

大型（200～300kW級）のブーム式掘削機における性能に関する研究

須藤 敦史¹・大山 宏²・鈴木 康雅³

¹正会員 岩田地崎建設(株) 技術部 (〒105-8488 東京都港区西新橋3-23-5)

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

²オオヤマ&Co. (〒121-0813 東京都足立区竹ノ塚1-27-9)

³カヤバシステムマシナリー(株) 営業本部建設機械部 (〒105-0012 東京都港区芝大門 2-5-5)

近年、市街地や重要構造物に近接した山岳トンネルの建設が増加しているが、掘削工事（発破など）に伴う振動や騒音が支障となり、大型の自由断面掘削機を用いた無発破工法における施工が多くなっている。一方、北海道では山岳トンネルの坑口部において周辺地山の緩みを防ぐため、大型のブーム式掘削機を用いて中硬岩から100MPaを越える硬岩まで掘削している。

しかし、これら大型の掘削機械によるトンネル掘削が増加する一方で工期や工費を見積もるための掘削性能やピック消費量などを把握する基礎研究がほとんどなされていないのが現状である。そこで本論文はアンケート調査により、大型（200～300kW級）のブーム式掘削機の掘削性能を把握するための基礎データの収集とともに掘削の適用範囲などの基礎検討も行なっている。

Key Words : heavy weight roadheader, tunnel excavation, performance, prediction, database

1. はじめに

近年、市街地や重要構造物に近接したところでの山岳トンネルの建設が増加してきているが、発破作業など掘削工事にとまなう振動や騒音が支障となり、大型のブーム式掘削機やブレイカなどを採用した無発破工法によるトンネルの掘削が多くなっている。

またブーム式掘削機や大型ブレイカなどの自由断面掘削機を用いる機械掘削工法は、トンネル標準示方書[山岳トンネル編]¹⁾などに記述されているが、一般的な山岳トンネルの掘削工法ではないためかトンネル技術者の間でもなじみが薄く十分理解されているとはいえない。

一方、北海道では山岳トンネルの坑口部において周辺地山の緩みを防ぐために大型のブーム式掘削機を用いて中硬岩から100MPaを越える硬岩まで掘削している。

しかし、これら大型のブーム式掘削機械による山岳トンネルの掘削事例が増加する一方で工期や工費を見積もるための掘削性能やピック消費量などを把握する基礎研究はほとんどなされていないのが現状である^{2,3)}など。

そこで、本論文は大型（200kW～300kW）のブーム式掘削機における掘削性能の把握するための基礎データを収集するとともに掘削適用範囲の検討を実施し、同時に縦軸・横軸タイプの掘削機における掘削性能の予測式の

提案も行なっている。

2. 大型（200kW・300kW）ブーム式掘削機

山岳トンネルの掘削工法は、発破工法と機械掘削工法（無発破掘削工法）に大別され、さらに発破工法は通常発破と制御発破（自由面発破等）に分類される。

これに対して機械掘削工法は自由断面掘削方式と全断面掘削（TBM）方式に分類され、自由断面掘削方式はさらに割岩工法、ブレイカ工法、ブーム式掘削機を主とした自由断面掘削機などの工法に分けられる。

