

(65) 岩盤掘削能率の予測パラメータについての検討

九州大学大学院	○ 島田 英樹
九州大学大学院	高倉 暁
九州大学工学部	正会員 松井 紀久男
九州大学工学部	市川 之善

Estimation of Cuttability by Using RIHN

Hideki SHIMADA and Akira TAKAKURA, Graduate School, Kyushu University
Kikuo MATSUI and Yukiyo ICHIKAWA, Kyushu University

Abstract

In recent years roadheaders have become predominant for tunnel drive in coal mining and civil engineering industry. The performance of roadheaders is affected by many factors.

This paper discusses the specific energy in terms of surface area obtained by the impact test in order to estimate the performance of rock cutting machines. The performance of roadheader drive can be predicted well by using the RIHN (Rock Impact Hardness Number) and the rock mass quality.

1. 緒言

わが国の鉱山において、作業の合理化、生産性の向上をはかるために、各種の岩盤掘進機が導入されている。岩盤掘削機の導入を決定づける要因として、掘削能率や掘削速度を挙げることができるが、岩盤掘削におけるこれらの要因を予測するためには、岩石が切削によってどのように破壊されるのか、すなわち岩石へのビットの圧入に伴う岩石の破壊メカニズムを解明し、岩石の切削に大きく影響を及ぼすパラメータについて知る必要がある。

従来より、岩盤掘削能率の予測パラメータのひとつとして、単位体積の岩石を取り除くために必要なエネルギーとして表される比エネルギーが用いられてきた。しかし、この比エネルギーはビット形状や載荷様式あるいは作用荷重の大きさなどによって大きく異なり、岩石の破碎挙動を的確に判断する定量的なパラメータとしては、充分なものではないことを筆者らは指摘した¹⁾²⁾。そこで新しいパラメータとして、安価な試験装置および比較的簡単な試験方法である衝撃破碎試験により得られるRIHN（岩石衝撃硬度数）を取り上げた。本報では、このRIHNの岩盤掘削能率の予測パラメータとしての適用性について検討を行った結果について報告する。

2. 試験方法および供試岩石

今回用いた衝撃破碎試験装置は、図1に示すように、岩石供試体を入れる円筒容器の直径が76mm、落下させる重錘は重量 2.4kgf、直径66mmであり、Protodyakonov 試験装置とほぼ同じである。試験手順は既報³⁾で述べたので、ここでは略記に留める。

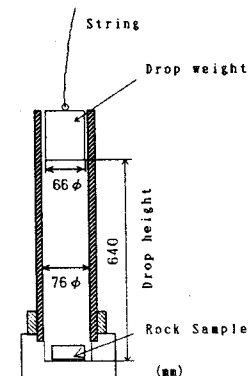


図1 衝撃破碎試験装置

- ① 乾燥した直径25mm、長さ50mmの円柱形岩石供試体の初期質量 W_0 を計量する。
- ② 岩石供試体を円筒形容器に横に寝かせて入れ、重錘を 640mmの高さから任意の回数落下させる。
- ③ 破碎された岩石を網目0.5mmのフルイで 90秒間手動でふるい、網下産物の質量 W_u を計量する。
- ④ 網下産物百分率を次式で求める。

$$\text{網下産物百分率 (\%)} = \frac{W_u}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

- ⑤ 新たな岩石供試体を用い、重錘の落下回数を変えて試験を行い、上式により網下産物百分率を求める。これを繰り返して試験を行う。
- ⑥ 横軸に重錘の落下回数、縦軸に網下産物百分率をとり、実験結果をプロットする。
- ⑦ 原点を通る直線で近似し、この近似直線を用いて網下産物百分率が25%になる落下回数を求め、岩石衝撃硬度数 (RIHN: Rock Impact Hardness Number) と称する破碎特性値を得る。

次に、RIHNと破碎エネルギーの関係について検討するために、次式のRittingerの理論⁴⁾を用いた。

$$E = \frac{1}{6} K_R (S_{wp} - S_{wf}) \quad (2)$$

ここでEは単位質量あたりに与えられるエネルギー(J/g)、 S_{wf} 、 S_{wp} はそれぞれ破碎前後の粒子の単位質量当たりの表面積 (cm^2/g)である。また、 K_R は比例定数(J/cm^2)であり、岩石供試体の比表面積の増加に必要な破碎エネルギーを意味している。

