(86) 岩盤掘削に影響を及ぼす要因について

九州大学大学院　○島田英樹
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

Factors Effecting on Rock Drivage

Hideki SHIMADA, Graduate School, Kyushu University
Kikuo MATSUI and Yukiyoshi ICHIKAWA, Kyushu University

Abstract

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

This paper discusses the influence of strata parameters such as rock strength, geological conditions, water inflow, etc., and design parameters such as bit location, bit quality, etc., on the cuttability of roadheaders using field and laboratory testing data.

1．緒　言

わが国の坑内掘鉱山において、作業の合理化、生産性の向上を図るために、各種の坑道掘進機が導入されてきている。しかし、掘進機による岩盤掘削の基礎資料となる要因の把握が十分ではないため、掘進機導入の適切な判定基準を未だ得るに至っていないのが実状である。

本研究では、岩盤掘削に影響を及ぼす諸要因を明確にするために、現場の掘削実績と室内試験で得られる岩石の強度特性値や破砕特性値、摩耗度等を比較し、掘削に影響を及ぼしている要因について整理するとともに、破砕特性値である岩石衝撃硬度数RIHN[1]や摩耗性指数[2]が、掘進機の適用限界や掘削能率を予測する実用的なパラメータと成り得るか否かについて検討した。

2．現場の概要および室内試験

現場実績として用いたデータは、小断面用自由断面掘削機（ミゼットマイナー；日本鉱機製）により掘削されたAトンネルでの工事日報その他をもとに求めた単位時間当たりの掘削量（以下、掘削能率）である。この現場の調査ボーリングコアの一軸圧縮強度は 200～500kgf/cm^{2}程度で、ミゼットマイナーによる掘削が十分可能であると判断されていた。岩盤の岩質は、大部分が安山岩で一部に角礫凝灰岩も見られた。この現場の一部においては、極端に脆弱な岩盤や非常に堅牢な岩盤があったが、ミゼットマイナーによるほぼ順調な掘削が行われている。表1に現場の工事領域区分と岩質や切羽の状況等を示す。なお比較検討のために、三井三池鉱業所のロードヘッダ（S-200型；三井三池製作所製）掘進で得られた同鉱業所での現場実績データも用いた。

室内試験としては、現場実績から得られた掘削能率を検討するために、岩石の破砕特性を表すインデックスとして衝撃破砕試験により得られるRIHNを、同様に岩石の摩耗性を表すインデックスとして Cerchar摩耗試験により得られる摩耗性指数を求めた。これらの試験には、この現場のボーリングコアを用いて供試体を

表１　現場の工事領域区分およびその切羽状況と強度特性値

領域区分	岩　質	一軸圧縮強度 (kgf/cm²)	ｼｭﾐｯﾄ・ﾊﾝﾏｰ試験値(kgf/cm²)	切　羽　状　況
A	凝灰角礫岩	44.4	84.7	粘土を挟在した脆い岩質で、水にぬれるとヘドロ化する。黒色の礫が全体的に分布している。
B	凝灰角礫岩	188.9	234.5	全体的に硬質となり、地山として安定している。所々に粘土をかんだ割れ目がある。
C	安山岩	83.0	187.8	割れ目が増加し、脆く崩れやすい状況である。切羽の肌落ちが多い。硬質な岩と軟質な盤が複雑に入り組んでいる。
D	安山岩	112.8	181.6	非常に硬質な岩盤である。節理が発達しており、粘土の挟在もある。節理以外で割ることが困難である。
E	安山岩	414.3	349.8	非常に硬質となり、細片もしくは粉状にしか掘削できない。所々軟質な部分や小さな割れ目が多数あるが密着の度合いが強い。
F	安山岩	69.9	264.0	しだいに硬度が増加する。潜在的な亀裂があると思われるが、目視できる割れ目はほとんどない。
G	安山岩	966.8	809.5	堅牢な岩盤である。割れ目は数カ所ある場合とない場合に分かれる。割れ目があっても密着の度合いが強く全体的に非常に堅い。
H	安山岩	758.2	565.3	割れ目が増加し、しだいに脆い部分が見え始める。粘土を挟在した部分も見受けられる。しかし堅い岩盤にかわりない。
I	安山岩	563.3	473.7	細かい割れ目が切羽全体に分布するようになる。粘土をごく薄く付着させたり、全く付着していないものもある。