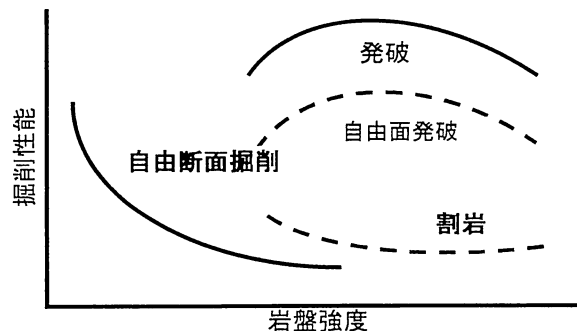


図.1 トンネル掘削工法の掘削性能と岩盤強度

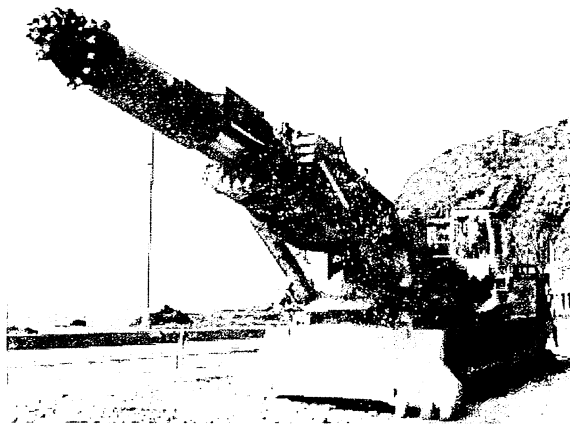


写真.1 300kW級ブーム式掘削機（縦軸型）

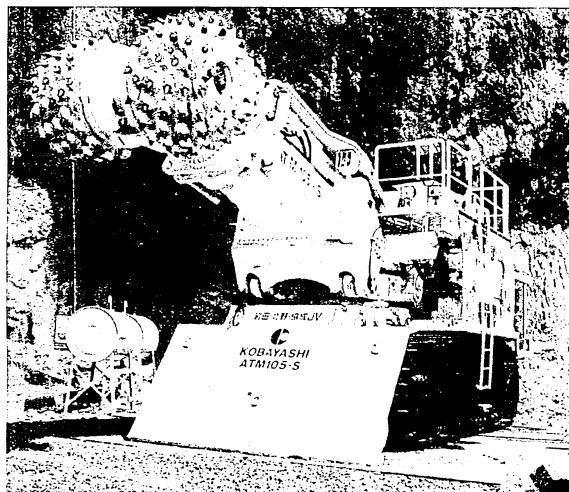


写真.2 300kW級ブーム式掘削機（横軸型）

(1) 掘削性能と岩盤強度

各山岳トンネルの掘削工法と掘削性能と岩盤強度の関係を図.1に示す。発破工法は岩盤強度・掘削性能とも大きな性能を示しているが、振動・騒音などの環境問題も発生する場合も多い。また、割岩工法は強度の大きい岩盤における掘削が可能であるが掘削性能が小さく、ブーム式掘削機など自由断面掘削機は岩盤強度の小さい範囲のトンネル掘削工法である。

しかし、ブーム式掘削機などによるトンネルの掘削性能は、掘削岩盤の岩種やその亀裂状況などの諸条件で変動するため、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の把握がなされていないのが現状である。

(2) 大型（200kW・300kW）のブーム式掘削機

大型ブーム式掘削機の種類は、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）型に分類される。海外では横軸（クロスヘッド）型のブーム式掘削機の実績が多いが、我国における山岳トンネルの掘削においてブーム式掘削