破碎後の比表面積 S_{wp} は、与えた打撃回数毎に行った粒度分布測定により得られる平均粒径をもとに算出した。また、(2)式の打撃エネルギーE(J/g)は次式で表される。

$$E = 2.4 \times 9.8 \times 0.64 \times N / W_0 \quad (3)$$

ただしNは打撃回数、 W_0 は供試体の質量(g)である。

実験に供した試料は、砂岩、花崗岩、安山岩、大理石及び石灰石である。表1、2には、供試岩石の力学的性質およびRIHNをそれぞれ示す。

3. RIHNと破碎エネルギーの関係

代表的な岩石に対する衝撃破碎試験の結果を図2に示す。この図に示すように、各岩石とも0.5mm以下の網下産物百分率と重錘の落下回数とはほとんど直線関係にある。したがって、与えた打撃エネルギーにより、岩石供試体が順調に0.5mm以下の産物に破碎されていると考えられる。また、図3に比表面積の増加量と打

表1 供試岩石の力学的性質

岩種	産地	S_c (kgf/cm^2)	S_t (kgf/cm^2)	E_{50} ($\times 10^4 \text{ kgf}/\text{cm}^2$)	H_s (-)	V_p (km/sec)
砂岩 A	相浦	593	31	6.2	39	2.69
	B	651	44	5.5	40	2.42
花崗岩	徳島	1481	83	14.4	80	3.41
安山岩	唐津	878	78	10.1	51	4.59
大理石	A	498	32	10.1	38	4.13
	B	540	39	10.9	32	3.83
	C	791	42	12.3	34	4.14
石灰石	A	1054	62	13.4	45	6.22
	B	1292	81	14.0	48	6.27
	C	1206	75	14.2	46	6.18
	D	1090	56	13.4	51	6.18
	E	803	65	11.7	46	5.64
	F	861	70	11.7	46	6.20

S_c : 一軸圧縮強度 S_t : 圧裂引張強度 E_{50} : 50%強度における
接線ヤング率 H_s : ショア硬度数 V_p : P波速度

砂岩A,B: 層理面に平行、垂直にコア抜き

大理石(産地A~C)および石灰石(産地A~F)は採取場所が異なる。

表2 供試岩石のRIHN

岩種	産地	RIHN	$K_R (\times 10^{-3} \text{ J}/\text{cm}^2)$
砂岩 A	相浦	10.5	7.7
	B	9.2	7.0
花崗岩	徳島	29.4	23.7
安山岩	唐津	27.7	19.3
大理石	A	12.0	10.7
	B	12.5	10.3
	C	15.5	13.1
石灰石	A	38.3	25.6
	B	47.8	40.4
	C	39.8	38.8
	D	42.4	37.2
	E	41.0	35.6
	F	39.3	33.9