作製した。なお、試験の方法については既報[1)2)]に譲る。表２には、この供試体を用いて得られた強度特性値、RIHNおよび摩耗性指数の平均値を示す。

３．掘削に影響を及ぼす要因の検討

３．１　一軸圧縮強度

一般に掘削機の導入に際しては、まず最初に掘削対象岩盤の強度が議論される。そこで、室内試験で得られた一軸圧縮強度Ｓc と掘削能率の関係を見たのが図１である。この図からＳc の増大とともに掘削能率が減少する傾向が見られるが、かなりのばらつきがあり、相関性は良くない。この理由として、室内試験用に作製した供試体は岩石試料のインタクトな部分からであり、実際の現場における岩盤の強度を正確に表していないことが考えられる。図２には、現場でのシュミットハンマー試験により推定された一軸圧縮強度Ｓc*（以下、

表２　強度特性値、RIHNおよび摩耗性指数

	Sc	St	E_{50}	RIHN	Abr.Index
乾燥	1389	176	11.6	34.5	1.52
含水	764	88	10.7	—	1.40

Sc：一軸圧縮強度（kgf/cm²）
St：圧裂引張強度（kgf/cm²）
E_{50}：接線ヤング率（kgf/cm²）
RIHN：岩石衝撃硬度数（回）
Abr.Index：摩耗性指数（1/10mm）

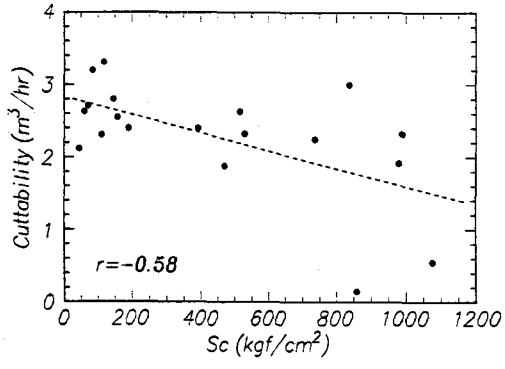

図１　室内試験により得られたＳcと掘削能率の関係

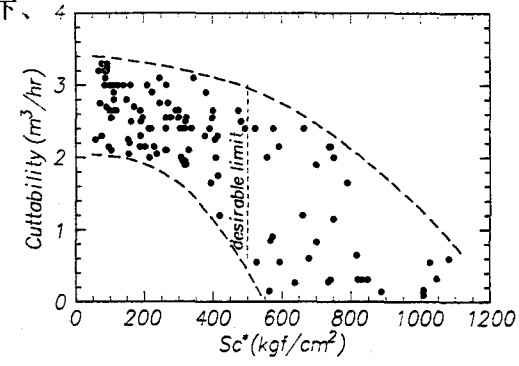

図２　シュミットハンマー試験により推定されたＳc*と掘削能率の関係

室内試験のSc と区別上Sc*とする）と掘削効率の関係を示す。この図からも、Sc*の増大とともにある幅を持って（以下、バンド状と呼ぶ）掘削能率が減少していることが分かる。この図中のバンドの上部は岩盤亀裂が顕著な地山の掘削に対応し、バンドの下部はインタクトな岩盤地山の掘削に対応すると考えられる。図3は、三井三池鉱業所のロードヘッダ掘進におけるSc*と掘削能率の関係である。この図も図2と同様に、Sc*の増大とともにバンド状に掘削能率が減少していることを示している。図2および図3の結果より、掘削能率に大きく影響を及ぼす他の要因として、岩盤の亀裂状態を挙げることができよう。したがって、掘削能率は一軸圧縮強度に大きく左右されるのは確かであるが、さらに精度良く掘削能率を予測するためには、岩盤の強度を左右する要因についても考慮する必要がある。

