

自由断面掘削機による岩盤掘削のための 岩盤評価法に関する一考察

A study of rock mass evaluation method for the rock excavation using roadheaders

鈴木昌次*・萩森健治**・大山 宏***・中川浩二****

Shoji SUZUKI, Kenji HAGIMORI, Hiroshi OYAMA, Koji NAKAGAWA

Performance prediction of roadheaders is a critical issue in their application in any tunneling project. This paper summarizes empirical roadheader performance prediction models and will discuss applicability of the model for prediction of cutting rate of axial roadheaders developed by Bilgin et al. Guidelines to select suitable cutter head power of roadheaders, and to shift the excavation method from roadheaders to blasting or rock splitting method are proposed.

Key Words: rock excavation, axial roadheaders, prediction of cutting rate, guidelines, blasting, rock splitting method

1. はじめに

近年では、市街地およびその周辺や重要構造物に近接したトンネル建設が増加しており、これら都市部に建設されるトンネルでは山岳トンネル工法が採用される場合も少なくない。一方、岩盤掘削では発破工法が最も経済的かつ能率的である反面、地盤振動や騒音による環境影響や既設構造物への影響が問題となる。この結果、自由断面掘削機やブレイカーを主体とした機械掘削や、割岩工法によらざるを得ない場合が少なくない。

このような背景から、自由断面掘削機は次々と大型機種が開発され、中硬岩から 100MPa を越える硬岩にまで適用範囲を広げつつある。同様に、割岩工法も各種の専用機械の開発や工法の工夫によって飛躍的に発展してきた。しかしながら、これら機械掘削の採用が増加する一方で、工期や工費を見積もるための基本数量である掘削能率やビット消費量等を予測する技術の開発はほとんどなされていないと思われる。

そこで、本文では自由断面掘削機での掘削能率を客観的に予測するために Bilgin らの提案式の適用性を検証した。また、提案式を用いて、発破工法、自由断面掘削機による機械掘削、割岩工法の適用領域を示した。

2. 自由断面掘削機の掘削能率予測に関する既往の研究

自由断面掘削機の掘削能率予測に関する既往の研究は Breeds²⁾により表 2. 1 のように整理されている。表より、機械掘削に対する岩盤評価において広く採用されている指標は岩盤物性値と機械性能に大別できる。岩盤物性値では一軸圧縮強度と RQD が最も多く、機械性能では掘削機動力が採用されている。

これに対して、国内での同様の研究には三谷³⁾や宮地³⁾らの研究がある。三谷は、125kW 級以下の自由断面掘

* 正会員 工博 (株)大本組 土木本部 技術部

** 正会員 工博 (株)奥村組 技術本部 土木部

*** オオヤマ&Co.

**** 正会員 工博 山口大学 工学部 臨床トンネル工学研究所

表－2. 1 自由断面掘削機の掘削能率予測に関する既往の研究（一部加筆）

Author (Year)	Geological Parameters		Machine Parameters	Explanations
	Intact Rock	Rock Mass		
Fowell&Smith(1976)	UCS,CC	—	—	Developed for light and medium weight axial road headers and massive coal measure strata
Bilgin(1983)	—	SE	Not considered	Developed for light and axial road headers and coal measure strata. SE calculation is difficult.
Aleman(1983)	UCS,CAI	RQD,MF	Tr,AF,rpm	It uses machine specific constants linked to geotechnical properties. Derivations of constants are not defined.
SandBak(1985)	UCS	RMR	—	Developed for only 1 type axial, light road headers. It usually underestimates for RMR<40.
Farmer&Garrit y(1987)	UCS,E	—	Hp,K	Developed for only 2 heavy weight axial road headers and massive coal measure strata. Data is very scatter.
Bilgin,et.al(1988)	UCS	RQD	—	Developed for a light, axial and shielded road header and different rock types.
Gehring(1989)	UCS	—	—	Developed for heavy weight axial and transverse road headers and massive coal measure strata.
Mitani(1989)	UCS	—	—	Developed for light and medium weight axial road headers , and different types of rock masses in Japan.
Matsui&Shimada(1993)	RIHN	RQD	—	Developed for only 1 type medium weight axial road header and coal measure strata.
Neil,et.al(1994)	UCS,BTS,SE,Fn,Fc	RQD	Hp,D,S,rpm, the others	Developed for axial and transverse road headers in different weight classes, and different types of rock masses
Bilgin,et.al(1996)	UCS	RQD	Hp	Developed for axial and transverse road headers in different weight classes