表.2(a) ブーム式掘削機（300kW級）の調査数

300kW級	横軸	縦軸	Data数
アンケート回答数	8	40	64

表.2(b) ブーム式掘削機（200kW級）の調査数

200kW級	横軸	縦軸	Data数
アンケート回答数	1	51	75

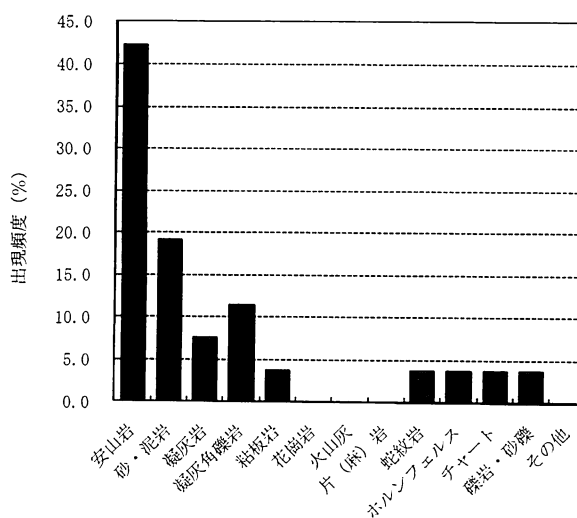


図.2(a) 300kW級で掘削されたトンネルの地質構成

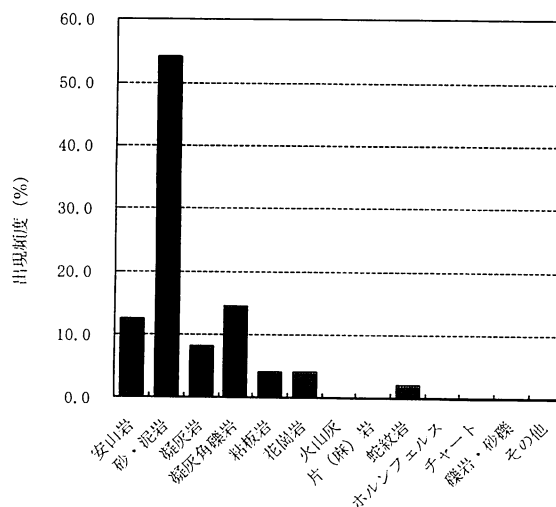


図.2(b) 200kW級で掘削されたトンネルの地質構成

機の使用実績は圧倒的に縦軸（インライン）型が多いのが現状である。

3. 大型の自由断面掘削機における実績調査

大型ブーム式掘削機における掘削性能およびピック消費量など、実際の値を把握する目的で実施したアンケー

トの調査数を表.2(a), (b)に示す.

表.2(a), (b)より, 300kW 級では横軸型のブーム式掘削機を採用したトンネル掘削の実績は 8 件得られたが, 200kW 級では 1 件の掘削実績のみである.

次に, 大型ブーム式掘削機において掘削した山岳トンネルの地質構成を図.2(a), (b)に示す.

図.2(a), (b)に示すように 300kW 級の自由断面掘削機で掘削したトンネルの地質構成は, 安山岩 (42%) が最も多く, 次に砂岩・泥岩 (19%), 凝灰角礫岩 (12%), 凝灰岩 (7%) であり, また 200kW 級のブーム式掘削機で掘削したトンネルの地質構成は, 砂岩・泥岩 (55%) が最も多く, 次に凝灰角礫岩 (15%), 安山岩 (12%), 凝灰岩 (8%) の順であるとの結果が得られた.

4. 300kW・200kW級縦軸型のブーム式掘削機の掘削実績

今回調査したアンケート結果より得られた300kW・200kW級縦軸型のブーム式掘削機における山岳トンネルの掘削性能を以下に示す.

(1) 300kW級縦軸型掘削機の掘削性能 (実績値)

300kW 級横軸型のブーム式掘削機の掘削性能は, 図.3(a)に示す結果が得られ, 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) に示される標準の掘削性能より大きな掘削性能を示している.

(2) 200kW級縦軸型掘削機の掘削性能 (実績値)

200kW 級横軸型のブーム式掘削機の掘削性能は, 図.3(b)に示す結果が得られ, 300kW と同様に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) に示される標準の掘削性能より大きな掘削性能を示している.

5. 300kW・200kW級縦軸型のブーム式掘削機の掘削性能予測

我国において山岳トンネルの掘削において圧倒的に使用実績の多い300kW級と200kW級縦軸型のブーム式掘削機における掘削性能の予測を考える.

