

自由断面掘削機を利用した地山評価システムの開発

塚本 耕治¹・蛭子 清二¹・中川 浩二²

¹正会員 株式会社奥村組 技術研究所 (〒300-2612 茨城県つくば市大砂387)

E-mail:koji.tsukamoto@okumuragumi.jp

²正会員 特定非営利活動法人 臨床トンネル工学研究所 (〒755-0084 山口県宇部市川上南側181)

自由断面掘削機が地山を掘削する際の機械データを利用して地山状態を定量的かつリアルタイムに評価する地山評価システムを開発した。本システムを3ヶ所のトンネル工事に適用した結果、現場の技術者が判定した切羽評価点と本システムから算出した評価点はよい一致を示し、実務に適用できる性能を確認した。また、点載荷試験による一軸圧縮強度や坑内弾性波探査による弾性波速度も本システムを利用して推定できることを明らかにし、岩盤物性をより定量的に評価できることを示した。

Key Words : rock mass classification, machinery excavation, roadheader, boom vibration, multiple regression analysis

1. はじめに

山岳トンネル工事においては、安全かつ合理的な施工を行うために切羽位置の地山性状を正しく評価することが重要である。そのために行われる切羽観察では、岩石の圧縮強度、風化変質、割れ目の間隔、割れ目の状態等を観察項目にして地山状態を点数化する切羽評価点法が用いられている。切羽評価点法では、岩石の力学特性を把握するために、一般に切羽位置で採取した試験体を用いて、簡易な試験が行われる。代表的な試験には、点載荷試験、シュミットハンマー試験や軟岩を対象とした針貫入試験などがあり、岩石の圧縮強度が推定される。また、必要に応じて切羽位置で簡易弾性波試験やコアボーリングも行われることがある。これらの試験は、大きな試験装置を必要とせず、比較的容易に行うことができる反面、試験のために切羽での作業を一時的に中断する必要がある。また、切羽の自立が困難な場合には、地山評価の重要性が高いにも関わらず、落石や崩落などの危険があり、切羽での試験を行うことができない。このような場合、掘削機械の応答情報から地山物性に関連付けた評価ができれば、施工サイクルに影響を及ぼすことなく、切羽評価の性能を向上できる。

著者らは、自由断面掘削機に着目し、掘削に伴う機体振動やカッターヘッドの地山への押付け力などの機械データと日本道路公団(以下JH)が標準的に適用している新切羽評価点法の評価点との間に相関関係があることを見出した¹⁾。特に、ブーム振動の

平均振幅は切羽評価点と強い相関があり、モルタル製の模擬地盤を用いた掘削実験においても、模擬地盤の圧縮強度が大きくなるほど、ブーム振動の平均振幅が増大する結果が得られた¹⁾。

これらの知見を基に、本研究では、機械データを説明変数、切羽評価点を目的変数とする重回帰式を求め、切羽一進行分の機械データから切羽評価点を予測する地山評価システムの開発を進めている。ここでは、新切羽評価点法と新幹線トンネルで実績がある地山総合評価点法²⁾を採用した3ヶ所のトンネルに本システムを適用し、その性能を評価した結果について述べる。さらに、切羽観察と同時に実施した点載荷試験、坑内弾性波探査の結果と本システムによる推定値を対比し、地山物性の推定の可能性についても報告する。

2. システムの概要

地山評価システムは、トンネル切羽一進行分の地山を掘削した時の機械データを測定、解析し、地山状態を定量的かつリアルタイムに評価するシステムである。図-1にシステムの構成を示す。本システムは自由断面掘削機に搭載した計測装置を用いて掘削中の機械データを自動計測する「計測システム部」、現場技術者が切羽の状態を評価した結果を入力、記録する「切羽観察記録システム部」、機械データの解析・処理を行い切羽の状態を評価する「評価システム部」の3要素から構成される。地山評価

