

高速の水噴流による岩石の破壊

FRACTURE OF ROCK BY HIGH SPEED WATER JET

山門 憲 雄*・横 田 章**

By Norio Yamakado and Akira Yokota

1. 緒 言

水力採炭の実用化の進行にともなって、高速の水噴流による岩石の破壊の問題が mining science では大きな関心事になってきている。一方、水力採炭の情報は土木関係へも波及し、ダム工事などに水力モニターが応用されるようになってきた。高速の水噴流によって岩石の処理ができるようになれば、鉱山だけでなく土木方面においても、その適用の可能性はかなりあるものと思われる。

ノズル出口動圧が 700 kg/cm² まで、ノズル出口口径は 2.3 mm φ までの使用が可能で、高速の水噴流発生設備を用い、高速水噴流を用いて岩石類を処理する機械の開発ならびに設計の基礎となる諸関係を実験的に求める目的で、各種岩石について実験的研究を行なったので、ここに報告する。

2. 過去の研究の概要

Buch, Williams ら¹⁾は、実験室における一連の水力採炭実験ののち、実際に炭鉱において 5 000 psi, 300 gals/min というポンプ（9 連式、プランジャー）の作動条件で、高圧水を坑外ポンプ座から切羽まで 1 700 ft 輸送し、ノズル口径 0.394 in, 圧力 4 700 psi の水噴流で無煙炭の水力採炭を行なった結果 1 t/min の採炭比および 15.72 kWh/t の採掘電力比をえたことを報告している。

国内においても、石炭技術研究所が 200 kg/cm² および 300 kg/cm² の高圧水力採炭の実用化試験を炭鉱において行っており、その成果を報告している^{2), 3)}。

他方、高速噴流水による掘削に関する基礎的研究としてはつぎのものがある。

筆者らは先に 100 kg/cm² から 300 kg/cm² の水噴流によるモルタル試料のさく孔実験を行ない⁴⁾ 300 d 以上の距離 L に関し、

$$\frac{l}{D} = \frac{kH_0}{\sigma\sqrt{\sigma}} e^{-m(L/d)}, \quad \frac{l}{D} \propto \sqrt{HL}$$

なる実験式をえた。

ここに、

l : クレーターの深さ [m]

D : クレーターの直径 [m]

L : ノズル出口から試料面までの距離 [m]

d : ノズル口径 [mm]

H_0 : ノズル出口動圧 [kg/cm²]

H_L : 衝突面の水噴流軸上流圧 [kg/cm²]

σ : モルタルの圧縮強度 [kg/cm²]

k, m : 定数 ($k \approx 34, m \approx 1.5$)

Palowitch, Malenka らによる U.S. Bureau of Mines の報告⁵⁾によれば、彼らは炭層採掘について実験的研究を行ない、4 000 psi の水噴流によるさく孔深さの実験式として、

$$l = kt^n$$

ここに、

l : さく孔深さ [in]

t : 時間 [sec]

k, n : 定数 ($k \approx 16.8, n \approx 0.4$)

をえている。水噴流を炭壁面に沿って移動させつつ、すかし溝を掘る実験も行ない、採炭能力 [t/min] はノズルの移動速度 [in/sec] に正比例し、すかし溝の深さはノズルの移動速度に対して指数関数的に減少するという結果をえている。採炭能力と水噴流の運動エネルギーとの関係についても、水圧範囲 500~4 000 psi, ノズル口径 1/4~3/4 in, ノズル移動速度 18 in/sec の条件で実験を行ない、

$$W = KE^m$$

ここに、

W : 採炭能力 [t/min]

E : 水噴流の運動エネルギー [ft·lb/sec]

K, m : 定数 ($K \approx 0.0022, m \approx 0.7$)

をえている。

Farmer, Attewell らは⁶⁾、水噴流の崩壊について考察し、分散程度の小さい水噴流の方が掘削性能のよいことを述べ、崩壊の原因として、ノズル内における流れの乱れを指摘している。それが大きいほど水噴流はノズルから短距離で崩壊する。すなわちノズルの圧力損失係数なるべく小さいノズル形状を設計しなければならない。ノズルの性能を実験的に判定する方法として、ノズル出口近傍で存在する噴流の核体部の長さを通電法で測定しそれが長いものが良好な性能のノズルであるとしている。1.19 から 4.76 mm φ までの 5 種類のノズルを用いて、500 m/sec 以下の水噴流による砂岩、石灰岩、大理石および硬石膏などのさく孔について実験的に研究し、つぎの結果をえた。実験に供した各ノズル形状のうちもっともよい結果をえたのは、絞り角の半分が 20° の流線

* 正会員 通産省資源技術試験所 採掘保安部 第1課

** 正会員 通産省九州工業技術試験所

型ノズルであった。水噴流の衝突速度が250~350 m/secの付近で、水噴流のさく孔作用は物理的に変化する。すなわち scour に変わってこの流速付近からは進行する水噴流と帰りの水流との衝突による turbulent abrasion がさく孔作用の主体となる。この速度以上で岩石をさく孔する場合について、つぎの実験式をえている。すなわち、

$$S = kd_c \left(\frac{v_0}{c} \right)^{2/3} \quad \text{および} \quad \frac{S}{t} = k'Q$$

ここに、 k, k' は定数、

S : クレーターの深さ

v_0 : 水噴流の衝突速度

Q : 流量

d_c : クレーターの直径

c : 岩石内の縦波速度

t : 噴射時間

以上が、これまでに行なわれた高速の連続噴流水による岩石(および硬い石炭)のさく孔問題についての研究の概要である。比較的低速の水噴流による研究は、特に採炭において数多くあるにもかかわらず、高速水噴流による岩石の破壊についての研究は以上のようにまだきわめて少ない。

3. 記号

d : ノズル出口口径 [cm]

d_s : 砂岩を構成する岩石粒子のモード径 [mm]