(1) 300kW級縦軸型における掘削性能の予測式

図.3(a)に示されるように 300kW 級縦軸型のブーム式掘削機では, 岩盤の物性値 (一軸圧縮強度や RQD などの

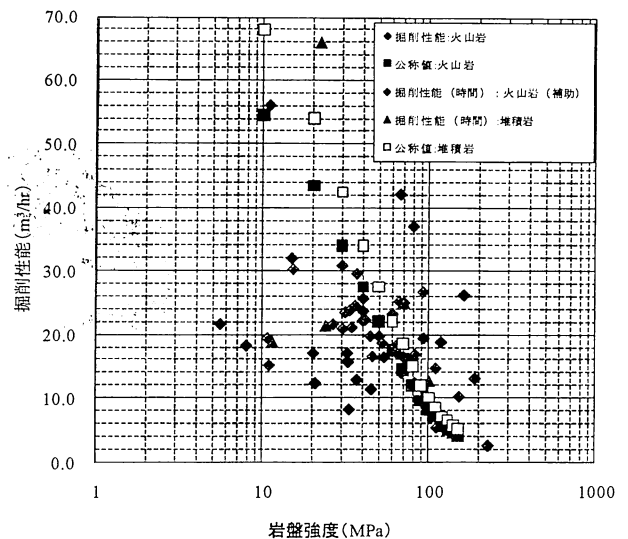


図.3(a) 300kW 級縦軸型ブーム式掘削機の性能

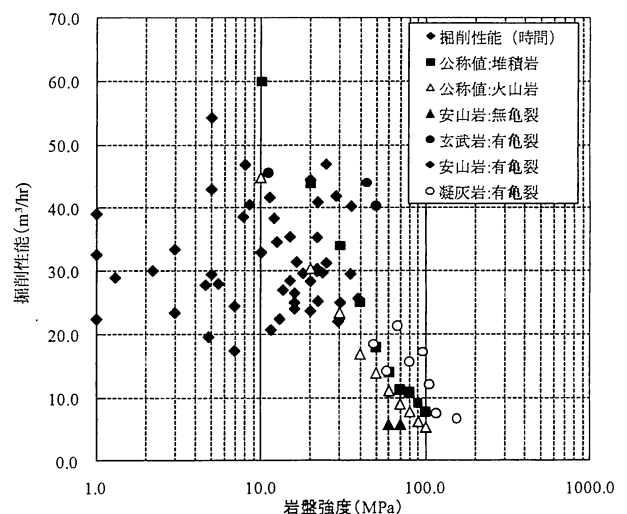


図.3(b) 200kW 級縦軸型ブーム式掘削機の性能

亀裂状態など) と岩盤の種類 (構成鉱物の含有量と粒径など) および機械特性やその性能の影響を大きく受けて大きくばらついた値となっていると考えられる.

a) 既往の研究

300kW級縦軸型のブーム式掘削機における掘削性能の推定や予測に関する既往の研究はBilgin他²³⁾により整理されており, 加えて予測式(1a), (1b)が提案されている.

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

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

ICR: 掘削性能 (m³/hr), σ_c : 一軸圧縮強度 (kgf/cm²), HP: 掘削機動力 (= kW × 0.75),

RQD : Rock Quality Designation(%)

ここで、アンケートより得られた 300kw 級縦軸型のブーム式掘削機における掘削実績と Bilgin による掘削量の予測値 ($RQD=10$ および 80) を図. 4 に示す。

図. 4 より、Bilgin による掘削予測量は、300kw 級縦軸型のブーム式掘削機における掘削性能の予測には適用が難しい。

b) 縦軸型における掘削性能の予測式

本研究では、地質調査などで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(カッター出力)のみを用いた予測式(2a)~(2c)を提案する。

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

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

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

ICR :(m^3/hr), UCS :(MPa), HP :カッターヘッドパワー (kW),

$A_{HP}^{MRPI}, B_{HP}^{MRPI}$:性能係数, $\alpha_{HP}^A, \alpha_{HP}^B$:係数パラメータ,

$\beta_{HP}^A, \beta_{HP}^B$: 指数パラメータ, RQD : Rock Quality

Designation(%)

このように 300kW 縦軸型のブーム式掘削機における掘削性能の予測式では、掘削岩盤における一軸圧縮強度と岩盤の割目間隔が重要であり、機械性能に関しては掘削機動力が重要なパラメータとなる。

c) 300kW級縦軸型における掘削性能の予測値

現在まで蓄積されている実績データと今回のアンケート調査より得られた 300kw 級縦軸型のブーム式掘削機の RQD 別の実績値より、式(2b),(2c)における係数・指数パラメータ変動を求めると図. 5 となる。なおパラメータの実績値による同定は最尤法(付録1参照)を用いている。

また図. 6に示すように300kw級縦軸型のブーム式掘削機における RQD 別の掘削性能は、岩盤の強度に加えて岩盤の亀裂指数 (RQD) を考慮した予測値(2a)~(2c)で示せることから、岩盤の強度や亀裂状態 (RQD など) は掘削性能を推定する上で重要な要素であり、予測式は実用的であると言える。

d) 200kW級縦軸型における掘削性能の予測値

同様に、現在まで蓄積されている実績データと今回のアンケート調査より得られた 200kw 級縦軸型のブーム式掘削機の RQD 別の実績値より、式(2a),(2b)における係数・