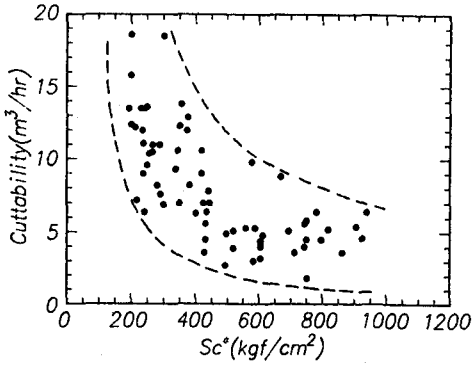

図3　Sc*と掘削能率の関係（ロードヘッダ掘進）

3.2　湧水量

図4に掘削工程中の掘削能率と切羽湧水量の関係を示す。この図より領域Ⅰでは、多量の湧水が発生しているが掘削能率の著しい低下は見られず、掘削作業が阻害されるほどの湧水ではなかったことが分かる。また領域Eでは、湧水量が局所的に増加すると、それに呼応して掘削能率の若干の低下が見られる。岩盤が軟弱な場合や地質的擾乱を受けている切羽に多量の湧水が発生した場合、切削された岩片や下盤のスレーキング現象および掘削機の踏みつけによる細層化・軟弱化が発生し、坑道床面が泥濘化することがあるため、掘削機のめり込みが生じたり、掘削岩石の積み込みやポンプの排水が困難になると考えられる。したがって、掘削能率の低下のひとつの原因として掘削切羽内への湧水が挙げられ、掘削能率を維持するためには湧水対策に十分留意する必要がある。

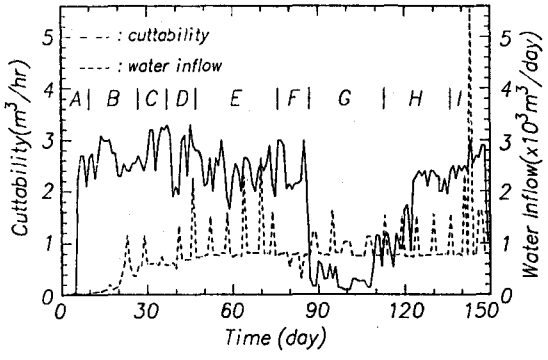

図4　掘削能率と湧水量

3.3　岩盤の地質的要因

図2、3によれば、ロードヘッダS-200掘削においては、岩盤の一軸圧縮強度Sc*の減少とともに掘削能率が順調に増大していることが分かる。一方ミゼットマイナー掘削においては、Sc*が小さくなっても掘削能率があまり上昇せず、ほぼ一定であることが分かる。これは掘削断面が 5m²程度ときわめて小さく、掘削岩石の搬出システムや建付け支保システムが機械掘削システムとうまく適合していないことによるほか、地質的な要因に起因していると思われる。表1によると、領域B～Dは、Sc が80～200kgf/cm²と比較的小さいが、節理の発達、肌落ち、粘土の挟在等の地質的擾乱をかなり受けていた。したがって、この領域は、このような地質的な問題により掘削能率が上昇しなかったと考えられる。全断面掘削機TBMにおいては、地質的問題により掘削能率が著しく低下する。自由断面掘削機による掘削では、一般にTBMに比して掘削能率の低下は顕著ではないが、地質擾乱帯を突破するためには種々の対策を講じる必要があるため、掘削能率に影響を及ぼす可能性が高い。したがって、掘削能率を維持するためには、掘削対象岩盤における地質的構造や問題点を早期に正確に把握する必要がある。