UCS:Uniaxial Compressive Strength, SE:Optimum Specific Energy, CC:Cementation Coefficient, CAI:Cerchar Abrasivity Index, RQD:Rock Quality Designation, RMR:Rock Mass Rating, RIHN:Rock IMPact Hardness Number, BTS:Brazilian Tensile Strength, Fn:Normal Force, Fc:Cutting Force, Hp:Cutterhead Power, rpm:Revolution Per Minute

削機を対象として施工実績を調査し、掘削能率の予測式として式（2. 1）を提案した。また、式（2. 1）では割目に関する要素が含まれないが、一軸圧縮強度 3～5MPa 以下の軟岩Ⅰでは岩石強度や割目間隔は自由断面掘削機の掘削能率に影響を与えず、5～30MPa の軟岩Ⅱで岩石強度と割目間隔が影響し、30MPa 以上の中硬・硬岩で顕著になると述べている。

$$\log Y = -0.515 \log \sigma_c + 2.12 \quad (2.1)$$

ここに、Y：掘削能率(m³/hr)、 σ_c ：一軸圧縮強度(kgf/cm²)

また、宮地らは、一軸圧縮強度 15～80MPa の安山岩地山での 200kW 級自由断面掘削機によるトンネル掘削を対象として、コーン形ブランジャーを装着したロックシュミットハンマーの反発度と掘削能率の関係を調べた。この結果、掘削能率予測式として式（2. 2）を提案するとともに、切羽観察記録と反発度を用いた重回帰分析の結果から、自由断面掘削機の掘削能率は反発度と割目の頻度によって説明でき、その他の評価要素は関係しないと結論付けている。

$$Y = 10.9 - 0.21S - 11.5W \quad (2.2)$$

ここに、Y：掘削能率(m³/hr)、S：コーンブランジャー装着シュミットハンマー反発度、W：割目の頻度

このように、既往の研究成果から、自由断面掘削機の掘削能率の予測においては、岩石の一軸圧縮強度と岩盤の割目間隔が重要であり、その他の岩盤物性に係わる要素の影響はほぼ無視しえる。また、機械性能に関しては掘削機動力の考慮が必要と考えられる。

3. 自由断面掘削機に対する岩盤評価法の提案

ここでは、表－2. 1 より、多くの施工実績に基づき、パラメータも比較的容易に得られる一軸圧縮強度と RQD および掘削機動力のみを採用し、比較の実用性の高いと考えられる Bilgin 他⁴⁾の縦軸型自由断面掘削機 (Axial roadheaders) に対する提案式（3. 1）を採用した。なお、Bilgin 他は横軸型 (Transverse roadheaders) に

対する予測式も提案しているが、国内で主として使用されてきた掘削機が縦軸型であるため、ここでは縦軸型のみを対象とする。

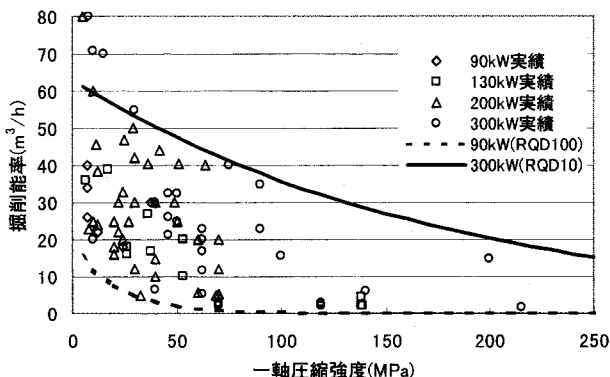
$$ICR = 0.28 \times HP \times (0.974)^{RMCI} \quad (3.1) \quad RMCI = \sigma_c \times \left(\frac{RQD}{100} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (3.2)$$