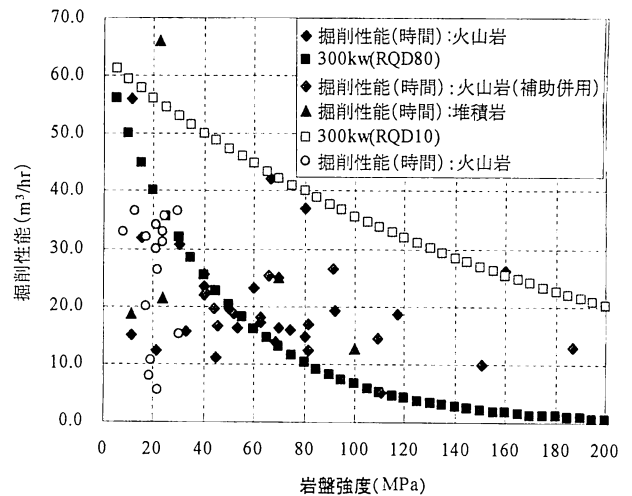


図. 4 300kw 級縦軸型の掘削性能と Bilgin 予測

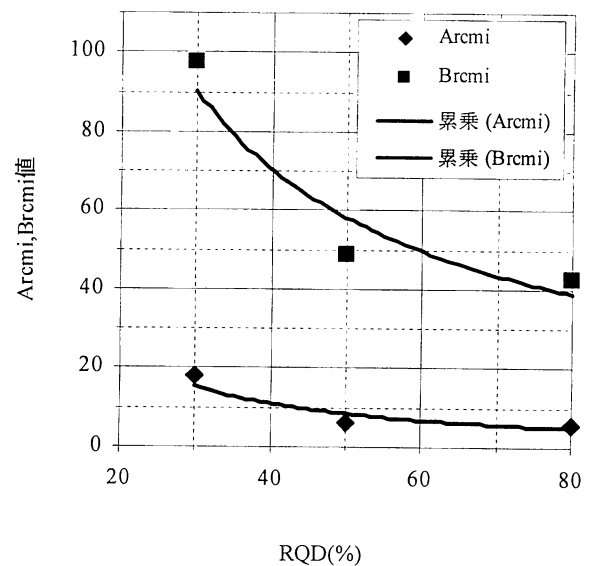


図. 5 係数・指数パラメータの変動 (300kW 級)

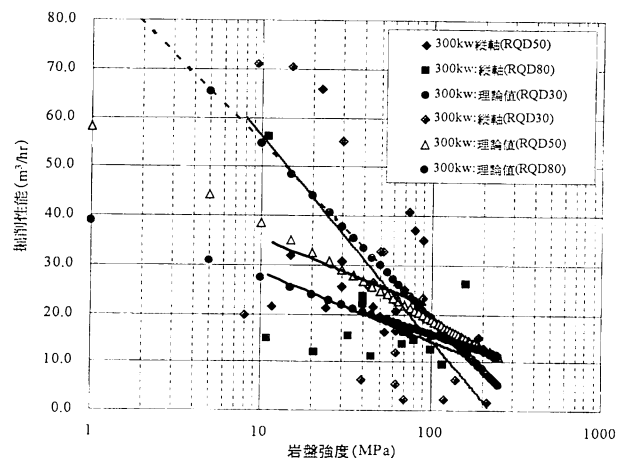


図. 6 RQD 別の 300kw 級縦軸型の掘削性能と予測値

指数パラメータの変化を求めると図. 7 となる。

また図. 8に示すように200kw級縦軸型のブーム式掘削

機のRQD別の掘削性能においても、岩盤の強度に加えて岩盤の亀裂指数（RQD）を考慮した予測値(2a)～(2c)で示せることから、200kw級縦軸型においても岩盤の強度や亀裂状態（RQDなど）は掘削性能であり、予測式は実用的であると言える。

6. 結 論

200～300kW級縦軸型のブーム式掘削機における掘削性能を正確に予測するための基礎データを収集する目的で、アンケート調査を実施した結果、200～300kW級縦軸のブーム式掘削機の掘削性能は、岩盤の強度・亀裂指数（RQD）と密接な関係を有していることが判明した。

次に、大型のブーム式掘削機における掘削性能は、岩盤の強度に加えて岩盤の亀裂指数（RQD）を考慮した提案式で推測されることが判明した。

今後は、岩盤の性質とピック磨耗の関係や、他の掘削方法と併用した効率的な掘削方法の考察等が必要と考えられる。

謝辞：本研究はジェオフロンテ研究会、割岩工法 WG および北海道技術会、トンネル研究委員会の協力を得ている。

付録1 「最尤法」

実際に観測される時系列データ $(X_{t0}, X_{t1}, \dots, X_{tN})$ 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。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。

$$\begin{aligned} & p(X_{t0}, X_{t1}, \dots, X_{tN}) \\ &= p(y_{t0}, y_{t1}, \dots, y_{tN}) \left| \frac{\partial(y_{t0}, y_{t1}, \dots, y_{tN})}{\partial(X_{t0}, X_{t1}, \dots, X_{tN})} \right| \quad (a.1) \\ & \left| \frac{\partial(\dots)}{\partial(\dots)} \right| : \text{ヤコビアン行列の行列式の絶対値} \end{aligned}$$

