1)^{1/3} (a/2w)$$

のような関係式が得られ、弱装薬に於ては深度比 m を用いて

$$L = cm^2 \left(1 + 2 \frac{w-S}{l \sin \beta}\right)^{\gamma-1} w^3$$

なる関係を見出した。そして一般に標準装薬に近い過装薬及び弱装薬では

$$L = cm^2 w^3$$

なる公式を導き、これらの公式より爆破係数 c の算定に必要な岩石の特性 σ_1 、 k_1 、 k_2 等を試験発破の成績から求めることが出来るようにした。本文中ではこの一例について計算を行い、良好な結果の得られることを示してある。

筆者等の本論文は、先ず岩石内の爆源近傍では爆薬の猛度的な性質に支配される変化が起り、次いでそこに発生した爆発生成ガスの圧力作用により岩石内に張力が生じ、これが亀裂破壊をもたらすとなすものである。これは工業発破理論として大局的には間違いないと信ずるものであるが、尙部分的には修正を要する点があるかも知れない。故に本稿を終るに当り、発破に関係ある実務家並びに理論家の御批判を乞いたいと思うものである。

文 献

- 1) 村田勉, 田中一三: 工火協誌 15, No. 4, 294 (1954), 16, No. 1, 32 (1955).
- 2) 村田, 田中: 工火協誌 16, No. 1, 32 (1955), 同上報告の第二報。

- 3) 伊藤一郎, 若園吉一, 藤中雄三, 高速度撮影による岩石爆破の実験的研究 (1955), 京都大学。
- 4) 村田勉: 工火協誌 10, No. 2, 68 (1949)。
- 5) E. Jouguet: Mécanique des Explosifs, Paris, p. 372 (1917)。
- 6) J. F. Roth: Z. Schiess-u., Sprengstoff, 34, 193 (1939)。
- 7) 山本祐徳: 産業爆薬概論, p. 137 (1947), 誠文堂新光社。
- 8) 伊藤, 若園, 藤中: 前出。
- 9) Bergbau Technik, März (1955): 石炭評論 6, 594 (1955)。
- 10) 大川禎三: 工火協誌 13, No. 4, 259 (1952)。
- 11) B. J. Kochanosky: Mining Engineering, 861-66, Sept. (1955)。
- 12) 伊藤一郎, 若園吉一, 藤中雄三: ミリセコンド発破の破壊機構に関連せる実験的研究 (1955), 京都大学。

工業雷管の性能に及ぼす低温度の影響

(昭和31年1月24日受理)

木下四郎・福山 仁・網村美義

(日本化薬折尾作業所火工品研究課)

I. 緒 言

工業雷管の性能に及ぼす低温度, 特に液体酸素の温度たる -183°C の影響を検討しておくことは, 液酸爆薬を実用する場合に対して必要なことである。

勿論斯る検討は既に吾国に於ても, 外国に於てもなされている。即ち坂本氏¹⁾は工業爆薬を -183°C に冷却して実験した際, 雷管が斯る低温度に於ては半爆現象を呈することを発見した。そこで各種の雷管を -183°C に冷却して試験し, 普通の雷管は殆んど半爆現象を示し, 二重内管のもの及びアルミ雷管のみは半爆とならないことを述べている。須藤, 坂口, 太原の諸氏²⁾は液酸爆薬に就いての各種実験の中で, 液酸中に浸した各種雷管に就いて半爆率の検討, 最小起爆量試験, 鉛箔試験を行い, 爆粉は液酸の温度では威力が低下するが, 上向内管, 長脚内管, 二重内管を用うれば威力低下を防止し得ること, アルミ雷管は威力低下のないことを示している。太原, 坂本氏³⁾は従来の下向内管の工業雷管は液体酸素の温度では殆んど半爆現象を呈するが, 雷管の構造如何に依つては完爆するので, この低温度での実験は雷管製造に於て構造上何等か参考になるのではないかと考えられると述べている。Stettbacher⁴⁾も液酸爆薬のエネルギーを安全にしかも充分に利用するためには雷管特にアジ化鉛雷管を用いるべきで, 雷管を用いたものは低温のために発火しなくなる。その原因は恐らく湿気の凝縮のためであらうと述べている。更に又 L. V. Clark⁵⁾は合衆国

で使用されている各種雷管を電気雷管として用いて, 低温 (-80°C , -183°C) で次記の様な各種実験を行っている。即ち各種雷管を液酸爆薬中に置いた時間と完爆率との関係を検討しマニトール・ヘキサナイトレイトを使用した以外の雷管爆粉を使用したもの等は時間が長くなるにつれて液酸爆薬包を完爆しにくくなること, 25°C , -80°C , -183°C で各種雷管の鉛箔試験を行い, 温度の低下と共に猛度が低下すること, 前記の各種温度で各種雷管のトラウブル鉛箔試験を行い, その拡大値は温度に依つて影響されないこと, 前記の各温度でメテガング検査機を用いて雷管, 雷管爆粉, テトリール, TNT等各種爆薬の爆速を測定し, 爆速の平均値は低温の影響を受けないがそのバラツキは低温程大きくなり勝ちであること, 前記各種温度で各種爆薬を爆発させるに必要な雷管量を求め, 低温程その必要量が多くなること, 又並列に結線した2個の電気雷管の間の爆発時間の差が両雷管の温度の相違に依つて如何なる影響を受けるかを検討し一方が常温で一方が -80°C の場合僅かな影響のあることを示している。

吾々は工業雷管 (雷管爆粉を使用したもの) の性能を完爆能 (半爆率の大小で示す) と起爆能 (鉛箔孔径, 鈍性爆薬試験結果等で示す) との二つに分けて考え, 此等性能が -183°C と云う低温で如何なる影響を受けるかを前記文献を参考にして追試し, 低温程完爆能は低下するが長内管を使用し添装薬中に爆粉を凸入させた型式にすると -183°C に冷却しても半爆の