

報 文

爆破論 (その一) 棒状装薬による爆破

(昭和24年10月1日受理)

山 家 信 次

(關東電氣工業株式会社)

從來爆破の基本式は装薬がある球形をした場合即ち集團装薬に限られてゐるが實際の爆破は穿孔内に何本かの薬包を装填して行ふのであるから、かゝる棒状装薬による爆破の基本式は現在迄與へられてゐない。

筆者はさきに等方性物体内の爆薬の爆發に關しては球形装薬の場合装薬の爆發中心より任意の距離  $r$  なる點に働く内部應力は  $r^{-2}$  に比例するとの假定が理論的にも實際にも適合することを述べたが、こゝではこの理論的假定を棒状装薬に應用して考へることとする。

I 等ポテンシャル曲面

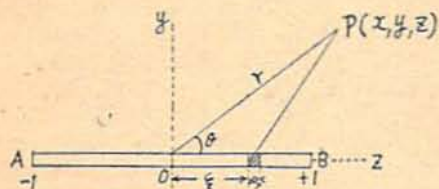


圖 1

圖1に於て AOB を棒状装薬とする。O を原點として OB に Z 軸を取り空間に於ける任意の點 P (x, y, z) [x 及 y 軸は原點 O を通り Z 軸に互に直交する軸とする] に於ける装薬 AB の爆發によつて生ずる内部應力によるポテンシャル  $\phi(P)$  を求める、先づこの装薬の密度を  $a$  とする。問題の取扱を便利にするために  $xy$  平面を考へる又 A 及び B の位置を  $-1, +1$  としても一般性は失はぬ。  $OP=r$  とし  $\theta$  軸との角度を  $\theta$  とする。任意の装薬片  $ad\xi$  による P 點のポテンシャルは従つて  $ad\xi/(r^2+\xi^2-2r\xi\cos\theta)$  であるからこの装薬全長に對する P 點のポテンシャル  $\phi(P)$  は

$$\phi(P) = \int_{-1}^{+1} \frac{ad\xi}{r^2+\xi^2-2r\xi\cos\theta} \dots\dots(1)$$

但し  $P(r, \theta) = P(x, y)$  は右上半面即ち第一象限内のみにとることとする。従つて  $\cos\theta \geq 0$ ,  $r\cos\theta = z$  であるから上式を書きかへて

$$\begin{aligned} \int_{-1}^{+1} \frac{ad\xi}{r^2+\xi^2-2r\xi\cos\theta} &= \int_{-1}^{+1} \frac{ad\xi}{(\xi-z)^2+(r^2-z^2)} \\ &= \int_{-1}^{+1} \frac{ad\xi}{(\xi-z)^2+y^2} \\ &= \frac{a}{y} \left[ \tan^{-1} \frac{1-z}{y} - \tan^{-1} \frac{-1-z}{y} \right] \end{aligned}$$

故に  $a=1$  の場合のポテンシャルは  $\phi$  であるから  $\phi/a=0$  とすれば

$$y\theta = \tan^{-1} \frac{1-z}{y} - \tan^{-1} \frac{-1-z}{y}$$

これを書きかへて

$$\frac{2y}{y^2-(1-z^2)} = \tan(y\theta) = \frac{2y}{r^2-1}$$

或は

$$z^2+y^2-1 = \frac{2y}{\tan(y\theta)} \dots\dots(2)$$

一般の空間座標に關しては

$$z^2+x^2+y^2-1 = \frac{2\sqrt{x^2+y^2}}{\tan(\Phi\sqrt{x^2+y^2})} \dots\dots(3)$$

