

大型機械掘削機の性能とCERCHER試験の関係

須藤 敦史^{1*}

¹岩田地崎建設株式会社 技術部 (〒105-8488 東京都港区西新橋3-23-5)

*E-mail: a.sudou@iwata-gr.co.jp

近年、トンネル周辺の立地条件などの諸事情から、無発破工法や大型（200~300kW級）掘削機によるトンネル掘削が多く採用されている。一方、わが国では1960~1970年代より、トンネル掘削機械が導入され普及してきたが、岩盤掘削（切削）における実用的な研究があまりなされなかったため、トンネル掘削機械の選定にあたって、主に岩盤の一軸圧縮強さに対するカタログデータで判断しているのが現状である。

本論文では、トンネル掘削に対するアンケート調査、さらに一部ではCERCHER試験を実施して、大型掘削機におけるピック消費量を含む掘削性能と岩盤性状（CAI値・RQDと一軸圧縮強さ）の関係を明らかにしており、今後のトンネル掘削における大型（200~300kW級）掘削機の活用を目的としている。

Key Words : heavy weight road headers, performance, rock testing, tunnel excavation, database

1. はじめに

近年、トンネル周辺の立地条件などの諸事情から、無発破工法や大型掘削機械によるトンネル掘削が多くなっており、これまで用いられてきた機種より大きな200~300kW級の掘削機が採用されている。

一方、わが国では1960~1970年代に国内と諸外国のメーカーとの技術提携により、トンネルに掘削機械が導入され普及してきたが、トンネル掘削機の性能は大きさ・種類に加えて、掘削岩盤の岩種やその亀裂状況などの諸条件で大きく変動する¹⁾。

したがって、工期や工費を見積るための掘削能率やピック消費量などを把握する実用的な研究があまりなされなかったため、現状ではトンネル掘削機械において機種選定にあたって主に掘削岩盤の一軸圧縮強さに対するカタログデータで判断しているのが現状である。

そこで本論文では、トンネルの施工現場において大型（200~300kW級）掘削機の性能に対するアンケート調査を実施し、一部のトンネル現場では硬岩（安山岩）に対する摩耗に対する室内試験（CERCHER試験）なども実施している。

次に、これらのアンケート調査および岩石・岩盤試験の結果を基に、大型の縦軸掘削機におけるピック消費量を含む掘削性能と岩盤性状（CAI・RQDと一軸圧縮強さ）との関係を明らかにしており、今後の硬岩地山のトンネルに対する大型（200~300kW級）掘削機の活用を目的としている。



写真-1 300kW 級縦軸（インライン）型掘削機



写真-2 300kW 級横軸（クロスヘッド）型掘削機

2. 大型（300kW級）機械掘削機

大型(200～300kW級)の掘削機は、写真-1,2に示すように、カッターヘッドの回転方向により縦軸（インライン）型と横軸（クロスヘッド）型に大別される。

海外では横軸（クロスヘッド）型の掘削機の掘削実績が多いが、わが国におけるトンネル掘削では圧倒的に縦軸（インライン）型の使用実績が多いのが現状である。

3. 300kW級縦軸型掘削機の性能

わが国では山岳トンネルの機械掘削において、圧倒的に使用実績が多い300kW級の縦軸（インライン）型掘削機の掘削性能を現場のアンケート調査より求める。

(1) アンケートにおける300kW級縦軸型掘削機の掘削

今回のトンネル掘削現場のアンケート調査で得られた300kW級縦軸型掘削機の掘削性能を図-1に示す。

図-1より、概ねメーカー提示の掘削能力（公称値）やトンネル工事用機械便覧＜山岳編＞（トンネル技術協会，平成8年2月）に記載されている300kW級の縦軸型掘削機の掘削能力とほぼ同程度の性能を示しているが、そのばらつきは大きい値を示している。