ここに、ICR：掘削能率(m³/hr)、HP：掘削機動力(=kW×0.75)、 σ_c ：一軸圧縮強度(MPa)、

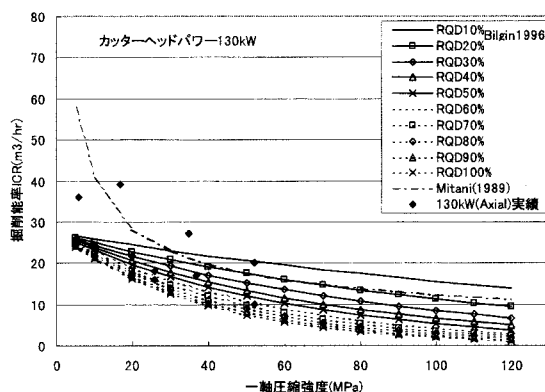
RQD：Rock Quality Designation(%)

図－3．1は国内での施工実績（サンプル数93、90kW 級～300kW 級）をプロットしたものである。図中の曲線は、式（3．1）において最大掘削能率を与える300kW 級でのRQD10%に対する予測値と最小掘削能率を与える90kW 級でのRQD100%に対する予測曲線である。図より、予測曲線は国内の実績を包絡しており、国内実績に対する適用性が認められる。なお、図中の60m³/hを越える実績は10MPa前後の岩盤に対して200kW 級以上の掘削機を適用したものであり、特殊な事例として考えるべきである。

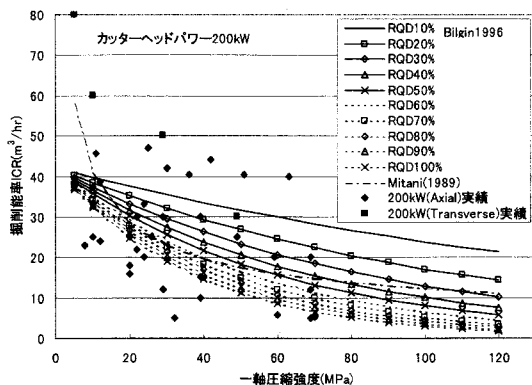
図－3．2～図－3．4は掘削機動力を130kW、200kW、300kW とした場合の掘削能率予測曲線と国内実績を示したものである。掘削能率の予測は Bilgin の提案式に対して RQD を 10～100% としたものと、三谷の提案式について示した。なお、宮地らの提案式については特殊なシュミットハンマーを用いるため、ここでの予測はできない。また、三谷においては 125kW 級以下での掘削実績を対象としており、この点では 200kW 級以上の掘削機は適用範囲外である。図より、実績での RQD は不明であり、200kW 級での実績にばらつきが大きいものの、Bilgin 式はほぼ妥当な予測範囲を与えている。



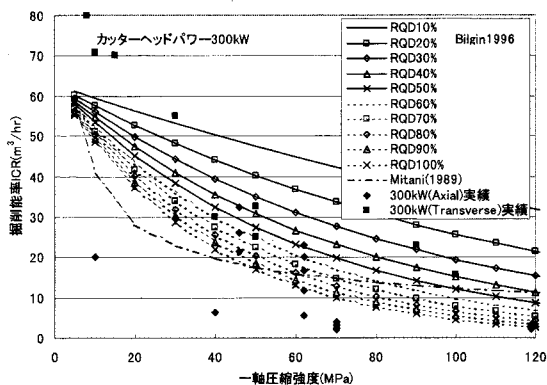
図－3．1 国内施工実績



図－3．2 130kW 級自由断面掘削機の掘削能率



図－3．3 200kW 級自由断面掘削機の掘削能率



図－3．4 300kW 級自由断面掘削機の掘削能率

4. 岩石切削に関する理論式と Bilgin による経験式との関係に関する考察

岩盤の切削メカニズムを圧縮破砕に基づいて構成する場合の岩石の切削抵抗 F_c は式 (4.1) で与えられる。これに対して、引張破砕に基づいた場合の切削抵抗 F'_c は Evans⁵⁾ により式 (4.2) で与えられている。

$$F_c = \sigma_c \times d \times w \times n \quad (4.1) \quad F'_c = \frac{2\sigma_t d w \sin \frac{1}{2}(90 - \alpha)}{1 - \sin \frac{1}{2}(90 - \alpha)} \cdot n \quad (4.2) \quad \frac{F_c}{F'_c} \cong \frac{\sigma_c}{4.8\sigma_t} \quad (4.3)$$