$E_{1,a}$: 岩石面上の単位長 traverse について v_a の送り速さで1回の送り動作において消費する水噴流のエネルギー [kg·cm/traverse of 1 cm]

$E_{N,b}$: 岩石面上の単位長 traverse について v_b の送り速さで N 回の送り動作において消費する水噴流のエネルギー [kg·cm/traverse of 1 cm]

E_N : 同じく v の送り速さで N 回の送り動作における水噴流のエネルギー [kg·cm/traverse of 1 cm]

H_0 : ノズル出口における水噴流の動圧 [kg/cm²]

K : 定数

L : ノズル出口から岩石試料面までの距離 [cm]

l : すかし溝の深さ [cm]

\bar{l}_1 : すかし動作1回の場合のすかし溝の平均深さ [cm]

\bar{l}_N : すかし動作 N 回の場合のすかし溝の平均深さ [cm]

$\bar{l}_{1,a}$: 遅い送り速さが v_a で、すかし動作1回の場合のすかし溝の平均深さ [cm]

$\bar{l}_{N,b}$: 速い送り速さが v_b で、すかし動作 N 回行なった場合のすかし溝の平均深さ [cm]

m : 定数

n : 定数

N : すかし動作の回数 [回]

P_e : 岩石の必要破壊圧力 [kg/cm²]

P_k : 石炭の必要破壊圧力 [kg/cm²]

Q : 流量 [cm³/sec]

t : 水噴流の噴射時間 [sec]

V_N : 単位長 traverse 当り N 回のすかし動作における消費水量 [liter/traverse of 1 cm]

v : 送り速さ [cm/sec]

v_a : 遅い送り速さ [cm/sec]

v_b : 速い送り速さ [cm/sec]

α, β : 定数

r : 水の比重 [kg/cm³]

σ_c : 岩石の圧縮破壊強度 [kg/cm²]

ϕ : Прото́дьяконов 係数

η : すかし能率 [cm/(kg·cm, traverse of 1 cm)]

4. 実験方法

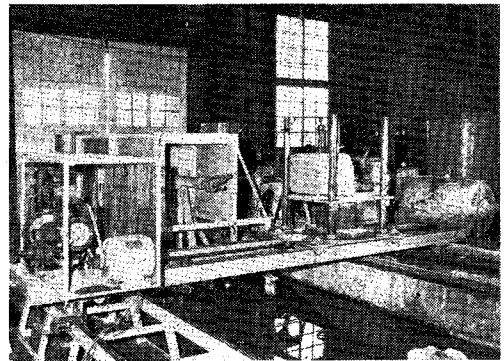
(1) 概要(図-1)

往復型高圧ポンプで高圧水を発生させ、これを高圧管路でノズルに導く。高圧管路から高圧水を放出弁によって大気中に放出する方法で、ノズルから噴出する水噴流のノズル出口動圧を必要な値に保つ。

まず、ノズル前方、水噴流の軸上に厚さ 2 cm の岩石試料をおいて水噴流によって貫通させ、岩石の必要破壊圧力を求める実験を行なった。

つぎに水噴流によって岩石にすかし溝を掘る実験を行なった。

図-1 装置全景

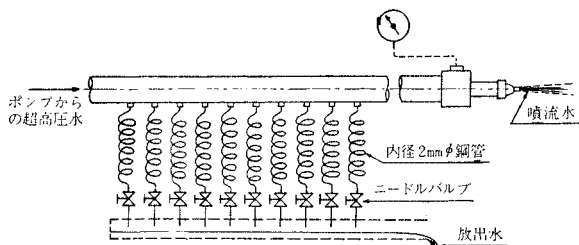


(2) 装置

a) 高圧ポンプ 3連式プランジャーポンプ(日本ユニオンKK製)で、最高吐出圧力 700 kg/cm²、吐水量 86 l/min、駆動電動機出力 150 kW である。

b) 圧力調節用放出弁 水噴流のノズル出口動圧を 700 kg/cm² 以下の希望する圧力値に自由に定めることができるため、高圧主管から水を放出する弁を用いた。図-2 にその略図を示す。高圧水は高圧主管から内径 2 mm φ の銅管を通り、ニードル弁出口から大気中へ放出

図-2 圧力調節用放出弁



される。この際、高压主管内の水圧が 700 kg/cm^2 のとき、銅管内を流れる水の摩擦損失によって弁出口から噴出する水の動圧が弁全開において約 5 kg/cm^2 になるように銅管の長さを選定した。ポンプ運転開始時には、各放出弁はすべて全開し、定常運転に入ったのち、ノズル出口動圧が希望の値に達するまで弁を1個ずつ閉じて行く。

直接高压主管に放出弁を取付ける普通の方法では、放出水がきわめて高速であるため、弁は潰食を受けてたちまち使用不能となる。しかし上記の方法の採用により、弁の故障をみないうちに実験を終ることができた。

e) ノズル (図-3) ノズル出口付近の直線部分の長さは、ノズル出口内径の4倍とし、かつこの直線部分の流速は約 350 m/sec という高速であるため、摩擦や潰食を防止するためこの部分には超硬合金を用いた。ノズル出口の真円精度、内面の粗さや突起の存在は水噴流の性能に非常に鋭敏に影響するので、特に注意して製作した。出口口径、 0.154 、 0.21 および 0.225 cm の3個を準備した。

d) 必要破壊圧力測定用試料ホルダー 噴流軸の方

図-3

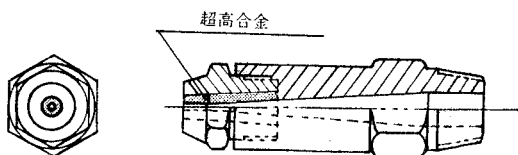


図-4 鋼製ホルダー

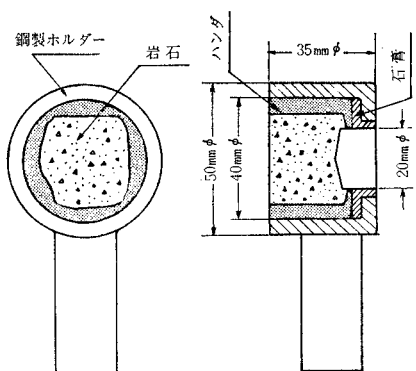
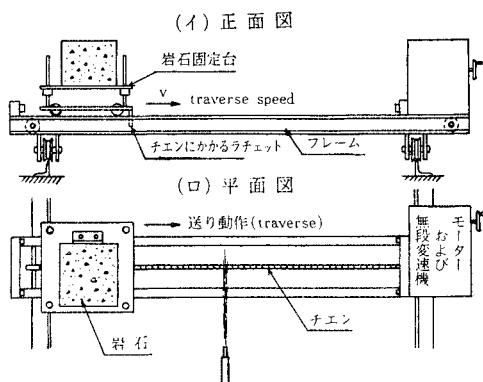


