

高能率の方法であるがこの場合段發雷管の装入箇所は孔奥の方が前段の發火による岩石崩落の爲雷管が脱落することを防げるので良い方法である。

V 結 言

バーンカット發破法の進歩普及に従つて爆薬火工品が之に對應して改良され進歩して行かればならぬが、新しい爆薬火工品を活用することに依つて發破法は益々合理的になつて行くものと考えられる。この様な総合的な効果をあげる爲には今後関係者の一層緊密な協力と努力と研究が必要である。

本研究を行ふに當り御盡力を賜つた各鑛山関係者に感謝致します。

文 献

- (1) 堀部富男：バーンカットに就いて，炭鑛技術第3巻10號
- (2) John G. Hall：Blasting a burn-cut round

in a drift; Explosives Engineer Vol. 26. No. 4 1948. p. 113.

- (3) 岩間正男：大夕張炭鑛に於けるバーンカット發破法に就て，炭鑛技術第4巻6號 p. 10.
- (4) 日本石炭協會技術部：超硬質合金使用穿孔成績及びバーンカット記録表説明書，九州炭鑛技術連盟會誌第2巻3號 p. 449.
- (5) Clifton, W. Livingstone: Mining Research Evolves, Clover-Leaf Burn cut; E. & M. J. March. 1947.
- (6) 日本鑛業協會技術部：電氣發破に依る一齊心拔法に就て，日本鑛業協會誌 1948年10月創刊號 p. 9.
- (7) G.E. Ap Rolerts: Heading Standardization Pays; World Mining 1949 April.
- (8) 元木俊雄：クローバー心拔に就て，九州鑛山學會誌第17巻第4號 p. 138.

バーンカットの機構

(昭和24年10月18日受理)

日野熊雄・佐藤淳一

(日本化薬株式会社厚狭作業所)

摘 要

バーンカット發破法に於ては小心拔，大心拔の際の裝薬孔と穿孔の距離が基礎的に重要な値であるが之を爆薬の力，比重，孔径，孔数等の函数として表す式を導出した。その際従来の發破理論の如くに岩石の剪断エネルギーのみを考慮する方法によらず，岩石の粉碎，爆轟生成ガスの噴出を考慮した。かくして小心拔の裝薬孔と空孔の距離は爆薬の力及び比重が或る値以上ならば之等に殆んど支配されず主として岩石の結合破断力即ち岩石に依り定まる係數に依り支配されることを明らかにした。又此の距離と小心拔の際の空孔数とから大心拔の裝薬孔の距離が一義的に定まることを明らかにした。かくして従來發破機構に不明の點の多かつたバーンカットの特性を一應説明し得たが穿孔長が現狀に於ては短いので理想的のバーンカットと言うより従來のVカット等との混合型が主として實際には行われてゐる事を論じ，バーンカット法の設計，實施，爆薬の選定等に於て従來多く見られる多少の混亂はこの點に原因することを述べた。

I 緒 言

バーンカット發破法は岩石の爆薬による爆破法として最も機械化された方法であるから現在の處他の掘進法——ピラミッドカット，Vカット等に比し総合的に有利であると思はれるが之は段發雷管，多數齊發力のある發破器等の火工品の進歩により今後益々有利となり更に穿孔機，積込機等の機械の發達と相俟えば今後最も有利な發破法となるものと思はれる。一方バーンカットの發破理論は従來の發破理論と根本的に異なる

べき處が多く今後の解決を要する問題である。バーンカットに對する定性的な考察及び之に基づいて現在最も合理的と思はれるバーンカット用爆薬及びその實用試験の経過については先に「バーンカット用爆薬——クローバーダイナマイト」に於て報告したが以下に於ては之等の考察，實驗，經驗を基としてバーンカットの機構に於て考察した處を報告する。