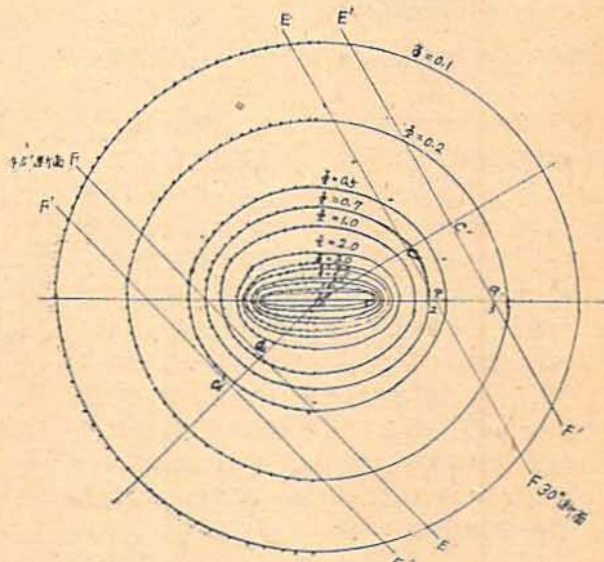


圖 2

1) 山家, 工業火薬協會誌, 10 卷 51 頁

これらポテンシャル曲線を計算して  $y =$  面に於けるものを圖示すると圖2の如くなり又その長軸及短軸の長さ、並にその比は表1に示す。

圖2の等ポテンシャル曲線から等方性物質内の應力分布を知ることが出来る又その應力の大きさはこのポテンシャルグラディエントから求められる。この應力は装薬に近い所では極限値となり装薬の外形に類似するが装薬よりの距離が相當離れた所では球に近づき集團装薬による爆破力分布に近よる。

表 1

$\Phi$	$y=0$ の 断面			$y=0.5$ の 断面		
	長 軸	短 軸	短 軸 長 軸	長 軸	短 軸	短 軸 長 軸
25	1.039	0.120	0.116	-	-	-
15	1.064	0.176	0.165	-	-	-
8	1.118	0.210	0.277	-	-	-
6	1.154	0.370	0.320	-	-	-
4	1.225	0.520	0.425	0.504	0.185	0.342
3	1.291	0.640	0.496	0.930	0.410	0.441
2	1.414	0.850	0.600	1.17	0.700	0.598
1	1.732	1.31	0.756	1.62	1.20	0.739
0.7	1.964	1.58	0.805	1.91	1.52	0.795
0.5	2.236	1.96	0.877	2.17	1.90	0.876
0.2	3.317	3.12	0.935	3.30	3.09	0.927
0.1	4.581	4.44	0.968	4.64	4.42	0.957

## II 等ポテンシャル曲面の軸平行断面

前節で求めた等ポテンシャル曲面を  $z$  軸に直角及平行な平面による断面を考へる。

1.  $z = \text{const.}$  による平面即ち等ポテンシャル曲面の長軸に直角の平面による断面の等ポテンシャル曲線は  $z$  軸を中心とする同心圓である。これを發破について考へれば棒状装薬に於て自由面が装薬に直角の場合に爆破孔は圓形となる。 $z=c$  を 2, 3, 4 として漏斗孔の直径を求めると次の如くなる。

$z=c$	孔長	装薬長 孔長	漏斗孔の徑		
			$\phi=0.1$	$\phi=0.2$	$\phi=0.5$
2	3	$\frac{2}{3}=0.67$	-	4.56	1.71
3	4	$\frac{2}{3}=0.50$	6.70	2.60	-
4	5	$\frac{2}{5}=0.40$	4.25	-	-

2.  $y = \text{const.}$  による平面即ち  $z$  軸に平行で  $y$  軸に直角な面で切つた場合の等ポテンシャル曲線は式(3)に  $y=c$  を代入しても又作圖からも容易に求められる。これは長孔發破に相當するものであつて  $y=0.5$  及 1.0 の断面は圖3及圖4に示す如く橢圓形に近い曲

1)  $y \rightarrow 0$  のときには  $\tan y\theta = y\theta\{1+1/3(y\theta)^2\}$  であるから  $x^2 = 1 + \frac{2}{\theta}$  から求められる。