図-5 送り装置略図



向に沿って床に敷設されたレール上を移動および固定可能な台車に万力を取付け、これに図-4に示す岩石試料ホルダーをくわえ、試料面に水噴流が衝突するようにセットする。

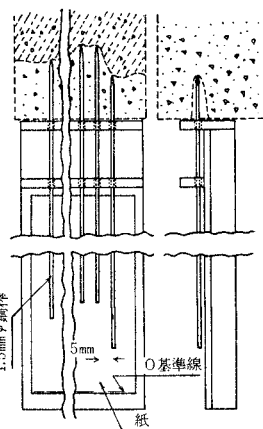
e) 岩石試料送り装置 (図-5) 岩石試料にすかし溝を定速で掘るために試料を水噴流に対して移動させる装置であり、噴流軸に平行に敷設されたレール上を移動ならびに固定が可能なフレーム、上下可能な岩石固定台 ($50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ の岩石試料搭載)、この固定台を送るチェーン、無段変速機およびモーターとからなり、固定台の送り速度は 1 cm/sec から 100 cm/sec まで無段変速が可能である。

f) すかし溝の深さ

測定器 (図-6)

この測定器の前縁をすかし溝の入口部の岩石面にあてて、 5 mm 間隔に30本平行に並んだ先端の尖った $1.5 \text{ mm} \phi$ の鋼棒をすかし溝に順次さしこみ、基準線から鋼棒後端までの長さによって、すかし溝の深さを測定する。

図-6 深さ測定器



(3) 使用試料

主として各種砂岩について実験を行ない、頁岩、かこう岩、安山岩、石灰岩、モルタルおよびコンクリートブロックについてはそれぞれ1ないし2種類の試料を用いた。

(4) 岩石の必要破壊圧力

平面状の岩石面に水噴流を垂直に衝突させ、その噴流のノズル出口動圧を放出弁調節によって上昇させて行く。水噴流と岩石との衝突面における水噴流の動圧が、ある限界値以下では、初めに水噴流の動圧が低いあいだ

衝突面には何らの形状変化も起こらない。しかしその動圧が上昇してくるにつれて衝突面に潰食⁷⁾が発生し、岩石に徐々に潰食凹みが進行して行く。衝突面に作用する水噴流の動圧が限界値を越えた瞬間に衝突面の岩石は突然急速に進行する破壊現象を示し、さく孔される。このさく孔において単位時間に破壊分離される岩石の量は、前の段階の潰食による岩石量の数十倍から数百倍に達する。この破壊進行速さの飛躍点を示す衝突面の水噴流の動圧(限界値)を水噴流による岩石の必要破壊圧力 P_e と定義することにする。

P_e を直接実験的に求める方法として、つぎの手段を採用した。4.(2)d) に述べた図-4 に示す鋼製ホルダーの中に厚さ 2 cm の岩石試料をおき、底部は石膏、周囲は融点の低い合金で埋める。周囲を合金で埋める理由は、岩石試料に水噴流が衝突したとき貫通孔が生ずることなく、試料が不規則にわれて四散してしまうのを防ぐためである。ホルダーをノズル前方に水噴流と岩石試料とが垂直にかつ水噴流が試料面の中心にあたるように固定する。ノズルは出口の口径 2.1 mm ϕ のものを使用し、ノズル出口と試料面とのあいだの距離は 5 cm である。この距離では、2.1 mm ϕ の水噴流の場合、動圧降下は無視できて、岩石面における水噴流の動圧はノズル出口動圧に等しいとしてよい。しだがつてノズル出口動圧を測定して行けば、水噴流の衝突面における動圧を知ることができる。

岩石試料面に水噴流をあて、放出弁を閉じ、その動圧を上昇させて行き、水噴流が厚さ 2 cm の岩石試料を貫通したときのノズル出口における水噴流の動圧をもって、その岩石の必要破壊圧力 P_e とする。

一方、各岩石の一軸圧縮破壊強度 σ_c 、および ИГДАН 法による Прото́дьяконов 係数 ϕ (注) を測定する。

(5) 高速水噴流により岩石にすかし溝を掘ること

表面が平面状の岩石試料面に高速の水噴流を垂直に衝突させつつ、岩石面を噴流軸に直角方向(水平)に等速直線運動させて岩石試料にすかし溝を作って行く。試料面を水噴流が1回横切つてすかし溝を掘ることを「1回の送り動作」と呼ぶことにする。岩石試料の固定と噴流に対する送り(すなわち等速直線運動)は、4.(2)e) に述べた装置によって行なう。

予備的実験によって、すかし溝の深さ l は溝に沿ってかなり不規則に変動することが判明していたので、4.(2)f) で述べた図-6 の深さ測定器によって深さを記録し、その平均値をもってすかし溝の平均深さ \bar{l} とした。

すかし溝を掘る実験条件を規定する変数は、問題をすかし溝の発生機構という側面からでなく現象論的にみる場合には、さしあたって H_0, d, L, P_e および v であ