II 小心拔の機構

バーンカット心板の裝薬孔と空孔の數，關係位置に

ついで先述の報告(1)にて考察したが以下に於ては圖1に示す最も普及した形式に於て考察する。この他の場合についても類似した考察を進め得ることは勿論である。

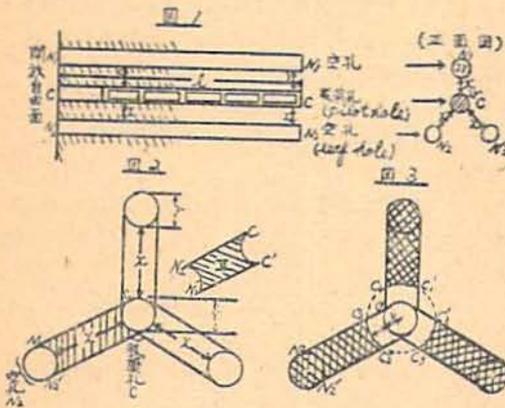


圖1の岩石正面は左側でこの面に於ては岩石、爆轟生成物は左方に向けては完全に自由に運動し得るから之を「開放自由面」と定義する。之は従来の發破理論に於ける「自由面」と本質的に何等異なる處がないが理想的のパンカット即ち穿孔長 l が甚だ長くなつた場合(この條件は加背の大きさと相対的のものである)にはパンカットとしてはこの開放自由面を心抜のキッカケとするというものではないのであつて空孔 N_1-N_3 , N_2-N_2 , N_3-N_3 が自由面として働くのである。この爲パンカットは穿孔長 l 従つて又指進が變長くなつても成立し又或程度 l が長くなければパンカットにならないのである。然しこの場合空孔 $N-N$ は有限の容積を有し岩石爆轟生成物が運動し得る餘地が制限されてゐる。然しガス壓力に依る岩石の相對的移動剪斷を起さず爲には岩石構成物の原子結合距離を原子結合力の及ぶ範圍以上即ち概ね數オングストローム以上引離せば良いのであるからこの意味では空孔 $N-N$ はガス壓力に依る岩石剪斷の機會を十分與えるのであつて、一方剪斷された後の岩石片の運動に對しては空間的制限があり、この制限が又その後の發破過程を支配するからこの $N-N$ の如き人工的の有限面を「有限自由面」と定義する。岩石内の肉眼に見える割目又は肉眼には見えないが數オングストロームを越す岩石結晶缺陷はこの意味に於て一種の「有限自由面」であるが岩石の運動空間は無視し得る程度であるから之等の要素はむしろ岩石の實際的の破斷強度の内に含めて考える方が便利である。

パンカットの理論的取扱に於ては開放自由面は最初には考慮せず後に二次的のものとして附加的に考察する方が妥當であるので有限自由面に於てその特性を考察する。圖2に於て装薬孔内の爆薬の爆轟に依り

C, N_2, N_2', C' にて表わされた岩石片は x 方向に剪斷移動する。この場合 N_2, N_2' が自由面として作用する。然るに N_2, N_2' は有限自由面であるから剪斷岩石片IIは空孔の爆源と反對側の固定岩壁に衝突した後は運動を爲し得ない。従つて圖3に示す如く再硬化されるか衝突に依り岩石片IIは一旦粉碎されて再硬化されるものと見てよい即ち岩石片IIは圖3に於ては粉岩の塊であつてその構成原子間の結合は概ね切斷されてゐて壓縮に對しては固體的の抵抗を一應呈し得ても剪斷、膨脹に對しては殆んど抵抗力を有しなくなつたものと見てよい。結果として幾何學的には心抜の結果有限自由面 $N_1-N_1, N_2-N_2, N_3-N_3$ は消えてその代り最初の装薬孔 $C-C$ が新に擴大されて有限自由面 $C_1-C_1, C_2-C_2, C_3-C_3$ を構成する。この擴大程度は空孔の直徑數が與えられれば容易に計算し得る。即ち中心孔 Pilot hole の最初の半徑を r とすると之は

$$r \rightarrow r + \frac{\pi}{2} r = r \left(1 + \frac{\pi}{2} \right) \dots\dots\dots (1)$$

となる。中心孔の斷面積は最初 πr^2 であるが心抜の後には空孔 leaf hole 1ヶに對し πr^2 だけ増加するが n ヶの leaf hole のある場合は

$$\pi r^2 \rightarrow n \pi r^2 \dots\dots\dots (2)$$

だけ増加する。この擴大孔を近似的に圓と見做せばその半徑は

$$\pi r_1^2 = (n+1) \pi r^2 \text{ 即ち } r_1 = \sqrt{n+1} r \dots\dots (3)$$

圖1の例に於ては $n=3$ であるから

$$r_1 = 2r \dots\dots\dots (3)'$$

かくして擴大された中心孔は次の大心抜 raker の作用を促進するのである。raker hole の作用を論ずる前に心抜に於ける孔間の距離 x と孔半徑 r 等の相互關係を考察する。