3.4　使用ビット

表3に使用されたビットの仕様を、図5に掘削工程中の掘削能率と掘削中に交換したビットの本数（以下、ビット交換量と呼ぶ）の関係を示す。この図より、領域Gでビット交換量が極めて大きいことが分かる。この領域では、一軸圧縮強度Sc、Sc*がかなり大きく、また堅牢な岩盤で割れ目があっても密着の度合いが強いため、掘削ビットの欠損、摩耗量が著しく、効果的な掘削ができなかったと思われる。また、この領域Gの103日目から112日目までの掘削では、ビットをAタイプからBタイプに取り替えている。これにより、ビット交換量が半減して掘削能率の若干の上昇がみられ、使用するビットの形状や材質によって掘削能率にかなり影響を及ぼすことが分かる。図6に、三井三池鉱業所のロードヘッダ掘進実績データをもとに求めた、各ビットのカッターヘッドの中心からの取付け距離とその位置のビット消費量の関係を、岩盤の強度をパラメータとして示す。ただし、ビット消費量は、全ビット交換量を掘削量で除したものである。なお、図中のSc は現場から採取した試料の平均値である。この図からも、ビットの取り付け位置に拘らず、強度の増大とともにその消費量が大きくなることが分かる。取り付け位置による差異を見ると、カッターヘッドの中心から20～40cmの位置のビット消費量が大きく、中心付近や外縁部は比較的少ない。このことから、カッターヘッドによる破砕が中心から20～40cmのところで主に行われていることが推察される。しかし、ビットの取付けはカッターヘッドにほぼ平均的に行われている。したがって、ビットの総数は同じとしても、破砕が頻繁に行われる箇所のビット数を密にすることにより、さらに効果的かつ経済的な掘削が行えると考えられる。この他、掘削能率の向上が期待できる要因として、カッターヘッドの回転やビットの取付け角を適正化することが挙げられる。

表3　ビットの仕様

タイプ	対象岩	圧縮強度	チップ径	形状
A	硬岩～超硬岩	400～700 kgf/cm²	φ22mm	円錐形
B	超硬岩	600 kgf/cm²～	φ25mm	円錐形

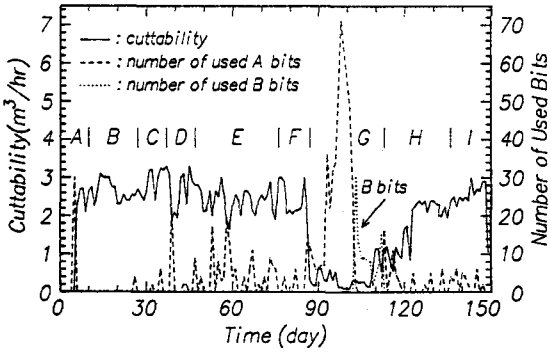

図5　掘削能率とビット交換量

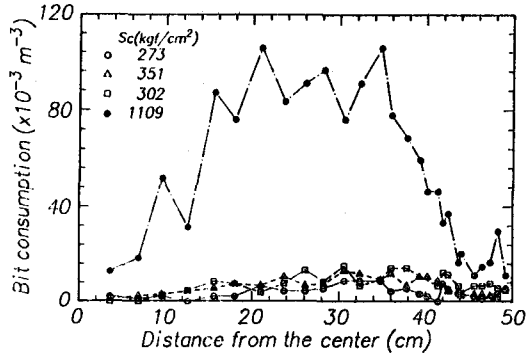

図6　各ビットのカッターヘッド中心からの距離と各ビット消費量の関係

4．掘削能率の予測のための要因に関する検討

4.1　摩耗性指数

英国のNCB（現在のBritish Coal）のMRDEでは、岩石の掘削性を推定する指標として次式を採用している[3]。

使用限界指数＝（硬度×摩耗性指数）　　(1)

この硬度は、一定速度で回転しているドリルを一定荷重下で岩石試料に押しつけたときの初期穿孔速度(sec/cm)で表される。Valantin[4]によると、この初期穿孔速度と一軸圧縮強度Scは、Scが1,000kgf/cm²以下では、次の経験式で関連づけられる。

$Sc=4.5\times$（硬度）　　(2)