る。すかし溝の平均深さ \bar{l}_1 に対する上記の各変数の関係

$$\bar{l}_1 = f(H_0, d, L, P_e, v) \text{ [cm]} \dots \dots \dots (1)$$

の実験式をうるために各変数ごとにすかし溝を掘る実験を行ない、4.(2)f) の深さ測定器によって \bar{l}_1 を測定し、 \bar{l}_1 と各変数との関係を実験的に求める。

つぎに \bar{l}_N と N との関係については、同じすかし溝を同じ条件で N 回すかし動作を行ない \bar{l}_N を測定する。

5. 実験結果

(1) 必要破壊圧力に関する結果

岩石試料が高速水噴流の垂直衝突によって貫通あるいは潰食をうけた状況を図-7 の写真に示す。この写真中 c, d は 700 kg/cm² の動圧によっても貫通せず潰食をうけるにとどまった岩石である。

図-8 に示す通り、この実験の範囲における砂岩については、 P_e と σ_c との相関関係はないとしてよい。

他方、 P_e と ϕ との間には図-9 にみるように、比較的良好な比例関係がみられる。

図-7

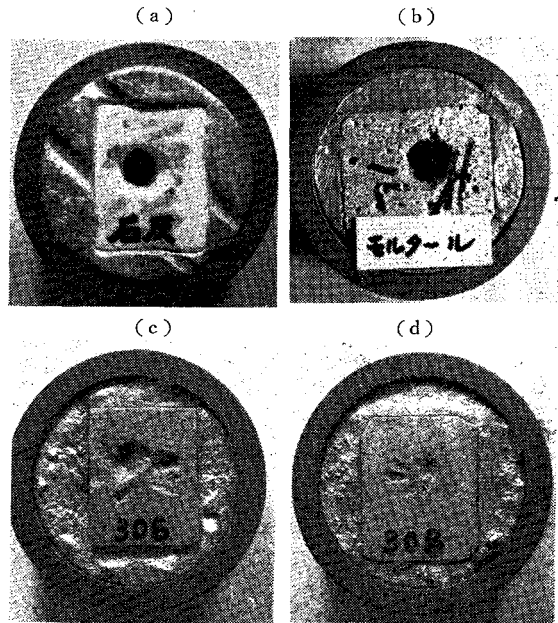
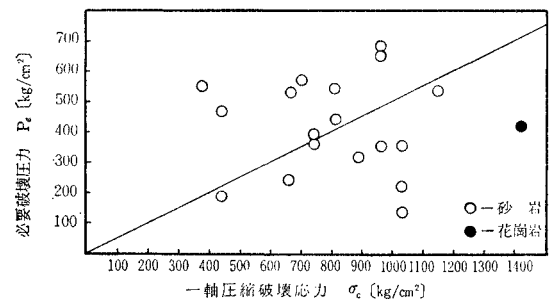


図-8 P_e と σ_c との関係



(注) 図-A, 図-B

図-9 P_c と ϕ との関係

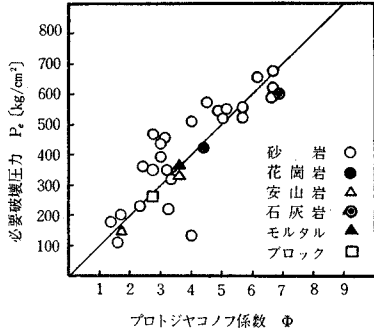


表-1

	σ_c	ϕ	岩種
A 群	515	7.3	細粒砂岩
	515	8.0	頁岩
	960	7.3	細礫岩
	1110	8.0	微粒砂岩
	1330	7.3	粗粒砂岩
B 群	110	6.2	砂質頁岩
	665	4.0	微粒砂岩
	1180	5.4	微粒砂岩

P_c を求める実験において、700 kg/cm² の動圧でも貫通せず岩石表面に潰食だけが生じた試料を表-1 に示す。

(2) すかし溝を掘る実験結果

a) すかし溝の深さの変動 すかし溝の深さ l が溝の方向に不規則であることは先に述べたが、その変動係数は、安山岩など火成岩では約 6%, 砂岩やモルタルでは約 15% である。

送り速さの速い方が遅い場合よりも変動係数は小さくなる傾向がある。

b) \bar{l}_1 と各変数との関係 送り動作が 1 回の場合についての実験結果のうち、代表的な例について示すと、つぎの図-10, 11, 12, 13 および 14 のとおりである。

図-10 \bar{l}_1 と H_0 との関係

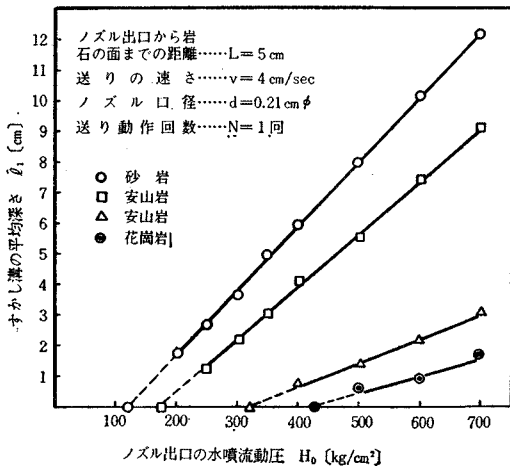


図-11 \bar{l}_1 と d との関係(砂岩, 安山岩の一例)

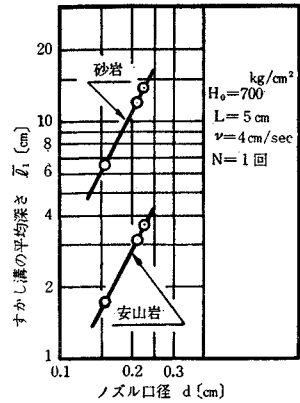


図-12 \bar{l}_1 と L との関係(砂岩の場合の一例)