岩石片IIを剪斷するに要するエネルギーを E_1 とすれば n 個の空孔に對し

$$E_1 = 2(x+2r)len \dots\dots\dots (4)$$

但し e =岩石斷面 1 cm^2 當りの結合を破斷するに要するエネルギー、岩石片IIを運動させるに要するエネルギー E_2 は

$$E_2 = \frac{\{2rx + (4-\pi)r^2\}ln}{s} \frac{V^2}{2} n \dots\dots (5)'$$

但し s 重力加速度、 V は約 $\frac{\pi}{2}r$ の距離を移動する間の平均速度であるがこの運動は壓力 P_1 容積 v_1 のガスの膨脹より引起され

$$E_2 = k_1 \frac{P_1 v_1}{k-1} \dots\dots\dots (5)''$$

一方
$$P_1 = \frac{fL}{v_1 - \alpha L} = \frac{f \pi R^2 \Delta}{\pi r^2 l - \alpha \pi R^2 \Delta} \dots\dots\dots (6)$$

$$v_1 = \pi r^2 l \dots\dots\dots (7)$$

但し f =火薬力、 R =薬包の半徑、 Δ =薬包の比重、

$\alpha = \text{コポリウム}$, $k_1 = \text{常數}$, $k = \text{ガスの比熱比}$, 今

$$\frac{k_1}{k-1} = k_2 \text{ とおけば}$$

$$E_2 \approx k_2 \frac{f \pi r^2 R^2 \Delta}{\pi r^2 l - \alpha \pi R^2 \Delta} \\ = \frac{k_2 \pi (lr^2) (R^2 f \Delta)}{r^2 - \alpha R^2 \Delta} \dots \dots \dots (5)'''$$

$r=R$ の場合は

$$E_2 = \frac{\pi k_2 (lr^2) (f \Delta)}{1 - \alpha \Delta} \dots \dots \dots (5)$$

次に岩石の粉碎に費されるエネルギーを E_3 とすると粉碎に要するエネルギーに就ての Rittinger の法則から粉碎により生ずる岩石新表面積總和は粉碎エネルギーに比例するので爆薬のエネルギー大の程之に比例して粉碎が廣範囲に行われこの爲エネルギーが消費されると見てよいから

$$E_3 = k_3 E = k_4 P_1 v_1 = k_4 \frac{\pi (lr^2) (R^2 f \Delta)}{r^2 - \alpha R^2 \Delta} \dots \dots (9)'$$

$r=R$ の場合は

$$E_3 = \frac{\pi k_4 (lr^2) (f \Delta)}{1 - \alpha \Delta} \dots \dots \dots (9)$$

次に噴霧等を押出して噴出するガスに持たられるエネルギーを E_4 とすると噴出ガス量は単位時間に

$$G \approx \rho_1 \left(\frac{2}{k-1} \right)^{k-1} \sqrt{\frac{2gk}{k+1}} \cdot \frac{\pi r^2}{\sqrt{f}} P_1 l \\ \approx k_5 \frac{\pi r^2}{\sqrt{f}} \frac{f \pi R^2 \Delta}{\pi r^2 l - \alpha \pi R^2 \Delta} \\ \approx \frac{\pi k_5 R^2 \Delta \sqrt{f} l}{r^2 - \alpha R^2 \Delta}$$

$r=R$ の場合は

$$G \approx \frac{\pi k_5 (\Delta \sqrt{f}) l}{1 - \alpha \Delta}$$

$E_4 \approx G$ と見てよいから

$$E_4 \approx \pi k_5 \frac{(\Delta \sqrt{f}) l}{1 - \alpha \Delta} \dots \dots \dots (10)$$