これは、掘削岩盤の物性値（一軸圧縮強さやRQDなどの亀裂状態など）、岩石の種類（構成鉱物の粒径と含有量など）さらに掘削機の機械特性（ブーム形状や出力など）が影響を与えていると考えられる。

(2) 既往の研究

300kW級縦軸型の掘削機における性能推定や予測に関する既往の研究はBilgin他²⁾により整理されており、予測式(1a)、(2b)が提案されている。

$$ICR = 0.28 \times HP \times (0.974)^{RMCI} \quad (1a)$$

$$RMCI = \sigma_c \times (RQD/100)^{2/3} \quad (1b)$$

ICR ：掘削性能(m^3/hr)， σ_c ：一軸圧縮強さ(MPa)， HP ：掘削機動力(=0.745kW)， RQD ：Rock Quality Designation(%)

ここでアンケートより得られた300kW級縦軸型掘削機の掘削実績とBilginによる掘削量の予測値($RQD=10, 80$ を表示)を図-2に示す。

図-2より、Bilginによる掘削予測は、300kW級縦軸型掘削機における性能予測には適用は難しい。

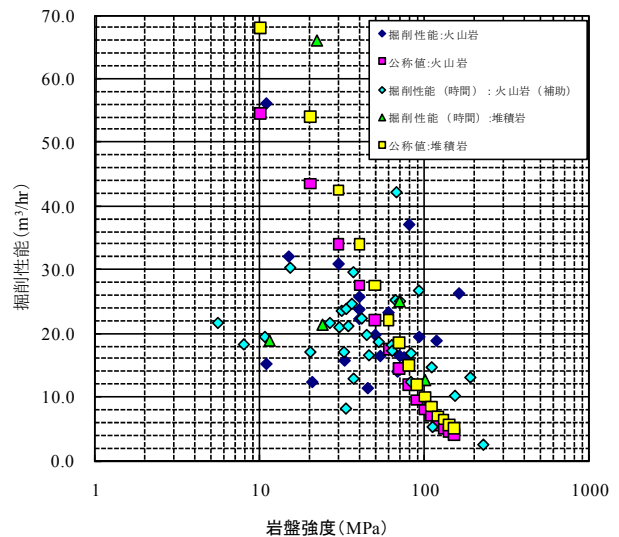


図-1 300kW級縦軸（インライン）型掘削機の性能

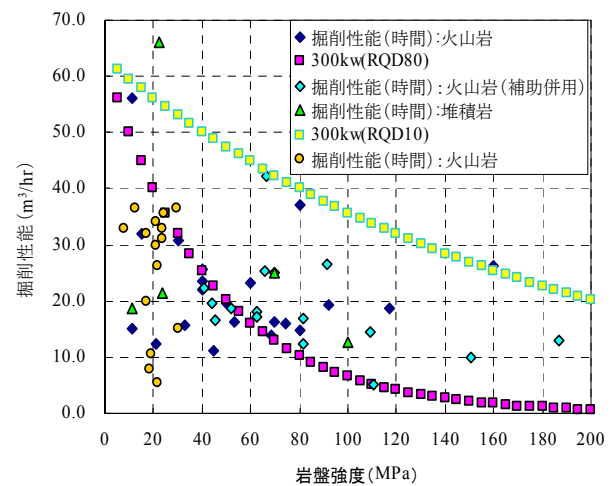


図-2 300kW級縦軸型の掘削性能と Bilgin の予測値

4. 300kW級縦軸型掘削機における性能予測

(1) 掘削性能の予測式

本研究では、式(1a)、(1b)を参考にして一軸圧縮強さと岩盤の亀裂指数(RQD)を基本とした縦軸型における機動力(カッター出力)別の予測式(2a)～(2c)を提案する³⁾。

$$ICR_{HP} = -A_{HP}^{MRPI} \cdot \ln(UCS) + B_{HP}^{MRPI} \quad (2a)$$

$$A_{HP}^{MRPI} = \alpha_{HP}^A \cdot (RQD)^{-\beta_{HP}^A} \quad (2b)$$

$$B_{HP}^{MRPI} = \alpha_{HP}^B \cdot (RQD)^{-\beta_{HP}^B} \quad (2c)$$

ICR ：掘削性能(m^3/hr)， UCS ：一軸圧縮強さ(MPa)， $HP(300kW)$ ：カッターヘッドパワー(kW)， $A_{HP}^{MRPI}, B_{HP}^{MRPI}$ ：性能係数(CMRP)，