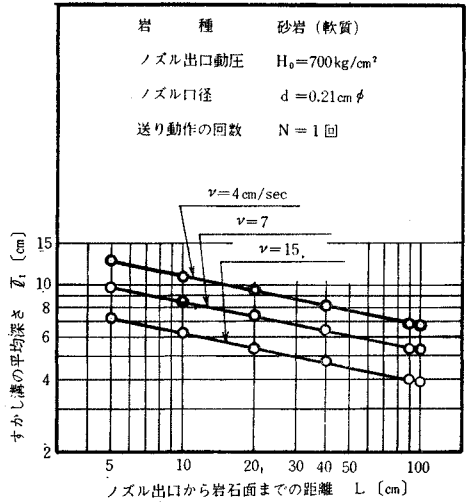


図-13 \bar{l}_1 と $(H_0 - 100\phi)/100\phi$ との関係

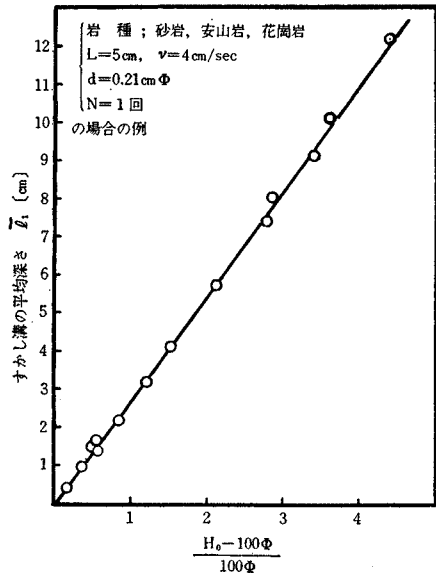


図-14 \bar{l}_1 と v との関係(砂岩の場合の一例)

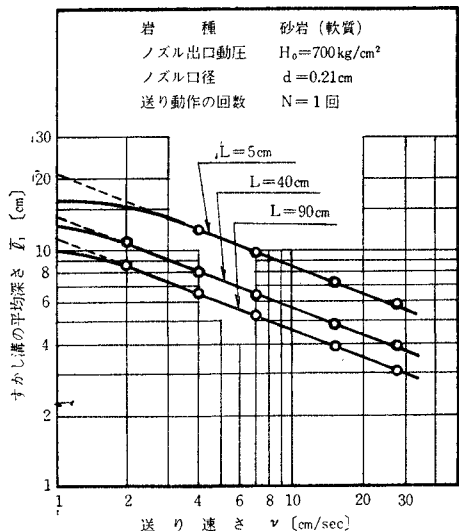
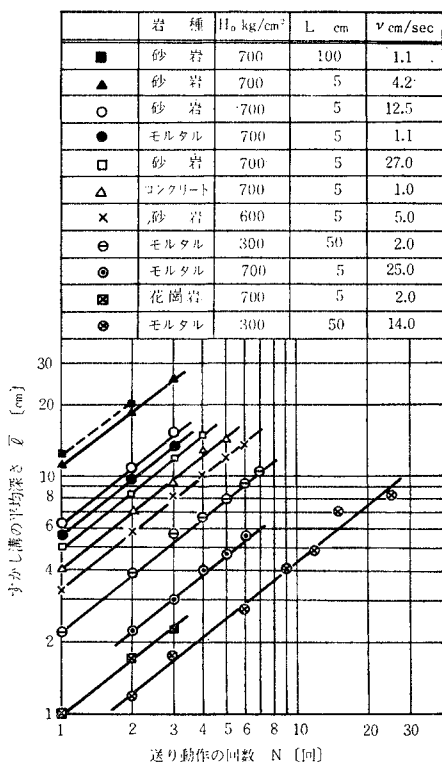


図-15 \bar{l}_N と N との関係



c) \bar{l}_N と N との関係 同一の岩石について, H_0 , d , L および v をパラメーターとして同じすかし溝を何回も送り動作を行なって, すかし溝を掘った場合についての結果のうちの一例を図-15に示す。

6. 考察

(1) 岩石の必要破壊圧力について

石炭の水力破壊実験から, 石炭の必要破壊圧力 P_k は

$$P_k = \frac{\sigma_c}{2} \text{ [kg/cm}^2\text{]} \dots\dots\dots(2)$$

であるといわれている⁸⁾。crack が非常に発達している石炭に比較して, 岩石では crack の発達程度は小さい。したがって式(2)の係数 1/2 は, 岩石の場合には大きい値をとるが, 式の形としては式(2)の形が保たれるであろうという推定もなしうる。しかしながらこの推定は図-8に示すとおり否定された。

他方, P_e と ϕ との間には比較的良好な比例関係がみられる。これは岩石の場合, 静的一軸圧縮破壊強度よりも, 衝撃的な破壊により生じた粉体量を破壊強度の指標としてとっている ИГД·АН 法による ϕ の方が水噴流による岩石破壊の様式をよく反映しているためである。

図-9から, この実験範囲で成立する実験式として

$$P_e = 100\phi \text{ [kg/cm}^2\text{]} \dots\dots\dots(3)$$

をうる。

700 kg/cm² の水噴流によって貫通されなかった岩石試料は, その性質から表-1に示すように A, B 2つの群に分類できる。A 群の各試料は ϕ の値が非常に大きく 700 kg/cm² よりもさらに高速の水噴流によれば貫通し, P_e を求めることができると推定される。B 群のものは特別であって, ϕ の値が小さいにもかかわらず, 700 kg/cm² の水噴流によって貫通されない岩石であって, これらの岩石については式(3)の関係は成立しない。B 群の岩石の特徴は, 粒度が微小でかつ岩石の組織がきわめて緻密なことである。たとえば, ある種の頁岩や粘板岩などもこれである。このような岩石の挙動は興味深いものではあるが, 今回の整理方法の外にでるものであり, 別の機会にゆかざる。