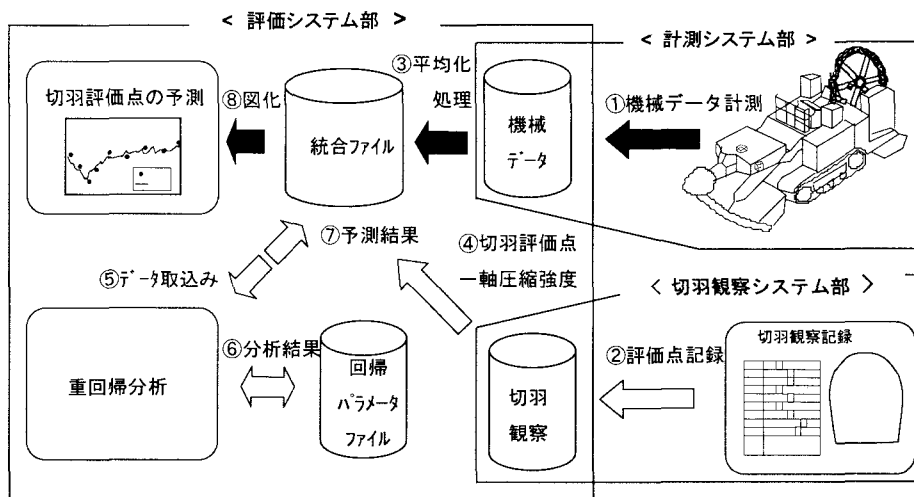


図-1 地山評価システムの構成

システムの構成要素を以下に示す。

表-1 計測項目

(1) 計測システム部

表-1に示す切削モータの電圧および電流、カットヘッドの押付け力、ブーム振動などを計測するために、自由断面掘削機に各種センサを取り付けた。制御・送信装置では、1秒間の計測データを平均化して無線により後方に向けて送信する。後方に設置した受信・収録装置では、これを受信してノートパソコンのハードディスクに保存すると同時に画面上に時系列で表示する。自動計測を行うために、切削モータの電流値が閾値を越えた場合にデータ収録を開始し、閾値以下の状態が一定時間（20分）以上続いた場合には計測を終了するようにした。この時点で切羽一進行分の掘削は終了したと判定し、次の評価システム部の計算処理に移行する。

(2) 切羽観察システム部

現場技術者による切羽評価点、および点载荷試験や針貫入試験による岩石の一軸圧縮強度の換算値はパソコン画面から入力されて、切羽観察のデータベースに保存される。

(3) 評価システム部

切羽一進行分の機械データは、計測項目ごとに平均値が計算される。事前に重回帰分析で求められた回帰式に上記の平均値を代入して切羽評価点や一軸圧縮強度を予測する。現場適用の初期段階、およびその後蓄積されたデータの量に応じて重回帰分析を行い、回帰係数を修正する。

回帰式は、次の式(1)に示すように、目的変数である切羽評価点を4つの説明変数の線形和で表わした。説明変数の選定経緯については後述する。

$$Y = a \cdot X_1 + b \cdot X_2 + c \cdot X_3 + d \cdot X_4 + e \quad (1)$$

計測項目	目的
ブームの旋回角	カットヘッドの位置検出
ブームの上下角	
ブームの伸縮長	
切削モータの電圧	掘削に要した電力量
切削モータの電流	
ブームのシリンダ圧	カットヘッドの押付け力
ブームの振動加速度	ブームの応答振動
掘削時間	掘削能率