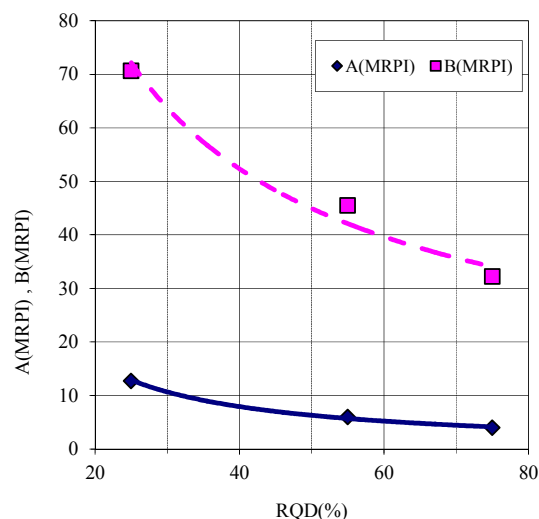


図-3 RQDにおける性能係数（性能 300kW 縦軸型）

表-1 指数・係数パラメータの同定値

HP	CMRP	α	β
300kW	A	789	1.157
	B	1662	0.857

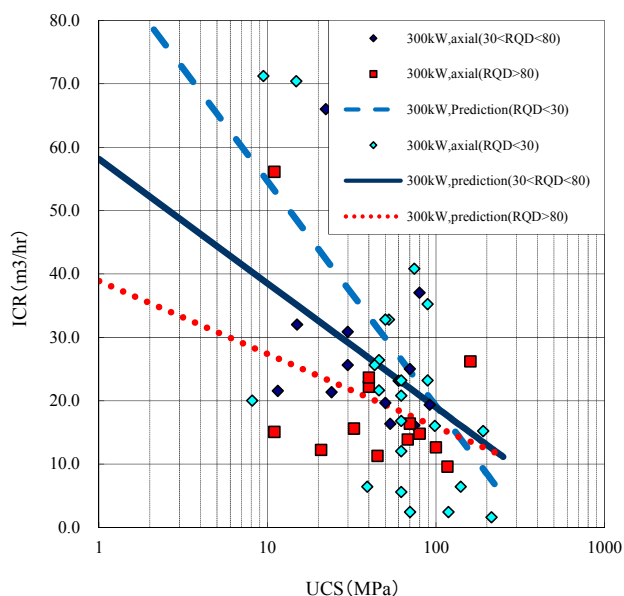


図-4 RQD別の 300kW 級縦軸型の掘削予測値

$\alpha_{HP}^A, \alpha_{HP}^B$: 係数パラメータ, $\beta_{HP}^A, \beta_{HP}^B$: 指数パラメータ, RQD : Rock Quality Designation(%)