また彼は、掘削機によってなされる岩石切削は、掘削ビットと掘削対象岩石の間の摩擦力によるものであり、この摩擦力は、掘削ビットに作用する反力に摩耗係数を掛けたもので、(1)式の硬度と摩耗性指数を掛けたものと等価であると述べている。さらにHughes[5]は、軽量級のロードヘッダにおける使用限界指数は18であり、この使用限界指数以下ではロードヘッダを連続的に運転できるが、この値より大きくなると作業が困難となり、掘削コストも急増すると報告している。

表2に示したように、Aトンネル工事現場の試料の摩耗性指数は乾燥状態で1.52であった。ここで、上述した使用限界指数18を用いると、(1)式より硬度＝11.8となる。また(2)式を用いて使用限界となるSc を求めると Sc＝約500kgf/cm^{2}が得られる。そこで図2を見ると、Sc*が500kgf/cm^{2}前後で掘削能率が大きく低下し始めており、(2)式で得られたSc値とほぼ一致する。したがって、摩耗性指数は掘削能率を予測するひとつのパラメータとして十分利用できると思われる。

4.2　岩石衝撃硬度数RIHN

衝撃破砕試験による岩石の破砕挙動は、衝撃を加えるという意味から打撃式穿孔機のビット動作と類似しており、衝撃破砕試験により得られるRIHNにより、ビットの圧入挙動の評価や岩石の破砕効率の推定が可能である[1)]。ロードヘッダなどの自由断面掘削機の掘削挙動は、掘削ビットの静的圧入挙動とは異なり、対象となる岩盤にかなりの打撃を加えて掘削破砕が行われる。この意味から、このタイプの機種の掘削破砕挙動は、衝撃破砕試験の破砕様式とほぼ同様な形態をとると思われる。そこで、Aトンネルと三井三池鉱業所の数箇所におけるRIHNと掘削能率の関係を見たのが図7である。この図より、RIHNが増大すると掘削能率が低下するという負の相関が見られる。すなわち、破砕しやすい岩盤ほど掘削能率が良いということが分かる。このことから、岩石の破砕特性を表すインデックスであるRIHNも、掘削能率を予測する際の検討項目として考慮すべき要因のひとつと考える。

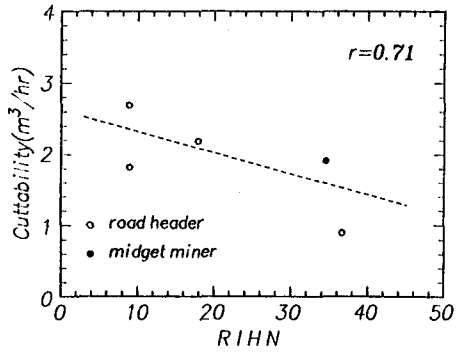

図7　RIHNと掘削能率の関係

5. 結　論

岩盤掘削において坑道掘進機を用いた場合の、その適用性や能率に影響を及ぼす要因を把握するために、実績データをもとに整理し、掘削能率が一軸圧縮強度や湧水量、切羽の状況、使用するビットの形状や材質などに影響されることを示した。また、岩石衝撃硬度数RIHNや摩耗性指数が、現場における掘進機の使用限界や掘削速度を予測する場合のパラメータとして利用できることを示した。今後、さらに系統的な実績データの蓄積を図り、検討してゆく予定である。

現場実績を検討するにあたり、多大のご協力を得た関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

1) 松井・島田・一ノ瀬・市川：第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集,pp.297-301,(1991)
2) 島田・松井・市川：第12回西日本岩盤工学シンポジウム論文集,pp.44-49,(1991)
3) Howarth,D.F.:Trans.Instn.Min.Metall.(Sect.A:Min.Industry),95,October,pp.A191-A202,(1986)
4) Valantin,A.:C.R.Journ.Tech.du Sous-sol,October,pp.9-10,Cerchar,Verneuilen-Halatte,(1975)
5) Hughes,H.M.:Min.Sci.Technol.,3,Janually,No.2,pp.95-109,(1986)