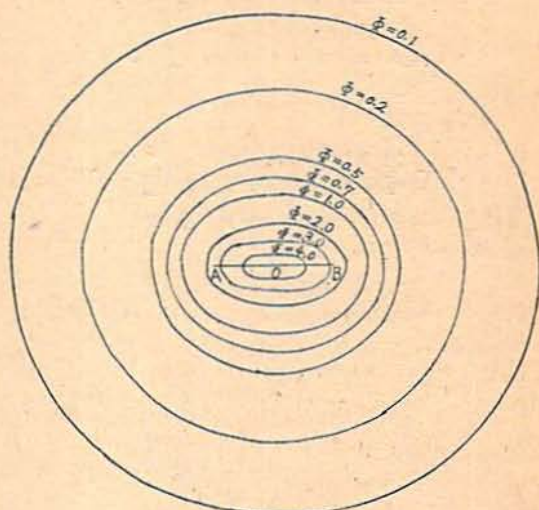


圖 3.  $y=0.5$  の 断面

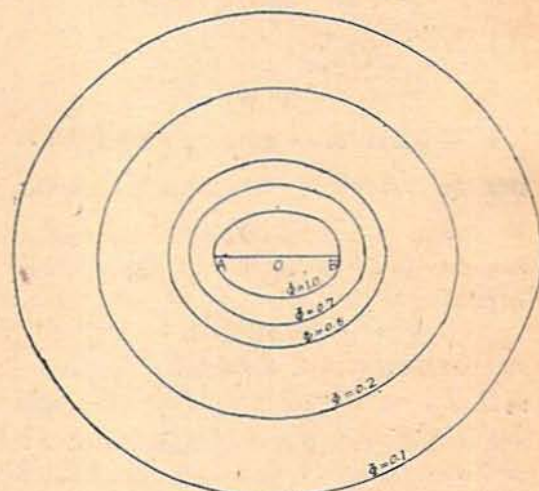


圖 4.  $y=1$  の 断面

線になるが表1右半に示す如く同一ポテンシャルに對しては  $z$  軸を通る断面の場合より短軸長軸比は少であるが  $\Phi$  が少となるに従つてこの比は1に近く、この等ポテンシャル曲線が長孔發破に於けるクレーターの形状を示す。

## III $z$ 軸と $\theta$ なる角度を有する平面による断面

等ポテンシャル曲面と  $z$  軸に對し  $\theta$  角をなす平面の切り口の  $\Phi$  曲線を求めるために先づ  $\Phi$  曲面を  $z$  軸を軸として  $\theta$  だけ回轉した新軸を ZXY とすれば(圖5参照)

$$x = X$$

$$z = \cos \theta Z - \sin \theta Y$$

$$y = \sin \theta Z + \cos \theta Y$$

であるからこれを等  $\Phi$  曲線式(3)に代入して

$$(\cos \theta Z - \sin \theta Y)^2 + X^2 + (\sin \theta Z + \cos \theta Y)^2 - 1$$

$$= \frac{2\sqrt{X^2 + (\sin \theta Z + \cos \theta Y)^2}}{\tan[X^2 + (\sin \theta Z + \cos \theta Y)^2]^{1/2} \Phi}$$

或は計算して

$$Z^2 + X^2 + Y^2 - 1$$

$$= \frac{2\sqrt{X^2 + (Z \sin \theta + Y \cos \theta)^2}}{\tan[X^2 + (Z \sin \theta + Y \cos \theta)^2]^{1/2} \Phi} \dots (4)$$

を得る、これを  $Y=C$  なる平面の断面は

$$Z^2 + X^2 + C^2 - 1$$

$$= \frac{2\sqrt{X^2 + (Z \sin \theta + C \cos \theta)^2}}{\tan[X^2 + (Z \sin \theta + C \cos \theta)^2]^{1/2} \Phi} \dots (5)$$

で示される。

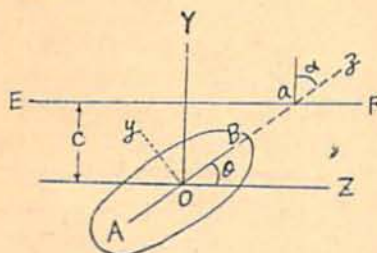


図 5

今 EF を爆破に於ける自由面とすれば装薬 AB の位置に関しては  $\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta$  とすれば  $\alpha$  は穿孔角度、 $Aa$  は孔長、 $C$  は最少抵抗線の長さとなるが装薬長 AB を  $-1$  より  $+1$  迄即ち 2 とし孔長  $Aa = 2 + l$  とすれば

$C = (1+l) \sin \theta =$  抵抗線の長さ

となり、式 (5) は  $Z$  と  $X$  の函数として示される。例として  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\theta = 60^\circ$  とすれば  $\cos \theta = \frac{1}{2}$ ,  $\sin \theta = \frac{\sqrt{3}}{2}$  を式 (5) に代入すれば数値計算によつて  $y=C$  の面に於けるポテンシャル分布が求められるが然し作図から求めた方が便利である。

