研究報告

空気圧さく岩機の動特性におよぼす岩石の種類の影響

高橋 義雄, 渋谷 嗣
大日方 五郎, 中村 富雄

Effect of the Property of Rock on the Dynamic Characteristics of a Pneumatic Rock-Drill

by

Yoshio TAKAHASHI[†], Yotsugi SHIBUYA[†]
Goro OBINATA[†] and Tomio NAKAMURA[†]

Since a drill must have enough power to crush various rocks, it is necessary for the analysis of the dynamic characteristics of a pneumatic rock-drill to consider the physical property of rock under drilling. Thus, the effect of the property of rock on the dynamic characteristics of the drill was examined experimentally by using four kinds of rocks. The following results were obtained.

(1) Although the blow velocity and the air consumption are not affected by the property of rock, the number of blow is greatly affected and increased with increasing Shore-hardness of rock. This fact indicated that Shore-hardness of rock must be considered as a factor affecting the dynamic characteristics of the drill.

(2) Considering the fact that the net thermal efficiency increases with increasing performance-index under drilling, it is confirmed that the previous criterion presented by one of the authors can be applied for the design of a pneumatic rock-drill.

Key Words : Pneumatic Rock Drill, Dynamic characteristics, Rocks,
Performance index.

1. 緒 言

空気圧さく岩機は油圧さく岩機と同様に、シリンダ内でピストンを往復運動させてロッドを打撃すると同時に回転を与えて岩石を穿孔する機械である。

これまで空気圧さく岩機を設計するための基礎的研究として、空気圧さく岩機の内部構造ならびに寸法諸

元などの諸因子がその性能にどのような影響を与えるのかを理論と実験とにより検討、考察を加え、とくに空気圧さく岩機の性能が理論的に評価できることを指摘した¹⁾

一方、従来から種々の空気圧さく岩機で特定の岩石を実際に穿孔し、その穿孔速度がどう変化するかを実験的に検討した実用上重要な応用的研究が数多く行われている^{2),3),4)}

このように、より性能の優れた、すなわち空気の圧力エネルギーをできるだけ効率よくピストン打撃エネルギーに変換する空気圧さく岩機の設計に関する機械工学的立場の研究と被打撃体である岩石の種類による穿孔

平成元年 7 月 25 日 受付

秋田大学鉱山学部生産機械工学科, 〒010 秋田市手形学園町 1-1

[†]Department of Mechanical Engineering for Production, Akita University, Akita 010 Japan.

の難易さ、すなわち岩石のさく孔性によって空気圧さく岩機の穿孔速度がどう変化するか、その穿孔能率の向上に関する採鉱学的立場の研究とは、それぞれ別々の課題としてあつかわれているのが現状である。

空気圧さく岩機の穿孔能率を岩石との関係において検討する場合、岩石のさく孔性の尺度として一般的にはショア硬度、一軸圧縮強度および弾性波伝ば速度が用いられている。しかし、空気圧さく岩機の構造上、ピストンはその前、後室側の受圧面積差と圧力差によって往復運動するが、ピストンがロッドシャンク端を打撃するとビットは岩石に貫入すると同時にその一部のエネルギーはロッドを介してピストンに反発エネルギーを与え、ピストンはある初速度で後退する。このように、岩石の種類によって岩石の反発力とビットの貫入量は、空気圧さく岩機の動特性に影響を与えることより、ここではピストン、ロッド、岩石を一つのシステムとしてとらえることを提案したい。

そこで本報では、TY 16型打撃式空気圧さく岩機で4種の岩石を実際に穿孔して、その動特性におよぼす岩石の種類の影響を検討、考察した。同時に岩石の反発係数とビットの貫入量とを考慮した空気圧さく岩機の理論性能解析で、とくに岩石の反発係数とその正味熱効率に影響をおよぼすという理論結果⁵⁾を実験的に検証したので、その結果についても報告する。

2. 空気圧さく岩機の動特性と岩石の反発係数

佐々木ら²⁾と高岡ら³⁾は、特定の空気圧さく岩機で種々の岩石の穿孔試験を行い、岩石のショア硬度が増大するほどその穿孔速度が減少することを指摘している。

一方、岩石を実際に空気圧さく岩機で打撃穿孔する場合のピストンとロッドなどの挙動を考えると、圧縮空気が持っている圧力エネルギーはピストン打撃エネルギーに変換され、ピストンがその打撃エネルギーをロッドに伝達し、岩石の種類で異なるがそのエネルギーの数十%以上は岩石を破碎するのに費やされ、ピストンもロッド、ビットとともにわずかに前進し、ビットが岩石に貫入する。残りのエネルギーはロッド、ピストンにかえってピストンを押しもどそうとする。この押しもどそうとするエネルギーはピストンを後退させる初速度、すなわちピストンに反発を与える結果となる。