爆薬の有する有効エネルギーを E とすれば

$$E = \frac{f \pi R^2 \Delta}{k-1} \dots \dots \dots (11)$$

一方

$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4$ であるから。 $R=r$ の場合即ち穿孔内に一杯爆薬が装填された場合

$$\frac{f \pi r^2 \Delta}{k-1} = 2(x+2r) \rho_1 c_1 + \frac{\pi k_2 (lr^2) (f \Delta)}{1 - \alpha \Delta} \\ + \frac{\pi k_4 (lr^2) (f \Delta)}{1 - \alpha \Delta} + \frac{\pi k_5 (\Delta \sqrt{f}) l}{1 - \alpha \Delta} \\ x = \left\{ \frac{\pi r^2}{2} f \Delta \left(\frac{1}{k-1} - \frac{k_2}{1 - \alpha \Delta} - \frac{k_4}{1 - \alpha \Delta} \right) \right. \\ \left. - \frac{\pi k_5}{1 - \alpha \Delta} (\Delta \sqrt{f}) \right\} \frac{1}{\rho_1 c_1} - 2r$$

又は

$$x = \left\{ \pi r^2 f \Delta \left(K_1 - \frac{k_2}{1 - \alpha \Delta} \right) \right. \\ \left. - \frac{k_5}{1 - \alpha \Delta} (\Delta \sqrt{f}) \right\} \frac{1}{2 \rho_1 c_1} - 2r \dots (12)$$

(12) 式に於て中心孔と空孔の孔心距離を X とすれば

$$X = x + 2r = \left\{ \pi r^2 f \Delta \left(K_1 - \frac{K_2}{1 - \alpha \Delta} \right) \right. \\ \left. - \frac{K_3}{1 - \alpha \Delta} (\Delta \sqrt{f}) \right\} \frac{1}{2 \rho_1 c_1} \dots \dots (12)'$$

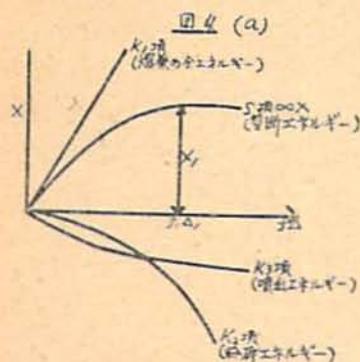
即ち X 又は x は穿孔長 l には無関係で $r, f, \Delta, \rho_1, c_1$ の函数である。又は

$$2 \rho_1 l \times c_1 = \pi r^2 f \Delta \left(K_1 - \frac{K_2}{1 - \alpha \Delta} \right) \\ - \frac{K_3 l}{1 - \alpha \Delta} \Delta \sqrt{f} \dots \dots \dots (12)''$$

(12)' の左邊は岩石片 II を剪断するに要するエネルギーで之を S 項とする。右邊の第 1 項即ち K_1 項が爆薬の全エネルギー第 2 項即ち K_2 項は岩石片 II の運動及び岩石粉碎のエネルギーであるが運動した岩石片は固定壁に衝突して粉碎され再硬化されるからこの運動エネルギーも廣義の粉碎エネルギーに含まれる即ち K_2 項は粉碎エネルギーで第 3 項即ち K_3 項が噴出のエネルギーで之は噴霧の良否、爆薬の爆力、比重等に主として左右されるものである。

従来の發破理論の最も重要な理論は A. W. Daw, Z. W. Daw の剪断理論であるがこの理論は (12)'' 式の左邊と右邊の第 1 項を取扱っている。然し岩石粉碎のエネルギー K_2 項及びガス噴出のエネルギー K_3 項が實際の發破に於ては無視出来ないものであつて S 項、 K_2 項、 K_3 項は K_1 項に對し略同様の率を示すものと見るのが妥當である。即ち岩石剪断の S 項を發破上の有效仕事と見るとエネルギー効率は 20~30% 以下というのが實状であろう。従来の發破理論は S 項、 K_1 項のみを基礎とする處に弱點があるのであつて K_2 項、 K_3 項が何等かの形で近似的にでも考慮されれば實状に合つた發破理論は發展の見込みがないであろう。

さて (12)'' から判る通り中心孔と空孔の距離 X 又は x は爆薬の力 f 及びその比重 Δ が大になるにつれ最初は増加するが $f \Delta$ が或値を越せば減少してくる、之れは $f \Delta$ は増加しても負項 $\frac{f \Delta}{1 - \alpha \Delta}$ が Δ 増加に従い大となり又負項 $\frac{\Delta \sqrt{f}}{1 - \alpha \Delta}$ も $f \Delta$ の増加に従つて大となるが之等負項の絶対値の増加率は直線的以上であるから結局 $f \Delta$ と X の關係は圖 4 の如くなる。もつとも (12)'' 式中のコポリウム α は壓力大となる程小となると見るべきであるから實際的には $f \Delta$ の増大につれて X は最初増加し次第に平な曲線になると思ふべきであろう。即ち裝薬孔と空孔の距離 X を得るには爆薬の力 f と比重 Δ に一定の限度があつて所謂強い爆薬