圖 6 及圖 7 はそれぞれ  $\alpha = 30^\circ$  及  $\alpha = 45^\circ$  に於ける  $Y=C$  の面に於ける等ポテンシャル曲線で、もし

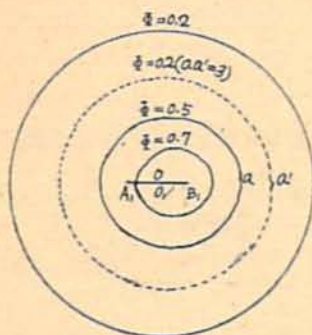


圖 6.  $30^\circ$  断面.

[圖 2 EF 断面  $O_1 a = 2$ ,  $W = 1.73$  實線]  
E/F' 断面  $O_1 a' = 3$ ,  $W = 2.60$  點線]

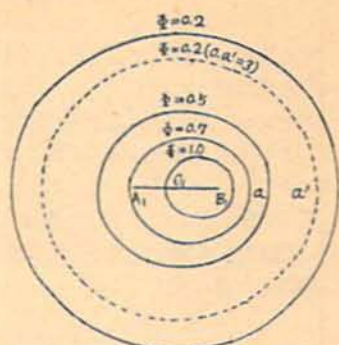


圖 7.  $45^\circ$  断面

[圖 2 EF 断面  $O_1 a = 2$ ;  $W = 1.41$  實線]  
E/F' 断面  $O_1 a' = 3$ ;  $W = 2.12$  點線]

穿孔による抵抗分布の變化がなければ自由面に於けるクレーターはそれぞれ圖に示す如くなる。

これは普通の心抜き發破の場合に相當するが自由面よりの孔深が 3 及 4 の場合につき圖示せるもので

角度  $\alpha$  孔長  $W$  孔長  $W$

圖 6.  $30^\circ$  3 (實線) 1.73 4 (點線) 2.60

圖 7.  $45^\circ$  3 ( \* ) 1.41 4 ( \* ) 2.12

圖に於て  $A_1 B_1$  は自由面に於ける装薬 AB の投影線、 $O$  はその中心でこの自由面に於ける投射點は  $O_1$  である又  $a$  は孔口で圖の等ポテンシャル線がこの場合のクレーターとなる。等ポテンシャル線は  $\Phi$  が少である程圖に近よるが  $\Phi$  曲線の中心が  $O$  よりも右にづれると共に  $\Phi$  が大なる程短徑と長徑との比が大である。この例では表 2 の如くなる。

表 2

$\Phi$	$\alpha = 30^\circ$			$\alpha = 45^\circ$		
	長軸	短軸	比	長軸	短軸	比
0.2	5.3	5.2	1.02	5.72	5.60	1.02
0.5	2.42	2.24	1.08	3.06	2.85	1.07
0.7	1.31	1.08	1.21	2.14	1.90	1.13
1.0	-	-	-	1.18	0.80	1.47

斯くして標準漏斗孔角を  $90^\circ$  とすれば、抵抗線長  $W = 2 \times \cos 30^\circ = 1.73$  となり  $\Phi = 0.3$  又は  $2 \times \cos 45^\circ$  として  $W = 2 \cos 45^\circ = 1.41$  であるから  $\Phi = 0.5$  となる。斯くして孔長、装薬量及装薬状況、穿孔角度と採石量の關係或は鑿岩費と煤費と採石量との關係が求められる。

#### IV 爆破分力

次に集團装薬と棒狀装薬との軸方向に於ける壓力を比較するために  $x$  及  $x$  軸に於ける分力  $P$  をある點  $P$  の距離  $r$  に對し  $r^{-3}$  の假定を適用すれば圖 1 に於て  $x$  軸に於ける分力  $P_x$  は

$$P_x d\xi = P \cos \theta d\xi = \frac{a(\pi - \xi)}{[(\pi - \xi)^2 + y^2]^2} d\xi$$