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。

従って、観測データ $(X_{t0}, X_{t1}, \dots, X_{tN})$ に対する係数の値は式（a1）を最大化することによって推定できる。

$$\begin{aligned} & \log p(X_{t0}, X_{t1}, \dots, X_{tN}) \\ &= \log p(y_{t0}, y_{t1}, \dots, y_{tN}) - \sum_{m=0}^N \log(X_m) \end{aligned}$$

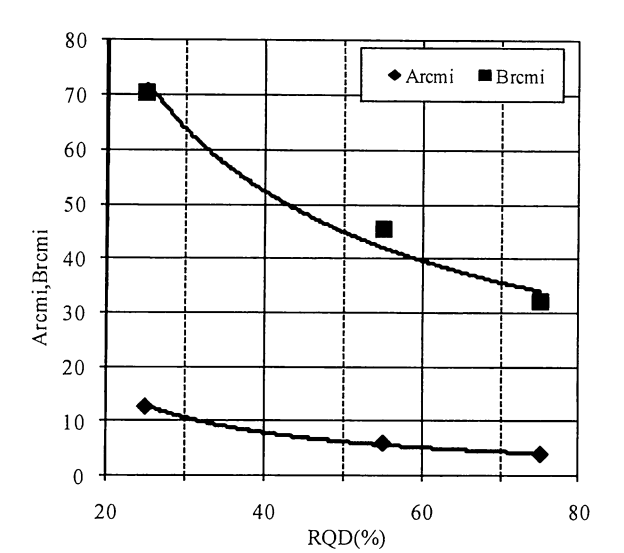


図.7 係数・指数パラメータの変動（200kw）

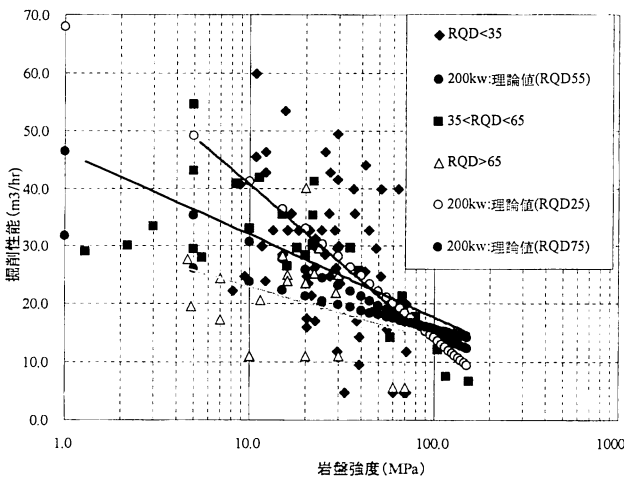


図.8 RQD別の200kw級縦軸型の掘削性能と予測値

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

参考文献

- 1) 土木学会編：2006年度トンネル標準示方書[山岳工法編]・同解説,2006.7.
- 2) 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,Vol.33,pp.151-156,2004.
- 3) N.Bilgin, T.Seyrek, E.Erding and K.Shahriar:Roadheaders Glean Valuable Tips for Istanbul Metro,Tunnels & Tunnelling, pp.29-32, October,1990.

PREDICTION OF HEAVY WEIGHT ROADHEADERS PERFORMANCE BASED ON FIELD DATA IN TUNNELING PROJECTS

Atsushi SUTOH, Hiroshi OYAMA and Yasumasa SUZUKI

In Japan (especially Hokkaido), the performance of a heavy weight roadheader is a critical issue in assessing technical and economic feasibility of its application in tunneling project. This refers to accurate estimation of the production rate, machine utilization, and bit consumption for different geological units to be encountered on the alignment of the tunnel.

In order to develop for reliable performance prediction of heavy weight (200-300kW class) roadheader, the Working Group of the Geo-Fronte Research Association jointly with the Tunnel Research Association in Hokkaido has established a database of heavy weight roadheader field performance, which based on the interview for engineer's of any tunnel construction projects. This database contains field data from the civil construction operations all over Japan, includes a variety of heavy weight roadheaders and different geotechnical conditions.

This paper will present and discuss the performance prediction developed from this database, especially for excavation of tunnel by heavy weight (200-300kW class) cutterhead roadheaders.