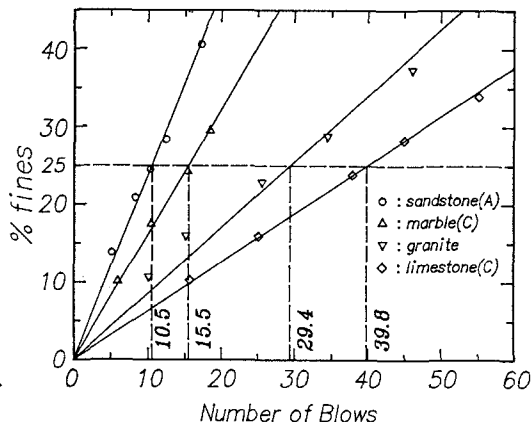


図2 衝撃破碎試験の結果

撃エネルギーの関係について示す。この図より、試験に供したすべての試料に対してほぼ直線的な関係があり、Rittinger の理論が成り立っていることが分かる。この理論における打撃エネルギーEは、岩石供試体の単位質量あたりに与えられた仕事量を表していることから、破碎に要する比エネルギーとして考えることができる。またEは、(3)式によれば重錘の打撃回数と比例関係にあり、この打撃回数からRIHNが規定される。したがって、RIHNは岩石の破碎に要する比エネルギーを表す数値として用いることができると考えられる。そこで、図4に K_R とRIHNの関係を示す。この図より、 K_R とRIHNの間にはかなり強い正の相関が認められるため、 K_R は岩石供試体の比表面積の増加に必要なエネルギー量を意味する破碎に必要な比エネルギーと考えることができよう。したがって、RIHNは岩石の比表面積の増加に必要なエネルギーを評価する指標値として十分利用できると思われる。また、ブーム式掘削機の挙動は、切削ビットを静的に圧入した時の挙動とは異なり、切削の対象となる岩盤にある程度の衝撃を与えて破碎を行っており、これは衝撃破碎試験における岩石の破碎挙動と極めてよく似ている。以上のことから、RIHNはこのタイプの掘削機の掘削速度や掘削能率を予測するという点から、岩石の破碎挙動を十分考慮した特性値となり得ると考える。

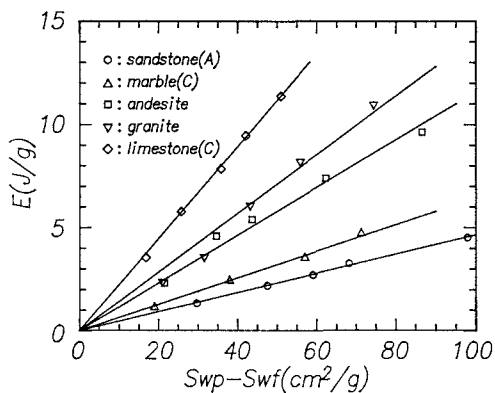


図3 比表面積の増加量と打撃エネルギーの関係

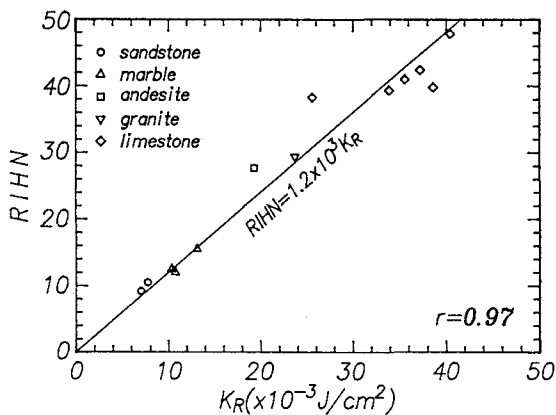


図4 K_R とRIHNの関係

4. RIHNと掘削機の施工性に影響を与える諸要因の関係

ここでは、施工性の指標として、掘削能率、ビット消費量および稼働率の3つを取り上げる⁵⁾。まず、図5にRIHNと掘削能率の関係を示す。前述したように、RIHNが増大するにしたがい岩石の破碎性は小さくなることから、RIHNの増大とともに掘削能率は低下すると考えられる。しかし、実際の岩盤掘削においては切羽岩盤の亀裂状態にかなり影響される。例えば、亀裂密度の大きな掘削現場では、RIHNが大きくても地山岩盤の破碎性は亀裂の影響により大きくなるため、地山岩盤がインタクトな場合より掘削能率は増大すると考え

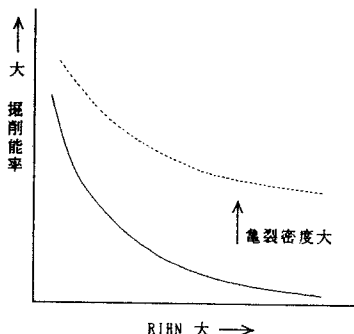


図5 RIHNと掘削能率の関係(模式図)

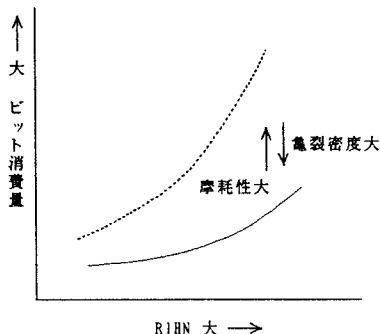


図6 RIHNとビット消費量の関係(模式図)

られる。したがって、図5に示すようにRIHNが増大するとバンド状に掘削能率が低下し、バンド下部はインタクトな岩盤を、バンド上部は亀裂密度の大きな岩盤を表すと考えられる。