上記のように、縦軸型の掘削機における性能予測式は、わが国で一般的に岩盤特性値として用いられている一軸

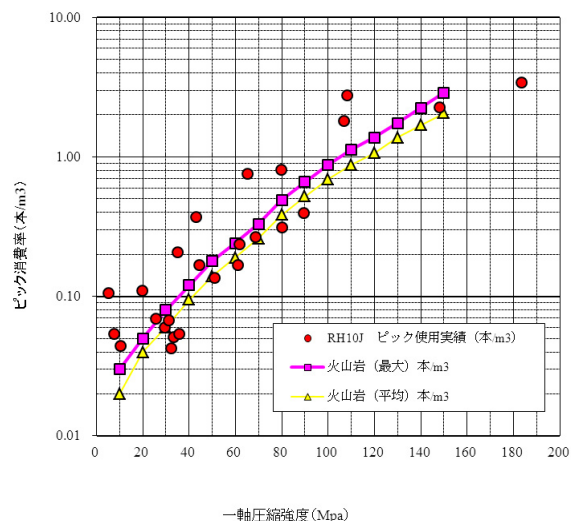


図-5 300kW 級縦軸型掘削機のピック消費実績

圧縮強さ(UCS)と割目間隔(RQD)を重要と考え、加えて掘削機の大きさはカッターヘッドの機動力(HP)別に予測式を考える。

(2) アンケート値を用いた係数・指数パラメータ同定

今回のアンケート調査より得られた 300kW 級縦軸型の掘削機における RQD 別の実績値より、式(2b)～(2c)における係数・指数パラメータを同定して（表-1 参照）、性能係数の RQD における変化を求めると図-3 となる。

なお、アンケート調査値からの係数・指数パラメータの同定は最尤法（付録 1 参照）を用いている。

さらに求めた性能係数を用いて、図-4に示すように 300kW 級縦軸型の掘削機における RQD 別の掘削性能予測値が求められる。

図-4より、岩盤の一軸圧縮強さ（UCS）と亀裂指数（RQD）を考慮した 300kW 級縦軸型掘削機の掘削予測が式(2a)～(2c)で示せる。

5. 300kW 級縦軸型掘削機におけるピック消費量と岩盤の CERCHAR 摩耗試験

(1) ピック消費の実績値

掘削性能と同様に 300kW 級縦軸型掘削機における実際のピック消費量（安山岩、亀裂無し、一軸圧縮強さ:10～150MPa）を図-5に示す。

図-5より、ピック消費量はメーカーおよびトンネル工事用機械便覧＜山岳編＞（トンネル技術協会、平成 8 年 2 月）における 300kW 級の縦軸型掘削機におけるピック消費量より大きな値を示している。

したがって、300kW 級縦軸型における実際のピック消

表-2 CERCHARの摩耗係数（岩種）

CAI値	岩 種
CAI<0.6	泥灰岩, 岩塩, 硫黄, 石膏, 石炭
0.6<CAI<1.0	中硬質泥灰岩, 軟質堆積岩（砂岩を除く）, 硬質石膏
1.0<CAI<1.5	中硬質堆積岩（砂岩を除く）, 軟質変成岩, 非溶結性凝灰岩・凝
1.5<CAI<2.0	中硬質砂岩・グライワック砂岩, 硬質堆積岩（砂岩を除く）, 中
2.0<CAI<3.0	硬質砂岩・グライワック砂岩, 硬質変成岩, 弱風化火成岩
3.0<CAI	非風化深成岩, 溶結性凝灰岩, 非風化火成岩, 非風化変成岩

*火成岩（玄武岩・安山岩・流紋岩）, 変成岩（片麻岩・千枚岩・片岩・蛇紋岩・チャート, 石灰岩）, 深成岩（花崗岩・閃緑岩・輝緑岩・斑れい岩）, 堆積岩（砂岩・泥岩・シルト岩・頁岩・礫岩）

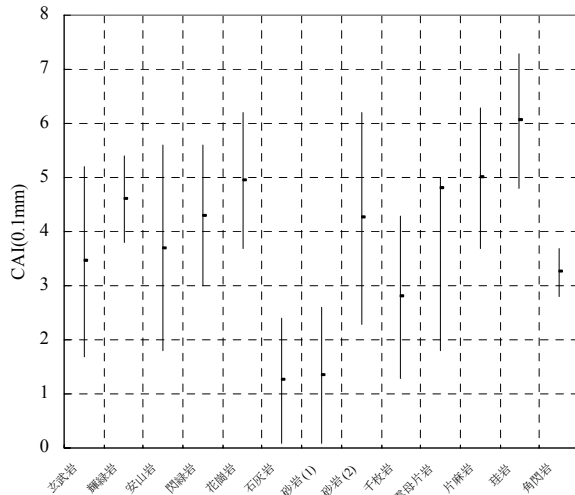


図-6 岩種と CERCHAR 摩耗係数 (CAI)