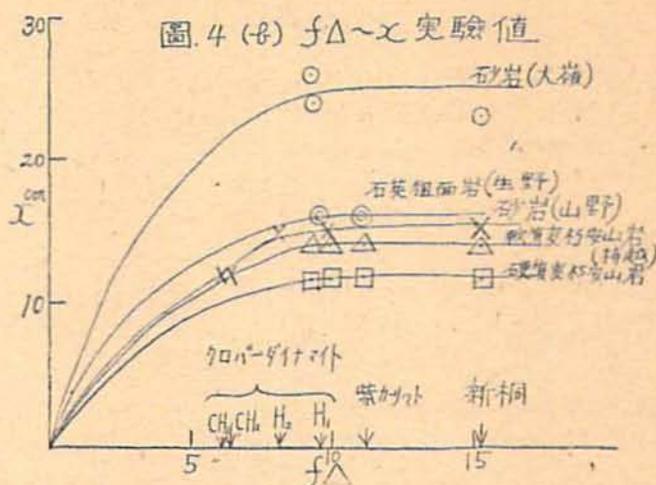


を高比重で使用しても有効とならず経済的にも原理的にも適当な $f \Delta$ の一定値が存在するという結論は実用上重要である。圖4に於て $f \Delta$ 以上爆薬の力、比重を大とした場合、エネルギー大部分が岩石の粉碎ガス噴出に失われて岩石の剪断に対してはそれ程有効とならないわけである。此の限界の $f \Delta$ は現在の處では多數の系統的な實驗に依つて求めるより途がない。先に松、新桐、カーリット及び各種のクローバダイナマイト等を用いて行つた多くの實驗の結果は上述の理論の結論を裏書してゐる。

又(12)式から爆薬の力、比重、孔径、孔數等爆薬に関する條件が同一で岩石の剪断強度 σ が異なる場合には装薬孔と空孔の距離 X は σ に逆比例する、従つて或る一定の岩石に對し一定の爆薬で實驗して X を求め得たならば他の岩石の場合には剪断強度 σ の比に逆比例して X を定めればよい。例えば砂岩に於て $X=20\text{cm}$ と出れば安山岩に於ては

$$20\text{cm} \times \frac{100\text{kg/cm}^2}{190\text{kg/cm}^2} \approx 10.5\text{cm} \text{ となる。}$$

砂岩及び安山岩に對して行はれた結果の實驗値は上の値を支持する。之計算には岩石の正確な剪断力強度の



數値が必要である。

III 大心抜の機構

小心抜を行つた後の大心抜孔 raker hole は通例圖5の形式のもの及び圖6の形式のものが一般的であるから圖5の例について考察する。圖のA孔は装薬孔で中心のC孔は小心抜後は空孔となつてゐる。小心抜を行う前の空孔 H_1, H_2, H_3 は岩石の粉碎されたもので更充填されてゐるから大心抜を行う際には幾何學的に自由面としては作用し得ないのであつて大心抜の際の幾何學的「有限自由面」はCである。このCは小心抜の前の孔径 r が $\sqrt{n+1}$ に擴大されてゐる。

n は小心抜前の空孔の數である。

圖5の4個の装薬孔の内AのみC-Aの距離が $y+X$ となるがこの差異は無視して構はない。圖6の場合には3個の装薬孔共同一條件である。今圖5の A_4 孔の作用について考察すると圖7に示す如く斜線を施した部分の岩石片IIIが A_4 の爆薬の爆轟壓力により剪断