このように岩石の反発係数とビットの貫入量はピストンの運動、すなわち空気圧さく岩機の動特性を左右

するものと考えられる。

一般にショア硬度がわかればその定義式より反発係数は一義的に求まる。Fig. 1は岩石の反発係数(e)とショア硬度(H_s)との関係を示したもので、図中の a 曲線はショア硬度から求めた反発係数の計算値である。実際に空気圧さく岩機で岩石を穿孔する場合、ピストンは岩石を直接打撃するのではなく、ロッドを介してある程度減衰したエネルギーが岩石を破碎することになる。それで鋼鉄同志の反発係数 $e = 5/9$ ⁶⁾を a 曲線に乘じ、この時の反発係数が空気圧さく岩機に適用する場合に近い値であるとの考えで求めたのが図中の b 曲線である。一方、佐々木ら²⁾はショア硬度をさく岩抵抗の指標とは考えられないとして、岩石面に与える打撃力をさく岩機のそれと同程度に大きくし、岩石全体の平均硬度を求めるためショア硬度計のように1点とせずカービットを用いてハンマの跳上り高さを測定してそれを反発硬度としている。その実験結果が図中の丸印である。実験値はショア硬度が小さいところで外れているが、 a 曲線に $7/9$ を乗じた破線と b 曲線との間に入っている。このような結果から反発係数すなわちショア硬度は、岩石を打撃穿孔する場合の抵抗の大小を表す因子として用いられていたものと考えられる。

したがって本研究では、空気圧さく岩機の構造上、とくに岩石の反発係数を取りあげ、その動特性への影

Fig. 1 Relationship between coefficient of restitution (e) and Shore hardness of rock (H_s).

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus.

響を実験的に調べ、検討考察した。

3. 実験装置および方法

3.1 実験装置

Fig. 2 は実験装置の回路図で、著者ら⁷⁾が開発したさく岩機用電気・油圧駆動送り装置、空気圧さく岩機作動部および検出測定記録部より構成されている。

電気・油圧駆動送り装置は岩石の種類に応じたさく岩機の送りが制御できるものであり、主に油圧発生装置、電気・油圧サーボ弁、サーボアンプ、油圧モータ、歯車、ボールねじおよび空気圧さく岩機などから構成されている。空気圧さく岩機を作動させるとライフルバ、スリーブなどが回転するが、その回転量を電磁ピックアップによってパルスに変換し、それが入力信号となる。その入力信号であるパルス数に比例した圧油が電気・油圧サーボ弁を通して油圧モータに送られ、歯車とボールねじを介して空気圧さく岩機が前進し、岩石を打撃穿孔できるような装置となっている。

また、コンプレッサで圧縮された空気は大レシーバ、自動圧力調整装置を通して一定の圧力に保持され、一時小レシーバに入り、コックの操作で空気圧さく岩機を作動できるようにしている。

一方、空気圧さく岩機の動特性を求めるための検出測定部として圧力変換器、変位計、流量計などを備えており、さく岩機の送り量、さく岩機への圧縮空気の入気圧力と入気温度、シリンダ前、後室内圧力、ピストン変位および空気消費量を同時に検出し、電磁オシログラフに記録できるような検出測定記録部を本装置は持っている。

供試空気圧さく岩機は TY 16型打撃式さく岩機であり、カービットを用いた。

3.2 実験方法

空気圧さく岩機を作動させると本電気・油圧駆動送り装置がさく岩機を最適制御の状態で作動させ、岩石を打撃穿孔する。この場合の油圧の大きさは1.47 MPa。一定とし、また空気圧さく岩機の入気圧力 (P_i) は0.392~0.588 MPa (ゲージ圧) の範囲で変化させ、前項で述べたように、ピストン変位、シリンダ前、後室内圧力、入気圧力とその温度、さく岩機の送り量および空気消費量を同時に検出測定記録し、空気圧さく岩機の動特性を岩石の種類別に求めた。

3.3 供試岩石

Fig. 1 に見られるように、一般に穿孔されている岩石のショア硬度は60~100の範囲にある。本研究においては Table 1 に示すような比較的ショア硬度が大きい4種類の岩石を用いて穿孔実験を行った。

Table 1 Shore hardnesses of tested rocks.