表-3 一軸圧縮強さと CERCHAR 摩耗係数 (CAI)

CAI	一軸圧縮強度 (MPa)
0.6	>50
1.0	50~90
2.0	90~150
3.0	150<

費量は、掘削量と同様に切羽岩盤の種類・強度とその亀裂状態（RQD）などに大きく依存すると考えられる。

そこで、以下では岩盤の一軸圧縮強さ（UCS）と亀裂状態（RQD）などを考慮したピック消費量を考え、さらにピック消費量を正確に推定するための岩石試験（CERCHAR摩耗試験）との相関を考える。

(2) CERCHAR摩耗試験による岩盤種類

Cercher Rock Abrasiveness Test (CERCHAR 摩耗試験)⁴⁾は、フランス石炭研究センターで考案された岩石の摩耗性を求める試験である。

この試験法では、鋼製針を試験岩石に押し付けながら引っ掻き、試験後の針先端の摩耗状況を測定して、Cercher Abrasiveness Index (CAI)として規定し、それらを岩盤の摩耗性を表す指数（付録.2 参照）として用いるものであり、岩盤（岩石）の風化状態・種類・成分によって表-2および図-7のような関係が示されている。

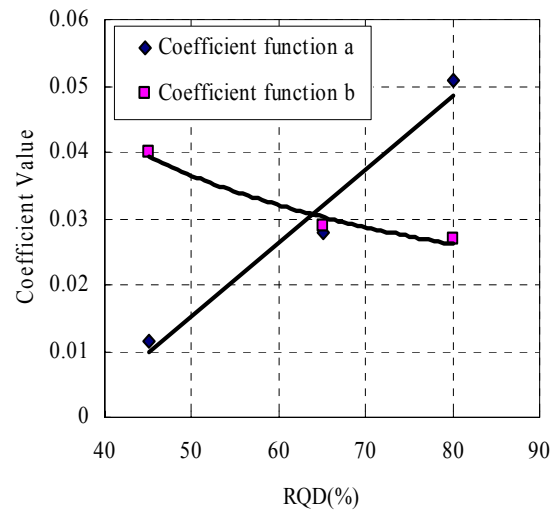


図-7 RQDにおける性能係数（ピック消費 300kW 縦軸型）

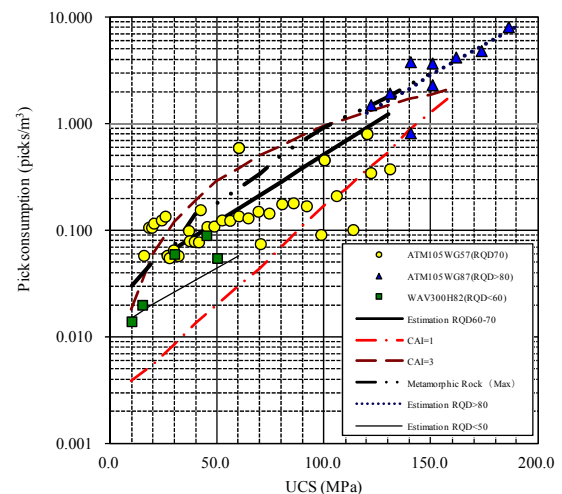


図-8 300kW 級縦軸型のピック消費量と CAI

(3) CERCHAR摩耗試験 (CAI) と一軸圧縮強さ (UCS)