次に、RIHNとビット消費量の関係を図6に示す。RIHNが増大するとともに岩石は破碎し難くなり、岩石は切削効率を高めるために切削ビットの押し付け力を増大させる必要がある。押し付け力が増大するとビットに作用する摩擦力が増大し、ビット消費量が増大する。したがって、RIHNが大きくなるにつれて、ビット消費量が大きくなるという傾向があると考えられる。また、ビット消費量は岩石の摩耗性に影響され、同一のRIHNをもつ岩盤でも掘削の対象となる岩石の摩耗性が大きければビット消費量は増大する。さらにビット消費量は地山岩盤の亀裂密度にも影響され、インタクトな岩盤は亀裂密度の大きな岩盤より、掘削の際ビットにより大きな押し付け力が必要となるためビット消費量が大きくなる。このことから、RIHNとビット消費量の関係は掘削能率の関係と同様バンド状になると考える。

稼働率は、地山岩盤の自立性すなわち支保の建付けや積込・運搬システムに大きく影響される。例えば、同一の破碎性をもつ地山の場合、RIHNが大きく亀裂密度の大きな岩盤は、RIHNが小さく亀裂密度の小さな岩盤より自立性が悪くなり、支保の建付けに費やされる時間が多くなる。また、破碎性の大きな岩盤の切羽に多量の湧水が発生した場合、坑道床面が泥浄化することがあるため、掘削機のめり込みが生じたり、掘削岩石の積込やポンプの排水が困難になり、掘削能率が低下することが考えられる。

以上の結果より、施工性の指標である掘削能率やビット消費量、稼働率は、岩石の破碎性に大きく影響されることは勿論であるが、そのほかにも掘削現場の状態、例えば亀裂密度や岩石の摩耗性、地山岩盤の自立性、湧水量等にも影響されることが分かる。

5. 掘削能率の予測

実際に岩盤掘削を計画する際、事前調査として探査ボーリングが必ず行われるため、このボーリングコアを利用してあらかじめ掘削能率の概値を推定できれば、非常に有用性が大きい。したがって、ボーリングコアから得ることができるデータからパラメータを選び予測式の導出を試みた。導出には三井三池鉱のS-200型ロードヘッダ掘進の現場実績データ⁶⁾において、岩盤条件が前もって求められているものについてのみ利用した。

まず1つめのパラメータとして、前述の理由からRIHNを取り上げる。このRIHNはブーム式掘削機の破碎メカニズムを十分考慮したパラメータである。次に、2つめのパラメータについて考える。地山岩盤の破碎性は前述したように、岩石のRIHNと岩盤中の割れ目の両者から決まるものである。そこで2つめのパラメータとして、岩盤中の亀裂の程度を評価でき、かつボーリングコアから得ることができるRQD(%)を用いる。これら2つのパラメータはともに掘削能率に影響を及ぼすことから次式の関係が成り立つと仮定する。

$$DR = f(RIHN, RQD) \quad (4)$$

ただし、DRは掘削能率(m^3/hr)である。ここでRIHNが増大するとともに掘削能率は小さくなる。またRQDも大きくなるほど掘削対象岩盤がインタクトになり、掘削能率は小さくなる。そこで、(4)式のRIHNとRQDの相互関係を検討するために、これら2つのパラメータについて回帰分析を行った。この結果、RIHNとRQD間の相関係数は0.24であり、これら2つのパラメータは独立していると言える。そこで(4)式を、

$$DR = \frac{C_1}{RIHN \cdot RQD} \quad (5)$$

と表すことにする。ただし、 C_1 は定数である。

図7に、 $(RIHN \cdot RQD)^{-1}$ と掘削能率の関係について示す。この図より、 $(RIHN \cdot RQD)^{-1}$ と掘削能率の間には対数関数的関係があるように思われるため、横軸に $(RIHN \cdot RQD)^{-1}$ の対数、縦軸に掘削能率をとるとかなり線形性の強い直線になった。そこで(5)式を次の形に変形する。

$$DR = -C_2 \cdot \log(RIHN \cdot RQD) + C_3 \quad (6)$$

この(6)式を用いて回帰分析を行った結果、定数 $C_2=10$ 、 $C_3=40$ となり、また、相関係数は0.92と極めて良い結果が得られた。したがって、S-200型ロードヘッダを用いる場合の掘削能率の予測式は次式となり、この式により予測できると考える。

$$DR = -10 \cdot \log(RIHN \cdot RQD) + 40 \quad (7)$$

なお、この式の定数 $C_3=40$ は、RIHNとRQDの積が限りなく0に漸近したときの掘削能率であり、S-200型ロードヘッダが有する最大掘削能率を意味する。