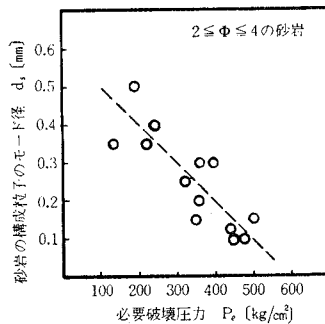
(2) 砂岩の P_e に対する粒度補正について

図-9にみるとおり, 砂岩について式(3)の関係は, $2 \leq \phi \leq 4$ で特に偏差が大きい。 ϕ のこの範囲について砂岩のモード径 d_s と P_e との関係をみると, 図-16のようになる。これから粗な関係として

$$P_e \approx (100\phi + 300) - 1000 \cdot d_s \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

ただし, $2 \leq \phi \leq 4$, d_s : モード径 [mm]

図-16 砂岩の構成粒子のモード径必要破壊圧力との関係



が成立つとみてよい。

(3) すかし溝の平均深さについて

a) \bar{l}_1 について \bar{l}_1 は $(H_0 - P_e)/P_e$ に依存すると考えることができる。その他のパラメーターについては、予備の実験の経験を考慮し、実験式として次式を仮定した。

$$\bar{l}_1 = \frac{Kd^\alpha}{L^m} \left(\frac{1}{v}\right)^n \left(\frac{H_0 - P_e}{P_e}\right)^\beta \quad [\text{cm}] \quad \dots\dots(4)$$

P_e として式(3)を用いると

$$\bar{l}_1 = \frac{Kd^\alpha}{L^m} \left(\frac{1}{v}\right)^n \left(\frac{H_0 - 100\phi}{100\phi}\right) \quad [\text{cm}] \quad \dots\dots(5)$$

と書ける。

5. (2) b) で述べた実験結果から、この実験の範囲内、すなわち

$$200 \leq H_0 \leq 700 \text{ kg/cm}^2$$

$$0.154 \leq d \leq 0.225 \text{ cm}$$

$$5 \leq L \leq 100 \text{ cm}$$

$$3 \leq v \leq 30 \text{ cm/sec}$$

$$1 \leq \phi \leq 7$$

では、式(5)の定数はつぎのように定まる。

$$\alpha=2, m=0.2, n=0.4, \beta=1$$

以上の結果を用いて

$$(H_0 - 100\phi)/100\phi \text{ と } (\bar{l}_1 L^{0.2} v^{0.4})/d^2$$

との関係を plot すると図-17 をうる。これから、この実験範囲では

$$K=150$$

である。

(5) で v がきわめて小なる場合は、水噴流が岩石面

図-17

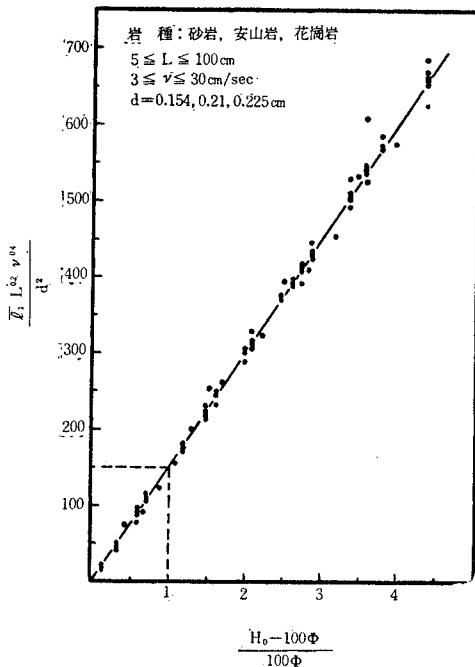
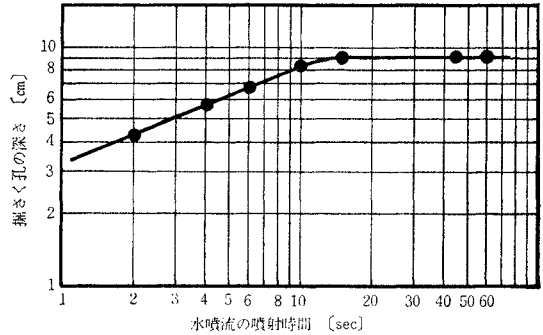


図-18 モルタル試料面上の1カ所に水噴流を衝突させた場合、噴射時間とモルタルを生じた掘削孔の深さとの関係



の1カ所をさく孔しつつあるものと考えられる。 $1/v$ は時間の次元であるからこれを t で置換し、この t を水噴流の噴出終了までの時間と考えるならば、

$$(\text{さく孔深さ}) \propto t^{0.4} \quad [\text{cm}]$$

であり、これは U.S. Bureau of Mines の実験⁵⁾ならびに筆者らの追実験(図-18)とも一致する。

なお、図-10 において $\bar{l}_1=0$ における H_0 は、すなわちその岩石の P_e であるといえる。図-10 からえられる各岩石の P_e ($\bar{l}_1=0$ での H_0 の値) は 4.(4) の方法で直接求めた P_e とよく一致している。したがって 4.(4) の方法は妥当であるといえよう。

b) \bar{l}_N について 5. (2) c) に述べた実験結果からつぎの実験式がえられる。

$$\bar{l}_N = \bar{l}_1 \cdot N^{0.8} \quad [\text{cm}] \quad \dots\dots(6)$$

ただし、 H_0, d, L および v はパラメーターとして一定とする。今回の実験では岩石試料の大きさ(約 40 cm × 40 cm × 40 cm) の制限のため、 \bar{l}_N が 30 cm までしか実験できなかった。 \bar{l}_N が 30 cm 程度までおよびこの実験における H_0, d, L および v の範囲では式(6)が成立する。

c) E, N, v 間の関係 同一の岩石(つまり $\phi=1$) にかつ H_0, d, L がパラメーターとして一定の場合、遅い送り速さ v_a で1回の送り動作によって、岩石面上の単位長 traverse に対してすかし溝の平均深さ $\bar{l}_{1,a}$ を掘る際に消費する水噴流のエネルギー $E_{1,a}$ と、すかし溝の同じ平均深さをうるために速い送り速さ v_b で N 回の送り動作を行なう際に消費する水噴流のエネルギー $E_{N,b}$ との関係について考察する。