既往の研究⁵⁾と北海道の小樽周辺で産出する（張碓）安山岩における一軸圧縮強さとCAIより得られた、CAIと岩盤の一軸圧縮強さの関係は、表-3に示すようにまとめられる。

表-3より、一軸圧縮強さ（MPa）から岩盤（岩石）のCERCHAR摩耗係数（CAI）の概略値が推定できる。

7. 300kW級縦軸型掘削機における

ピック消費の予測値

(1) ピック消費量の予測式

掘削性能と同様にピック消費量の予測式においても岩盤の一軸圧縮強さ（UCS）と亀裂指数（RQD）の大きさを考慮した予測式(3.a)～(3.c)を提案する。

$$PC_{RQD} = a_{RQD}^{PC} \cdot e^{b_{RQD}^{PC} \cdot UCS} \quad (3.a)$$

$$a_{RQD}^{PC} = 0.001 \cdot RQD - 0.0396 \quad (3.b)$$

$$b_{RQD}^{PC} = 0.5909 \cdot RQD^{-0.712} \quad (3.c)$$

PC : ピック消費量(本/m³), UCS : 岩盤の一軸圧縮強度 (MPa), a_{RQD}^{PC} , b_{RQD}^{PC} : 性状係数 (Coefficient Function), RQD : Rock Quality Designation(%)

ここで性状係数を岩盤の亀裂指数 (RQD) で表すと図-7のようになり, 式(3.b), (3.c)における定数はアンケート調査値から最尤法 (付録 1参照) で同定した値である。

(2) 300kW縦軸型掘削機におけるピック消費の予測値

ここで式(3.a)~(3.c)によって推定したピック消費量と実際のピック消費量, さらにCAI[®]を示したものを図-8に示す。

図-8 より, 岩盤の一軸圧縮強さ (UCS) と亀裂指数 (RQD) が与えられれば式(3.a)~(3.c)により, ピック消費量の予測が可能となる。

7. 結 論

本論文では, トンネルの施工現場において大型 (200~300kW級) 掘削機のパフォーマンスに対するアンケート調査や硬岩 (安山岩) に対するCERCHER試験を実施し, 大型掘削機のピック消費量を含む掘削性能と岩盤性状 (CAI・RQD値と一軸圧縮強さ) の関係を検討した結果以下の結論が得られ, 明らかにしており, 今後の硬岩地山に対する大型 (200~300kW級) 掘削機の活用を目的としている。

- ① アンケート調査結果に基づいた岩盤の一軸圧縮強さ (UCS) と亀裂指数 (RQD) を考慮した300kW級縦軸掘削機のパフォーマンス予測式の提案を行った。
- ② 岩盤の一軸圧縮強さ (MPa) からCERCHAR磨耗係数 (CAI) の概略値が推定できる。
- ③ 岩盤の一軸圧縮強さ (UCS) と亀裂指数 (RQD) より, ピック消費量の予測が可能となる。

付録 1 「最尤法」

実際の観測データ ($X_{t0}, X_{t1}, \dots, X_{tN}$) を考えると最尤法により, 係数 (a, b) の推定値は, 観測データが最も高い確率で抽出されるように算出される。

ここで観測データ ($X_{t0}, X_{t1}, \dots, X_{tN}$) に対して $y_t = \ln(X_t)$ と対数変換されたデータ ($y_{t0}, y_{t1}, \dots, y_{tN}$) は以下となる。

$$p(X_{t0}, X_{t1}, \dots, X_{tN}) = p(y_{t0}, y_{t1}, \dots, y_{tN}) \left| \frac{\partial(y_{t0}, y_{t1}, \dots, y_{tN})}{\partial(X_{t0}, X_{t1}, \dots, X_{tN})} \right| \quad (a.1)$$

$$\left| \frac{\partial(\dots)}{\partial(\dots)} \right| : \text{ヤコビアン行列の行列式の絶対値}$$