であるからこれを  $z$  につき  $-\frac{l}{2}$  から  $+\frac{l}{2}$  迄積分すれば

$$P_x = \frac{a}{2} \left[ \frac{1}{\left(z - \frac{l}{2}\right)^2 + y^2} - \frac{1}{\left(z + \frac{l}{2}\right)^2 + y^2} \right] \dots (6)$$

となる。同様に  $y$  軸方向に於ける分力  $P_y$  は

$$P_y = \frac{a}{2y^2} \left[ \frac{y\left(z + \frac{l}{2}\right)}{\left(z + \frac{l}{2}\right)^2 + y^2} - \frac{y\left(z - \frac{l}{2}\right)}{\left(z - \frac{l}{2}\right)^2 + y^2} \right] + \tan^{-1} \left[ \frac{l/y}{1 + \left(\frac{z}{y}\right)^2 - \left(\frac{l/2}{y}\right)^2} \right] \dots (7)$$

$z$  軸に対しては  $y$  軸と相似である。  
 $z=c$  の場合即ち  $z$  軸に直角の平面によつて切断せられたときの  $P_{z=c}$  は  $z=c$ ,  $\frac{l}{2}=1$  と置けばポテンシャルの  $z$  軸分力に相当するが  $z=c$  を 2, 3, 4 の場合について求むれば表 3 の如くでその分布は圖 8 に示す。

$z$	1.5	2	3	4
I 棒状	0.296	0.125	0.037	0.0156
II 集團装薬	1.78	0.445	0.094	0.0355
III 棒状集團	6.0	3.56	2.52	2.27

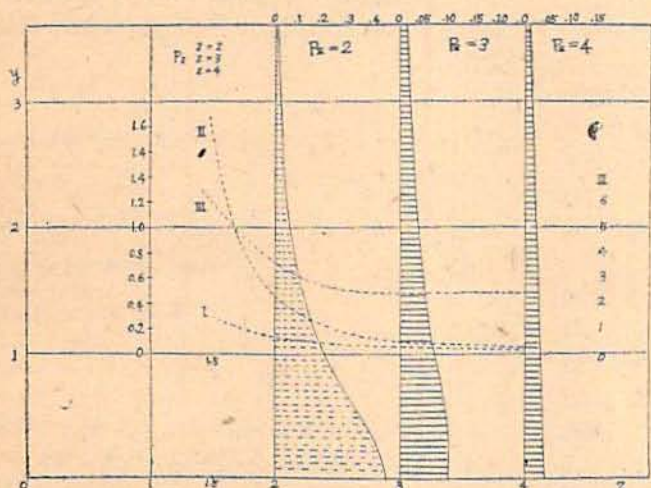


圖 8

これを同一密度の集團装薬(中心装填)の場合と比較すれば前表 II に示す如くでこの兩者の比は III 或は第 8 圖點線で示すこれで見ると装薬よりの距離がある程度増加するとその比が 2 に近よる。

以上棒状装薬のポテンシャル論に關し基本的解析を行つたがこの應用に關しては尙續行する豫定である。本研究のポテンシャル解析並に計算に關しては東大第一工學部力學教室犬井鐵郎教授及柳川禎章君に負ふ所であるがこゝに衷心感謝申上げる次第である。

## Burn cut の研究 (第 1 報)

### 三井神岡鑛山における實驗

(昭和 24 年 10 月 10 日受理)

發破研究會 小林 明夫・山本 祐徳

(日本産業火藥會) (東京大學第一工學部)

#### 摘 要

1. 正方形の 4 隅と中心との 5 個所に心抜孔を穿ち、中心孔のみに装薬したもの (4 隅孔は空孔、この型を B 型と名づける) について、他の條件を一定とし装薬長  $\mu$  のみを變數にすればここに出来る漏斗孔の深さ  $\xi$  はそれと直線關係をもつ。 $\xi = a\mu - b$  ( $a, b$ : 常數)

2. 装薬孔と空孔との距離を  $r$  とすれば、漏斗孔が開かれる所まで空孔がつぶされるためには  $\mu = c + dr^2$  ( $c, d$ : 常數) なることを要する。従てこの装薬量  $L_B$  も亦  $r$  に對し  $L_B = c' + d'r^2$  ( $c', d'$ : 常數) で與えられる。