まず、 $\bar{l}_{1,a}$ は式(5)から

$$\bar{l}_{1,a} = \frac{150 d^2}{L^{0.2}} \left(\frac{1}{v_a}\right)^{0.4} \frac{H_0 - 100\phi}{100\phi} \quad [\text{cm}] \quad \dots\dots(7)$$

$E_{1,a}$ は、

$$E_{1,a} = r Q H_0 \left(\frac{1}{v_a}\right) \quad [\text{kg} \cdot \text{cm}/\text{traverse of 1 cm}]$$

$$\dots\dots\dots(8)$$

一方、 v_b の送り速さで、 N 回の送り動作を同じすか

し溝に対して行なってえられるすかし溝の平均深さを $\bar{l}_{N,b}$ とすると、式(6)、(7)から

$$\bar{l}_{N,b} = \left[\frac{150 d^2}{L^{0.2}} \left(\frac{1}{v_b} \right)^{0.4} \frac{H_0 - 100 \phi}{100 \phi} \right] \cdot N^{0.6} \text{ [cm]} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$E_{N,b}$ は

$$E_{N,b} = \tau Q H_0 \left(\frac{1}{v_b} \right) \cdot N \text{ [kg}\cdot\text{cm/traverse of cm]} \quad \dots\dots\dots(10)$$

主題から、 $\bar{l}_{1,a} = \bar{l}_{N,b}$ とし、式(7)、(9)から

$$N = \sqrt{\frac{v_b}{v_a}} \text{ [回]} \quad \dots\dots\dots(11)$$

をうる。

他方、式(8)、(10)から

$$\frac{E_{1,a}}{E_{N,b}} = \frac{v_b}{v_a} \cdot \frac{1}{N} \quad \dots\dots\dots(12)$$

したがって式(11)、(12)から

$$\frac{E_{1,a}}{E_{N,b}} = \sqrt{\frac{v_b}{v_a}} = N \quad \dots\dots\dots(13)$$

をうる。

式(11)および(13)は、それぞれ送り速さが異なる場合、岩石に同一の平均深さのすかし溝を掘るに要する送り動作の回数および水噴流の消費エネルギーの比を示している。

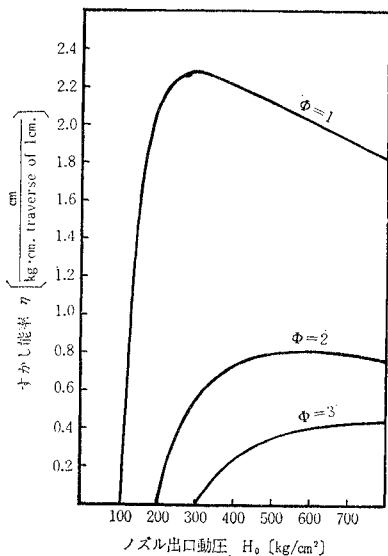
d) すかし能率 η 岩石の単位長 traverse に対して N 回の送り動作を行なう間に投入される水噴流のエネルギーを E_N とし、 E_N によって岩石に生じたすかし溝の平均深さを \bar{l}_N とすると、式(9)、(10)から

$$\eta = \frac{\bar{l}_N}{E_N} = \frac{4316}{L^{0.2}} \cdot \frac{v^{0.6}}{N^{0.2}} \cdot \frac{H_0 - 100 \phi}{100 \phi H_0^{1.5}} \quad \dots\dots\dots(14)$$

[$\frac{\text{cm}}{\text{kg}\cdot\text{cm}\cdot\text{traverse of 1 cm}}$]

図-19 η と H_0 との関係

(ただし、 $v=4\text{ cm/sec}$ 、 $L=5\text{ cm}$ 、 $N=1$ 回の場合の例)



をうる。式(14)から、 η は ϕ の増加とともに減少すること、かつ $H_0=300\phi$ のときに、すかし能率は最大となることが知られる。 H_0 と η との関係を図-19に示す。

e) 消費水量について 最後に、消費水量とすかし溝の平均深さについて考察する。岩石面上単位の traverse 長さに対して N 回送り動作を行なう場合の消費水量を V_N とすると、

$$V_N = 1.1 d^2 \sqrt{H_0} \left(\frac{1}{v} \right) \cdot N \left[\frac{\text{liter}}{\text{traverse of 1 cm}} \right] \quad \dots\dots\dots(16)$$

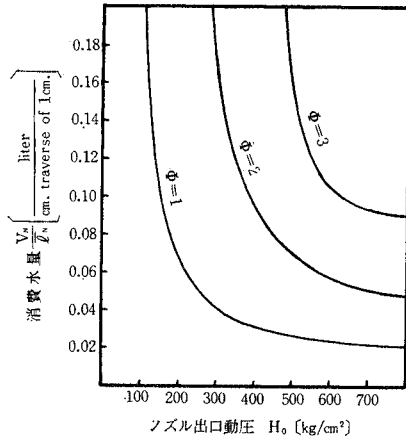
これと式(9)とから

$$\frac{V_N}{\bar{l}_N} = \frac{L^{0.2}}{136} \cdot \frac{N^{0.2}}{v^{0.6}} \cdot \frac{100 \phi \sqrt{H_0}}{H_0 - 100 \phi} \left[\frac{\text{liter}}{\text{cm}\cdot\text{traverse of 1 cm}} \right] \quad \dots\dots\dots(17)$$

をうる。式(17)から V_N/\bar{l}_N と H_0 との関係がえられ、その一例を図-20に示す。

図-20 V_N/\bar{l}_N と H_0 との関係

(ただし、 $v=4\text{ cm/sec}$ 、 $L=5\text{ cm}$ 、 $N=1$ 回の場合の一例)



〔補遺〕 斜め噴射について

以上の実験はすべて岩石面に水噴流が垂直に衝突する場合であったが、斜めに衝突してすかし溝を掘る場合には、溝の掘り方に図-21に示すように(a)方式と(b)方式とがある。安山岩に斜め衝突ですかし溝を掘った場