Rocks	Shore hardness (Hs)
Andesite (Oga)	69.52
Granite (Sweden)	86.11
Granite (Inada)	90.98
Basalt (India)	97.15

4. 実験結果および考察

4.1 穿孔速度について

一打撃当りのビットの貫入量は、岩石の種類、繰粉の排除およびビット形状などによって左右されるが、

Fig. 3 Relationship between drilling speed (V_d) and inlet air pressure (P_i).

一方では空気圧さく岩機の構造寸法，入気圧力などが関係するピストン打撃エネルギーの大きさによっても影響される。すなわち，本供試空気圧さく岩機は，岩石の種類によって，どの程度の穿孔速度を有するかを求めて見た。

Fig. 3 は，前述の実験装置および実験条件で4種類の岩石を打撃穿孔した結果で，穿孔速度 (V_d) と空気圧さく岩機への圧縮空気の入気圧力 (P_i) との関係を図石をパラメータとして示したものである。ばらつきはあるが，何れの岩石においても，入気圧力の増加とともに穿孔速度はその勾配は異なるがほぼ直線的に増大する傾向にある。しかし，ショア硬度が最も大きいインド産の玄武岩と次に大きいスウェーデン産の花崗岩は同程度の穿孔速度を示しているが，前者よりは後者の方がむしろ穿孔速度が小さいところに実験値がきており，穿孔しにくいようである。その他の岩石の場合はショア硬度が小さい，すなわち反発係数の小さい岩石ほど穿孔速度が大きく，その勾配も急になってい

る。

4.2 空気圧さく岩機の動特性について

前項で述べたようなそれぞれの穿孔速度を示す4種類の岩石を用いて，岩石の種類が空気圧さく岩機の動特性にどのような影響をおよぼすかを実験的に調べた。ここでは空気圧さく岩機の動特性の中で最も重要な因子であると考えられるピストン打撃速度 (U_s) および打撃数 (N) を主にとりあげ考察した。

Fig. 4 はピストン打撃速度と入気圧力との関係で岩石の種類をパラメータ（パラメータに関しては以後の図も同様）にして示したものである。何れの岩石においてもピストン打撃速度は入気圧力の増加とともに増大するが，岩石の種類によっては大きく左右されず明確な相違は認められない。これは，ピストンの動特性，すなわちその速度が岩石の種類よりはむしろピストン前，後室側の受圧面積比と圧力差によって主に支配されることを示している。

空気圧さく岩機の打撃力を示すピストン打撃エネル

Fig. 4 Relationship between blow velocity of the piston (U_s) and inlet air pressure (P_i).

Fig. 5 Relationship between number of blow (N) and inlet air pressure (P_i).

ギ（ピストン打撃速度の2乗に比例する）は、図示はしていないが入気圧力に対してピストン打撃速度と同様の傾向である。しかし、Fig.3に見られるように、ショア硬度が小さい、すなわち反発係数の小さい岩石ほどピストン打撃エネルギーが吸収されるため穿孔しやすくなり、同一入気圧力、同一ピストン打撃速度に対して穿孔速度が増大する傾向を示し、従来の結果²⁾と一致する。

一方、打撃数と入気圧力との関係を示すFig.5を見ると、穿孔の難易に関係なく岩石のショア硬度および入気圧力が増大するほど打撃数は増大する。また、岩石の種類によって空気圧さく岩機の動特性の一つである打撃数は大きく影響されることがわかる。打撃数が岩石のショア硬度、すなわち反発係数の増加とともに増大するのは、Fig.6のピストン平均後退速度 (S_t/T_b : S_t はピストンストローク、 T_b はピストン後退所要時間) と入気圧力との関係に示すように、ばらつきはあるが、ショア硬度が大きい岩石ほどピストン平均後退

速度が増大するためと考えられる。すなわち、岩石のショア硬度が大きいほど反発係数が増大して、ピストンが岩石を打撃した直後に岩石から後退初速度が与えられるため、ピストン平均後退速度が大きくなり、打撃数を増大させる結果となるものと考えられる。

Fig.7は、後述の次項にも関係するが、空気消費量 (Q_w) と入気圧力との関係である。岩石の種類による明確な相違が認められないが、空気消費量は入気圧力の増加とともに直線的に増大する傾向にある。Fig.5に示したように、打撃数はショア硬度が大きいほど増大するので空気消費量も増加すると考えられるが、そのような傾向が見られないのは、ピストン平均後退速度がショア硬度の増大とともに、すなわち岩石の反発係数の増加によって大きくなるため、ピストン後退中にシリンダ前室内に流入する圧縮空気量が少なくなり、打撃数の増大によるその増加量と相殺されて、結局岩石の種類による空気消費量への影響が生ぜず、その差が認められなかったものと考えられる。

Fig. 6 Relationship between average velocity of backward stroke of the piston (S_t/T_b) and inlet air pressure (P_i).