ただし、

Y：切羽評価点（一軸圧縮強度、弾性波速度）

a～e：回帰係数

X₁：単位掘削体積あたりの消費電力量（kWh/m³）

X₂：カットヘッドの押付け力（kN）

X₃：ブーム振動の平均振幅（G）

X₄：実掘削能率（=掘削体積÷純掘削時間）（m³/h）

3. システムの性能評価

(1) 適用トンネルの概要

JHの新切羽評価点法を採用したTトンネルとYトンネル、さらに新幹線トンネルの地山総合評価点法を採用したMトンネルの3ヶ所に本システムを適用し、その性能を分析した。TトンネルとYトンネルの地質は新第三紀中新世の流紋岩質凝灰岩であり、Mトンネルの地質は新第三紀鮮新世の泥岩である。自由断面掘削機は3ヶ所のトンネルで同じ機種が用いられた。Tトンネルでは坑口から160m地点から本システムの適用を開始した。また、Yトンネルを含

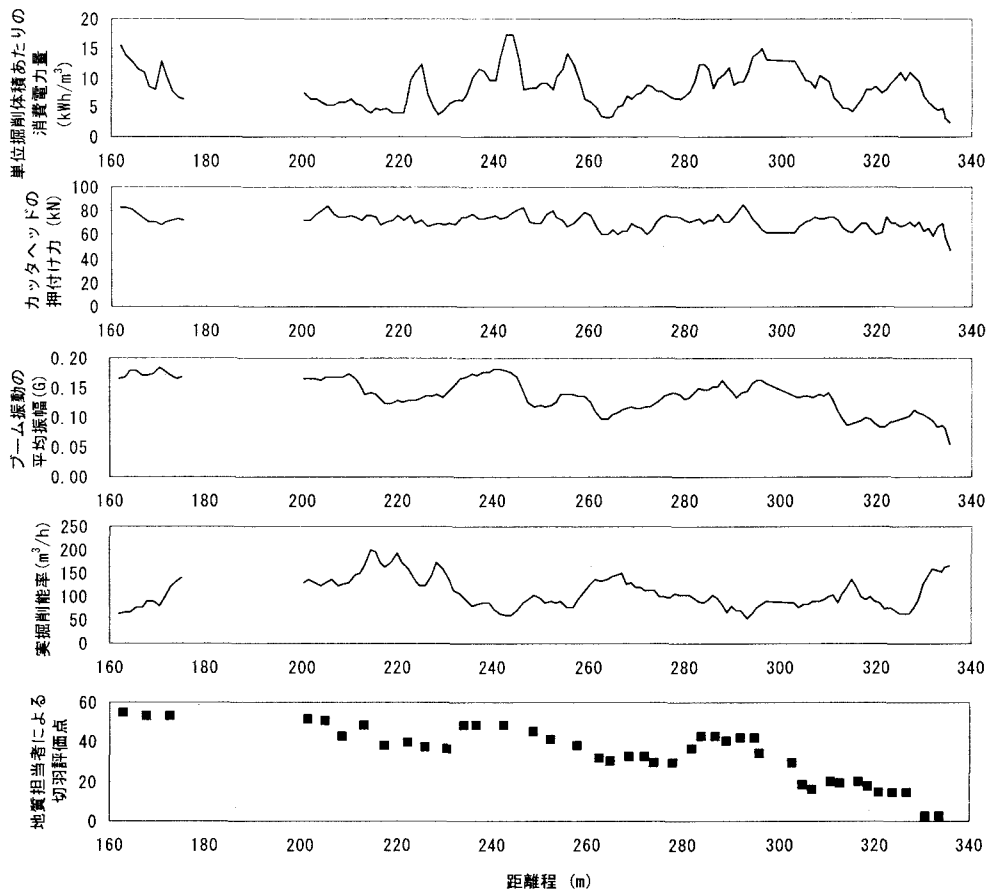


図-2 各説明変数と現場技術者による切羽評価点の比較

めて、必要に応じて切羽位置から採取した岩石を用いて点載荷試験を行った。

(2) 説明変数の選定

重回帰分析に用いる4種類の説明変数は次のように選定した。まず、TBMの機械データの場合を参考に説明変数を抽出した^{3) 4)}。すなわち、自由断面掘削機のカッターヘッドは縦軸型であり、TBMと同様に、カッターヘッドの地山への押付け力と回転力（トルク）によって地山を掘削する。これを参考に、カッターヘッドの押付け力と単位掘削体積あたりの消費電力量を選定した。次に、既報に示した自由断面掘削機のブームの振動特性の分析結果¹⁾から、ブーム振動の平均振幅を選定し、最後に、地山状態の変化に敏感と考えられる実掘削能率を選んだ。以下に、それぞれの説明変数の概要を示す。