ここに、 F_c 、 F'_c ：切削抵抗(N)、 σ_c ：岩石の一軸圧縮強度 (MPa)、 σ_t ：岩石の引張強度(MPa)、 w ：刃物の巾(mm)、 d ：刃物の切削深さ(mm)、 n ：カッターヘッド投影面積当りの刃物の数、 α ：すくい角

ここで、Roxborough⁶⁾は α が 18° を超えると引張破壊を生じると指摘しているが、一般にはすくい角は0に近い値をとる。そこで、式 (4.2) において $\alpha=0$ とすると、式 (4.1) との関係は式 (4.3) で与えられる。Evans は式 (4.2) において、ピックの貫入は岩石の圧縮強度に比例し、ぜい性度 (σ_d/σ_t) が高いほど切削抵抗が大きくなると述べている。岩石のぜい性度は一般に10~20程度とされているが、ぜい性度が高いほど式 (4.1) と式 (4.2) の差が大きくなり、特にぜい性度が高くなる硬岩地山では両者には一般に2倍以上の差が生じることになる。

理論式では岩盤の切削抵抗が算出されるが、掘削能率(掘削量)を直接に算定することはできない。これに対して、Bilgin 式では直接に掘削能率を予測する。したがって、理論式と Bilgin 式を比較する場合には、何らかの工夫が必要になる。いま、自由断面掘削機の切削力は式 (4.4) で与えられる。

$$F = \left(\frac{2}{D} \right) \left(\frac{0.974P}{N} \right) \quad (4.4)$$

ここに、 P ：カッターの切削動力(kw)、 N ：カッターヘッドの回転数(rpm)、 D ：カッターヘッド平均径(m)

岩石の切削は自由断面掘削機の切削力 F が岩石の切削抵抗 F_c を上回るときに可能となる。いま、 F/F_c が掘削量の比と1対1に対応すると仮定し、これを理論掘削能率比として定義する。また、 $F/F_c=1$ となるときの一軸圧縮強度を基準強度 σ_c とする。

図-4.1と図-4.2の破線は圧縮破砕に基づく式 (4.1) と引張破砕に基づく式 (4.2) を用いて切削動力200kWと300kWの掘削機に対する理論掘削能率比を算出したものである。さらに、実線は、それぞれの基準強度を Bilgin の提案式 (3.1) に適用して $ICR(\sigma_d)/ICR(\sigma_c)$ を算出し、経験的掘削能率比としてプロットしたものである。ただし、岩石の引張強度は圧縮強度の1/10としている。また、Bilgin の提案式においては、式

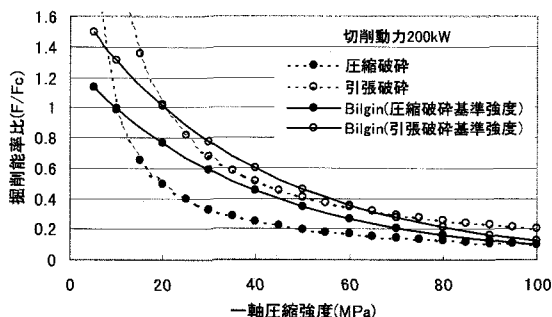


図-4.1 掘削能率比の比較 (200kW 級掘削機)

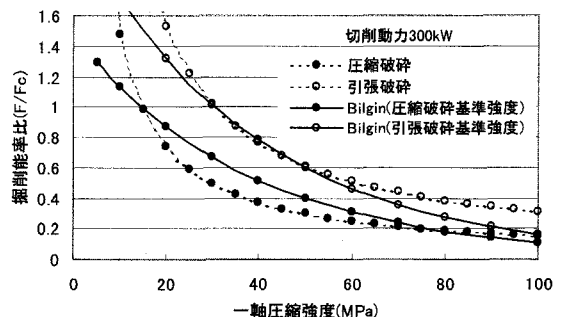


図-4.2 掘削能率比の比較 (300kW 級掘削機)