図-21

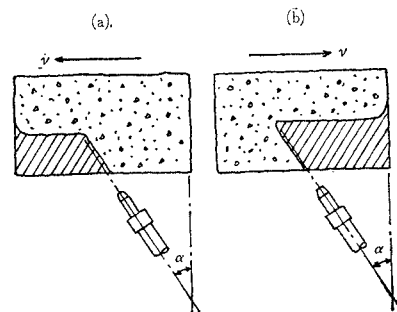


表-2

岩石面の法線に対する ノズルの勾配 $\tan \alpha$	すかし溝の平均深さ \bar{l}_1 (cm)	
	方式 (a)	方式 (b)
0	4.6	4.6
1/2	4.0	4.8
1	3.1	3.6

合の一例を表-2 に示す。この結果をも含めて一般に、(b) 方式で $\tan \alpha = 1/2$ としてすかし溝を掘るのが最も有利である。

7. 結 論

(1) 700 kg/cm²以下の動圧の水噴流の衝突による岩石の必要破壊圧力は、ИГД·АН 法による Протодряконов 係数 ϕ から大略求めることができる。砂岩の場合には、その最大頻度粒径が、必要破壊圧力に関係し、したがってモード径による補正が必要である。

(2) 700 kg/cm²までの動圧の水噴流によって、安山岩、砂岩、モルタルなどにすかし溝を掘ることが可能であり、すかし溝の平均深さを他のパラメーターによって定量的に表現する実験式 (5) をえた。

(3) 送り速さを速くし、同一のすかし溝について何回も送り動作を行なって溝を掘る方が、遅い送り速さで1回に同一深さのすかし溝を掘るよりも水動力は少ない。

(4) すかし能率は最大値 η_{max} が存在して、その場合、 $H_0 = 300 \phi$ である。 ϕ が増加すると η は減少する。

(5) ノズル出口動圧 H_0 が大きいほど、単位の深さのすかし溝を掘るに要する水量は少ない。

(6) 前述の (b) 方式で $\tan \alpha = 1/2$ として掘る場合が最も深く掘ることができて、垂直衝突の場合に比較してすかし溝の平均深さは一般に数 % 深く掘れる。

以上、高速の水噴流による比較的硬い岩石の破壊について実験し考察を行なったが、筆者らは、高速水噴流は硬い岩石を対象とするよりもむしろ土質あるいは可成り loose な岩石のさく孔、溝切り、切崩し等々に応用される場合に威力を発揮した応用面も広いと考えている。この方面の研究についてはつぎの機会にゆづる。

謝 辞 この実験的研究についてご指導頂いた佐々木和郎探鉱保安部長、栗原一雄第1課長および実験を手伝って頂いた宮下行忍技官に感謝の意を表します。

(付記) 本報告の概要は、日本鉱業会昭和 41 年度春季大会において講演

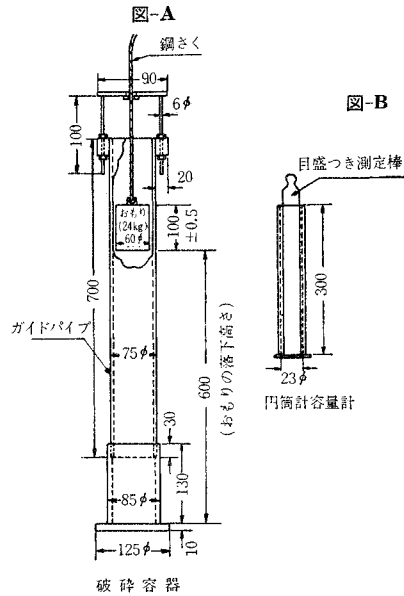
(注) ИГД·АН 法

サンプリングした岩石を適当に破碎したのち、平均寸法 25×25 mm の試料にフルイ分し、その 75 g をとって、図 A の装置の底に平にならべたのち、2.4 kg の重錘を

600 mm の高さから n 回落下させて試料を破碎する。破碎された試料全体を 0.5 mm 目のフルイによって分級し、フルイ下の粉体全量を図 B のような直径 23 mm ϕ の容量計に移し、その高さを mm 目盛で読み取り、これを h_1 とする。この操作を 5 試料について実施し h_1 から h_5 の高さの和を $\sum_{i=1}^5 h_i$ とすると

$$\phi = \frac{20n}{\sum_{i=1}^5 h_i}$$

によってプロト ज्याコノフ係数 ϕ が定まる。岩石の硬さにより n は 10 回まで増加してよい。



参 考 文 献

- 1) Buch, John. W. and Ivor. L. Williams : Hydraulic Mining of Anthracite, Experiment at the Sugar Notch Mine Wilkerson-Barre, Pa Mining Cong. J. July 1962, p. 22~28.
- 2) 超高压水力採炭の試験：石炭技術研究所報告，第28号，昭和40年2月
- 3) 砂川炭鉱における超高压水力採炭の試験：石炭技術研究所報告，第34号，昭和40年9月
- 4) 山門憲雄・横田 章：高压噴流水による掘さくの研究(要旨)，日本鉱業会誌，1963-10, Vol. 79, No. 904, p. 764~766.
- 5) Palowitch, E.R., and W.T. Malenka : Hydraulic Mining Research—A Progress Report, Mining Cong. J. September 1964, p. 66~73.
- 6) Farmer, I.W., and P.B. Attewell : Rock Penetration by High Velocity Water Jet, A Review of the General Problem and an Experimental Study, Int. J. Rock Mech. Mining Sci. Vol. 2, p. 135~153, 1964.
- 7) 高速水噴流の衝突による固体の壊食と水噴流の構造について (未発表論文)
- 8) Цлпко, Н.Ф. И А.М. Чапка : Гильерооббойка углл на июбнечных рбьомах, 1960. (1966.3.7・受付)