両辺の対数を取ると観測データ ($X_{t0}, X_{t1}, \dots, X_{tN}$) に基づいた対数尤度関数は以下となる。

したがって, 観測データ ($X_{t0}, X_{t1}, \dots, X_{tN}$) に対する係数の値は式 (a.1) を最大化することによって推定できる。

$$\begin{aligned} \log p(X_{t0}, X_{t1}, \dots, X_{tN}) \\ &= \log p(y_{t0}, y_{t1}, \dots, y_{tN}) - \sum_{n=0}^N \log(X_{t_n}) \\ \log p(y_{t0}, y_{t1}, \dots, y_{tN}) \\ &= \log p(y_{t0}) + \log \prod_{n=0}^{N-1} p(y_{t_{n+1}} | y_{t_n}) \\ &= \log p(y_{t0}) - \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} \left[\log(2\pi V) + \frac{(y_{t_{n+1}} - y_{t_n} - E)^2}{V} \right] \end{aligned} \quad (a.2)$$

付録 2 「Cercher Abrasiveness Index (CAI)」

岩石 (岩盤) の摩耗性を表す指数であり, 鋼製針を試験岩石に鋼製針を押し付けながら引っ掻き, 試験後の針先端の摩耗状況を求めるものである。

鋼製針の直径は 10mm, 先端は円錐形で 90° であり, 材質は EN24 (British Standard BS 970-1955) で C スケールのロックエル硬度 (HRC) 40 で引張強さ 2GPa である。

試験は, 鋼製針に 70N の垂直荷重を加えながら岩石面状を 10mm 移動させるものであり, CAI (無次元) は試験後に生じた針先の平坦部分の直径を測定して 0.1mm で除した式(b.1)より規定される。

$$I_{CERCHER} = W_C (mm) / 0.1(mm) \quad (b.1)$$

参考文献

- 1) 鈴木昌次, 萩森健治, 大山宏, 中川浩二: 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,
土木学会岩盤力学に関するシンポジウム, Vol33, pp.151-156, 2004.
- 2) Bilgin, N., Seyrek, T., Erding, T. and Shahriar, K. : Roadheaders Glean Valuable Tips for Istanbul Metro, *Tunnels & Tunnelling*, pp.29-32, October,1990.
- 3) Atsushi SUTOH, Keishi MATSUMOTO : Identification of heavy weight type roadheaders performance based on field data, 土木学会 論文集 F1 (トンネル工学) , Vol.70,No.3,pp.57-64,2014.
- 4) Michalakopoulos, T., Anagnostou, V., Bassanou, M. and Panagiotou, G.,: The influence of steel styli hardness on the Cerchar abrasiveness index value, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(2)321-327,2006.
- 5) 大久保誠介, 福井勝則 : Mohs 試験,CERCHER 試験と旋削試験による岩石硬度の比較, *Journal of Mining and Materials Processing Institute of Japan*, Vol.127, pp.497-503,2011.
- 6) VOEST - ALPINE BERGTECHNIK : Roadheader Application Principal Guidelines, pp.6-8,1999.

PERFORMANCE OF HEAVY WEIGHT ROADHEADERS AND CONSIDERATION ON CERCHER ROCK ABRASIVENESS TEST

Atsushi SUTOH

In Japan, it is necessary to excavate many hard rock tunnels using a heavy weight (200-300kW class) transverse cutter head type roadheaders, which has reason for various conditions of saving the environment from the construction site and so on. And the performance of a heavy weight transverse cutter head type roadheaders is a critical issue in assessing technical and economic feasibility of its application in many tunneling projects.

This paper presents and discusses the performance estimation model of instantaneous cutting rate (ICR) and pick consumption which was introduced rock quality designation index (RQD) from this database. Especially this paper was indicated that correlation between Cerchar Rock Abrasiveness Test and the pick consumption of heavy weight transverse cutter head type road headers.