(4.1)と式(4.2)における F_c がインタクトな岩石強度に関する切削抵抗力であるため、 $RQD=100\%$ とした。その他の掘削機緒元は、カッターヘッド回転数 46rpm、カッターヘッド平均径 0.98m、ピック幅 22mm、ピックの切削深さ 50mm、投影面積当りピック数 8、すくい角 0° である。

図より、200kW 級掘削機を対象とした場合の基準強度は、圧縮破砕に基づいた場合に約 10MPa、引張破砕に基づいた場合に約 20MPa となり、式(4.3)で示されるように、両者には約 2 倍の強度差があることになる。また、Bilgin 式は引張破砕式に近似しており、圧縮強度による掘削量の推定は実際より過小評価となる可能性が指摘される。さらに、理論モデルと経験モデルが近似することは、Bilgin 式の妥当性を示唆するものと思われる。

5. 自由断面掘削機の掘削能率予測と施工計画への応用

自由断面掘削機によって掘削する場合には、想定される岩盤強度に応じた掘削機を選定するばかりでなく、効率的な掘削が行えない場合の代替掘削方式を計画することが必要になる。ただし、実際には掘削能率とともにピック消費量の予測も必要と考えられるが、ここでは掘削能率のみに着目した。また、掘削方式は自由断面掘削機による掘削と割岩掘削および発破掘削を対象とした。自由断面掘削機から割岩掘削への移行は $10\text{m}^3/\text{h}$ の掘削が困難になるレベルを境界とし、自由断面掘削機から発破掘削への移行は $20\text{m}^3/\text{hr}$ の掘削が困難になるレベルを境界とした。図-5.1に 200kW 級、図-5.2に 300kW 級での適用区分を示す。

例えば、図-5.1と図-5.2より、一軸圧縮強度 60MPa で $RQD50\%$ の岩盤を目標掘削能率 $20\text{m}^3/\text{hr}$ で掘削することは 200kW 級では困難であるが、300kW 級掘削機であれば可能と予測される。また、このときの掘削能率は $23\text{m}^3/\text{hr}$ と予測される。

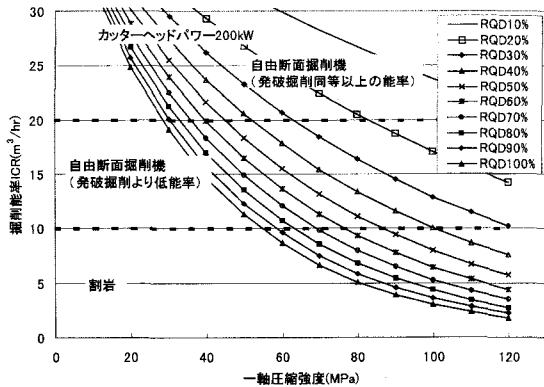


図-5.1 掘削工法選定図 (200kW)

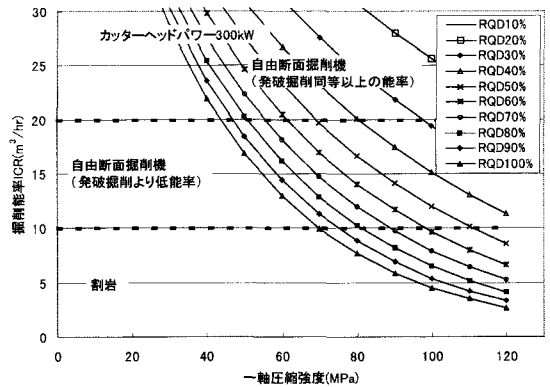


図-5.2 掘削工法選定図 (300kW)

表-5.1 割岩工法、発破工法への変更判定表

一軸圧縮強度(MPa)	掘削限界 RQD(%)					
	10 m³/h 限界 (割岩境界)			20 m³/h 限界 (発破境界)		
	130 kW	200 kW	300 kW	130 kW	200 kW	300 kW
10	100	100	100	100	100	100
20				50		
30				20		
40				10		
50	70	90	80	40	80	60
60	50			30	60	
70	40			20	50	
80	30			10	40	
90	20	40	70	掘削不能	10	30
100						
110						
120						
	10	30	40			20