Fig. 7 Relationship between air consumption (Q_w) and inlet air pressure (P_i).

4.3 正味熱効率について

機械工学的立場からすれば、より性能の優れた空気圧さく岩機を設計するためにはその正味熱効率を最大にすることであるが、性能評価の尺度として、正味熱効率と相関関係にある性能指数 (I_p) が空気圧さく岩機を設計する場合に十分適用できることを指摘した⁵⁾。次元解析より求めた性能指数は次式に示す無次元数である。

$$I_p = \frac{P_i \cdot U_s^2 \cdot W}{Q_w^2 (1 - e)} \quad (1)^{5)}$$

ただし、 W はピストン重量である。

また、正味熱効率 (η_t) と性能指数との関係式を(2)式に示す。

$$\eta_t = 12.25 \log I_p - 103.24 \quad (2)^{5)}$$

Fig. 8 は、(1)式に実験値を代入して算出した性能指数と入気圧力との関係を示したものである。ばらつきはあるが何れの岩石においても入気圧力の増加とともに性能指数はわずかに減少する傾向にある。しかし、

Fig. 8 Relationship between performance index (I_p) and inlet air pressure (P_i).

ショア硬度が大きい岩石ほど性能指数の値は増大しており、性能指数と相関関係にある正味熱効率は岩石の種類によって大きく影響されることが指摘できる。

Fig. 9 は、正味熱効率と性能指数との関係である。図中の実線は(2)式を示し、丸印は実験値である。性能指数が 4×10^9 より小さく、また 25×10^9 より大きいところに示す丸印は何れも反発係数が 0 の実験値⁵⁾であり、前者は TY 16 型空気圧さく岩機の場合を、後者は CA 7 型コールピックの場合をそれぞれ示している。(2)式はさく岩機の型式に無関係な式であり、図に見られるように実際に岩石を打撃穿孔した本報の場合の実験値はばらつきが大きいが、(2)式は実験値の傾向を良く表しているものと考えられる。

以上の結果より、岩石を打撃式空気圧さく岩機で穿孔する場合、(1)式および(2)式に含まれる岩石の反発係数は正味熱効率に影響を与える因子であることが実験的にも検証できたものと考えられる。

Fig. 9 Relationship between net thermal efficiency (η_t) and performance index (I_p).

5. 結 言

ショア硬度の異なる4種の岩石を打撃式空気圧さく岩機で穿孔実験を行い、さく岩機自体の動特性ならびに正味熱効率が岩石の種類によってどのような影響を受けるかを検討、考察した結果、主に次のことが明らかとなった。

(1) ピストン打撃速度および空気消費量はともに岩石の種類によってはほとんど左右されない。これに対し打撃数は大きく影響され、岩石のショア硬度、すなわち反発係数が増加するほど増大する傾向がある。この結果は主にピストン後退行程で硬い岩石ほどピストンを反発させる初速度が大きくなり、ピストン平均後退速度が増大するためであり、したがって空気圧さく岩機の動特性はショア硬度が高い岩石ほど向上する。

(2) 実験結果を用いて算出した性能指数は何れの岩石の場合も入気圧力の増加とともにわずかに減少する傾向にあり、また岩石のショア硬度すなわち反発係数が高いほどその指数は大きく、岩石の種類による明確な相違が認められた。さらに、さく岩機の型式に無関係に、性能指数と正味熱効率とは相関関係が存在することが実験的にも検証できた。したがって、次元解析より求めた(1)式および(2)式は、実際の岩石を打撃穿孔する場合にも十分適用できるものと考えられる。

References

- 1) Takahashi, Y. and Z. Watanabe: J. Mining and Metall. Inst. of Japan, **90**, 91 (1974).
- 2) Sasaki, K., N. Yamakado and Z. Shiobara: Saiko to Hoan, **3**, 21 (1957).
- 3) Takaoka, S., H. Hayamizu and A. Tasiro: Zenkoku Tanko Gizyutukai, **26** (1958).
- 4) Shimomura, Y.: J. Mining and Metall. Inst. of Japan, **75**, 66 (1959).
- 5) Takahashi, Y. and Z. Watanabe: J. Mining and Metall. Inst. of Japan, **94**, 25 (1978).
- 6) Moriguchi, S.: "Syoto Rikigaku", P. 161, Baihukan (1964).
- 7) Takahashi, Y., G. Obinata, K. Nagasaku and Z. Watanabe: J. Mining and Metall. Inst. of Japan, **99**, 555 (1983).