圖 5

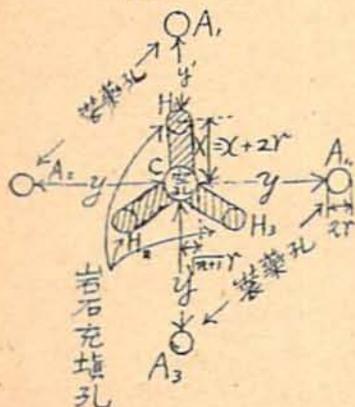


圖 6

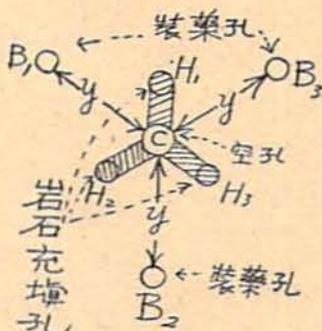


圖 7



されて左方の空孔に向つて移動する。此の場合空孔Cの半径は装薬孔A₁の半径より若干大であるから岩石片IIは固定岩壁よりの離脱が小心抜の時より容易である。又空孔が小心抜の時と異り1個しかない點以上の點を除いては先に小心抜に對して考察した式と類似の式が剪断距離 y 又は $Y=y+(1+\sqrt{n+1})r$ に對して成立する。この場合 $y \ll r$ であるから $Y \approx y$ と見てよい。即ち

$$y = \frac{1}{2e} \left\{ \pi r^2 f \Delta \left(K_1 - \frac{K_2}{1-\alpha\Delta} \right) - \frac{K_3}{1-\alpha\Delta} (\Delta\sqrt{f}) \right\} \dots\dots\dots (13)$$

(13) 式は (12) 式の n 倍である即ち

$$\frac{y}{x} = n \dots\dots\dots (14)$$

小心抜の際の x は岩石に應じて異り爆薬の力 f 及び比重 Δ が或値以上ならば $f\Delta$ には殆んど関係しない事は先に (II) に於て論じた處であるが従來の實驗値の例では x は 10~25 cm である、従つて $N=3$ のクローバ型バーンカットに於ては x と y の關係は表1の如くなる。

表 1

x	y
10 cm	30 cm
15 cm	45 cm
20 cm	60 cm
25 cm	75 cm

普通の砂岩に於て $e=15$ cm 位が適當で y は 45 cm 位にとつて適當であることは従來の多くの實驗經驗の示す處である。即ち前述の理論的考察は概ね實狀を良く説明し得ていると思われる。

IV 實際の發破の考察

大心抜以後は既に中心部の岩石が相當に粉碎されているから以後適當に拂をかけることに依り發破は順調に進むことになる。

以上の考察で明かな如くバーンカットの小心抜、大心抜は原則的には「有限自由面」を利用するものであるから一般に最初考へられた様に心抜が必ずしもきれいに抜けて出るものではないのであつて拔出す爲には別箇の工夫を要する。

實驗的には穿孔長が今の處數米ものぼすということは穿孔機の關係で實施せられず、長くて 2.5 m 短いと 1.5 m 位でバーンカットが行はれている。こうなると圖1の左方の開放自由面の影響が大ききいてきて理論的のバーンカットから大部離れてくる。即ち従來のVカット、ピラミッドカット等との混合型になつて小心抜に於ても開放自由面の爲に漏斗孔狀の岩石離脱が生じてくるから次段の大心抜に對してもVカット式の考慮を入れてくることになりその後の拂に對しても同様である。従來實施されてゐる所謂「バーンカット」には之が多く混合型なる爲に爆破計畫上、實施上幾多の混亂や誤解が起つて來て之が又最適爆薬等の判定にも關係して來るわけである。然し今後岩石穿孔能力が動力、双先合金等の面から改善されて穿孔長 l を十分長くとり又多數の穿孔を容易に行い得るようになるであろうがそうなるとバーンカット本來の面目が發揮出來るようになつて發破の機械化が實現し得るわけであつて現在でも一部に於てはバーンカットにより大いに綜合能率をあげることが行われてゐるわけでは今後益々普及發達すべきものである。

従來の發破法の理論、基礎設計式も研究改良すべき多くの點を残しているがバーンカット法自體もその機構設計式に關し今後共多くの系統的實驗と理論的研究が行われる必要がある。それに依つて爆薬等の最も合理的經濟的な使用法が確立するであらう。

文 献

- (1) 吉川, 日野, 佐藤: 「バーンカット用爆薬クローバダイナマイト」, 本誌・本號
- (2) A. W. Daw, Z. W. Daw: The Blasting of Rock 1909.