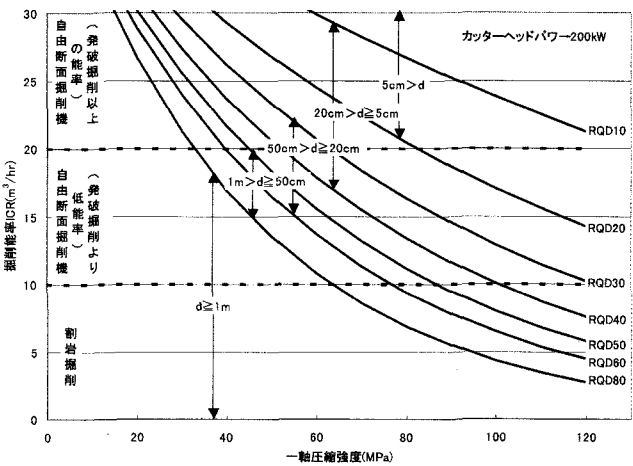
また、同図を一軸圧縮強度と RQD の関係で整理すると表－ 5. 1 が得られ、対象岩盤の一軸圧縮強度と RQD が想定されれば、効率的に掘削できる掘削方式と自由断面掘削機の場合の機種選定が可能になる。なお、国内でのトンネル施工においては、切羽の割目状況を RQD で評価することは少なく、切羽観察記録における割目の間隔で評価するのが一般的である。JH の定める切羽観察様式 7 では割目間隔と RQD の関係を表－ 5. 2 のように与えている。同表を参考にすれば表－ 5. 1 を割目間隔で読み替えることも可能と考えられ、例えば 200kw 級の自由断面掘削機に対しては、図－ 5. 3 が得られる。

表－ 5. 2 JH 切羽観察様式における割目間隔と RQD の関係（文献 7 から一部抜粋）

C. 割目 間隔	割目間隔	$d \geq 1\text{ m}$	$1\text{ m} > d \geq 50\text{ cm}$	$50\text{ cm} > d \geq 20\text{ cm}$	$20\text{ cm} > d \geq 5\text{ cm}$	$5\text{ cm} > d$
	RQD	80 以上	80～50	60～30	40～10	20 以下
	評価区分	1	2	3	4	5

6. おわりに

本文では、既往の自由断面掘削機の掘削能率予測モデルから、Bilgin らの提案を採用し、国内実績との対比によって国内での適用可能性を示した。また、自由断面掘削機による掘削から、割岩掘削および発破掘削への移行に関するガイドラインを示した。しかし、同提案式における岩盤物性値は一軸圧縮強度と RQD であるのに対して、国内実績では RQD の記録がほとんどの場合に残されていない。このため、実用面では未解決の問題を残すことになる。したがって、今後は国内の岩盤評価において一般に用いられる割目間隔の適用性も含めて、実績を集積することが必要と考えられる。なお、本研究はジェオフロンテ研究会掘削工法分科会割岩工法 WG における研究の一貫として実施したものであることを付記する。



図－ 5. 3 「割目間隔」を用いた掘削工法選定図

参考文献

1) Breeds, C D and Conway, J J: Rapid Excavation, SME Mining Engineering Handbook, Editor: H L Hartman, 2nd Edition, Vol.2, Chapter 22.1, p.1877, 1992

2) 三谷 哲：ロードヘッダーの施工性評価基準案、熊谷技報第 45 号、pp.1～7、1989.3

3) 宮地・羽立・古川・中川・中原：コーン型プランジャをもつシュミットハンマーによる岩盤評価とロードヘッダーの掘削能力予測に関する研究、岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、Vol. 2 3、pp.222～226、1991

4) H.Coupur, J.Rostami, L.Ozdemir, N.Bilgin: Studies on performance prediction of roadheaders based on field data in mining and tunneling projects

5) Peter N.W. Verhoef: WEAR OF ROCK CUTTING TOOLS, A.A.BALKEMA, pp.89-94, 1997

6) F. F. Roxborough: Research in Mechanical Rock Excavation Progress and Process, Proc. of RETC vol.1, pp.225-244, 1985

7) 日本道路公団 設計要領第三集トンネル(1)トンネル本体工、p.87、H9.10