以上の結果より、S-200型のロードヘッダを用いてこれから岩盤掘削計画が行われる現

場では、岩盤掘削を開始前に探査ボーリング等で得られたボーリングコアからRIHNとRQDを測定し、(7)式に適用することにより掘削能率を予測することが可能である。この予測データは、岩盤掘削が開始されると現場実績データとして逐次掘削能率が得られるため、精度よく予測されているのか否か直ちに判断できる。その結果、現場実績データから得られた掘削能率が推定値と大きく異なることも十分予想される。そこで、この掘削能率予測式から得られた推定値と現場実績データから得られた結果が一致しない場合は、以下の検討を行う必要がある。まず、RIHNは含水状態の供試体については得ることができず、そのため切羽岩石の含水が著しい場合、RIHNから含水に伴う破碎性の影響を把握することができない。したがって、含水に伴い掘削能率がかなり向上する場合、この(7)式では評価できない。これを対処する手段としては、含水にともない岩石の破碎性が大きくなるという観点から、RIHNに含水の影響係数を施せばよいと考える。次に、支保の建付けや積込・運搬、機材の故障等の作業性の影響が考えられる。この予測式は、三井三池鉱の現場実績データに基づいていることから、支保の建付け等の作業要因はこの鉱山が基準となる。したがって、建付け支保を施す必要のない自立性の大きい岩盤の掘削では、予測される掘削能率よりかなりよい結果が得られる可能性がある。さらに、掘削切羽面の岩盤に力学的異方性が顕著に認められる場合、掘削能率は切削方向にかなり影響され、掘削能率推定曲線からのバラツキとなって現れることも十分考えられる。

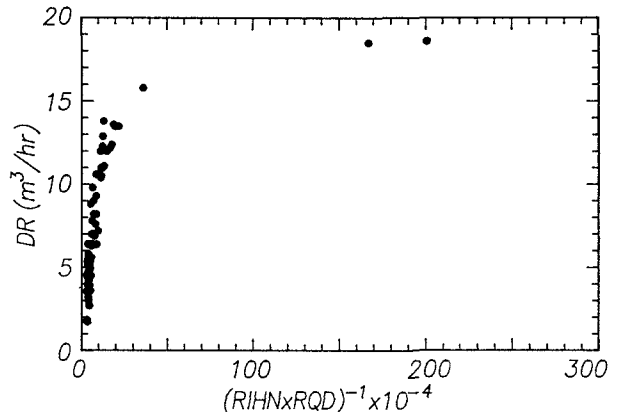


図7 $(RIHN \times RQD)^{-1}$ と掘削能率DRの関係

6. 結 言

衝撃破碎試験により得られるRIHNの岩盤掘削能率の予測パラメータとしての可否について検討を行った。この結果から、まずこのRIHNは、切削ビットの圧入に伴う岩石の破碎性を定量的に評価できる特性値となり得ることを明らかにした。次に、実際の機械掘削現場における掘削能率あるいは施工性に影響を与える種々の要因とRIHNの関係について論じた。最後に、これらの結果や現場の実績データを基に、RIHNとRQDを用いる掘削能率予測式を導出し、この式により掘削能率を予測することが可能であることを示した。

参 考 文 献

- 1) 島田英樹・松井紀久男：九州大学工学集報, 65[2], 137~142, (1992)
- 2) 島田英樹・松井紀久男・古賀英司：資源・素材学会誌, 109[1], (1993, 掲載予定)
- 3) 島田英樹・松井紀久男・一ノ瀬政友：資源・素材学会誌, 108[5], 402~406, (1992)
- 4) 例えば、川北公夫・種谷真一：概論粉体工学, 200~207, プラント工学社, (1967)
- 5) 三谷 哲：熊谷技報, 45, 1~7, (1989)
- 6) 柏村紀臣・佐々木一雄：資源・素材学会誌, 106[11], 636~638, (1990)