a) カッターヘッドの押付け力

カッターヘッドの押付け力は、ブームのシリンダ圧力にシリンダ断面積を乗じて算出した。

b) 単位掘削体積あたりの消費電力量

電動機方式の場合、電力量のほとんどがカッターヘッドの回転によって消費される。カッターヘッドのトルクは、電動機の電力量から計算できる。この電力

量は掘削体積によって変化するため、単位掘削体積あたりの消費電力量に換算した。

c) ブーム振動の平均振幅

ブームの振動特性の中で、平均振幅は既報¹⁾で示したように切羽評価点と強い相関が認められたので、これを用いた。

d) 実掘削能率

岩石の硬さと掘削能率には負の相関関係が認められ、岩石強度が大きくなるほど、相関関係は明瞭に現れると報告されている⁵⁾。実掘削能率は、掘削体積を純掘削時間（掘削機の移動時間や待機時間を除いた時間）で除した値である。

ここでは、4つの説明変数の組合せについて回帰式を作成し、総当り法を適用して適応性の良い組合せを検討した。表-2 には結果を示す。TトンネルとYトンネルの寄与率は、説明変数にすべての説明変数を用いた場合が最も大きくなることから、回帰式には式(1)に示すように4つの説明変数を用いた。

(3) 説明変数と切羽評価点の関係

各説明変数と現場技術者による切羽評価点の距離程に対する変化を図-2 に示す。切羽評価点の大きな地山では、単位掘削あたりの消費電力量とブーム

振動の平均振幅は大きく、実掘削能率は小さくなる傾向が見られる。各判定指標と切羽評価点の全体的な傾向は比較的良く一致している。

(4) 機械データによる切羽評価点の予測性能

本システムを用いて予測した切羽評価点と現場技術者が実際に採点した切羽評価点を比較した。TトンネルとMトンネルの切羽評価点の予測と実績の関係をそれぞれ図-3と図-4に示す。TトンネルおよびMトンネルにおける切羽評価点の予測値は、 2.5σ の誤差内にある。また、用いた回帰式の寄与率 R^2 はそれぞれ、0.71および0.70と大きい。TトンネルとMトンネルの切羽評価点の予測と実績を距離程に対して比較した結果を、それぞれ図-5と図-6に示す。現場技術者による切羽評価点と本システムによる切羽評価点の予測値の距離に対する分布形態が良く一致していることが分かる。以上のような結果から、本システムは実用に供し得る程度の予測性能があることが分かった。また、切羽前方の地山特性がここに示した切羽評価点と同程度の範囲内にある場合には、同じ精度で予測することが可能となる。

(5) 機械データによる一軸圧縮強度と弾性波速度の予測性能

TトンネルとYトンネルの支保パターン変更位置では、切羽から採取した岩石の点載荷試験を行い、一軸圧縮強度を推定した。また、Tトンネルにおいて、切羽評価点が55点である地山状態が健全な区間（T.D. 164～T.D. 174mの10m区間）と坑口近くの切羽評価点が3～20点で地山状態が脆弱な区間（T.D. 306～T.D. 330mの24m区間）を対象に坑内弾性波探査を行い、地山の弾性波速度を測定した。ここでは、データ数は少ないが、これらの結果

表-2 総あたり法による寄与率

説明変数の数	説明変数				寄与率(自由度調整済)	
	単位掘削体積あたりの消費電力量	カットヘッドの押付け力	ブーム振動の平均振幅	実掘削能率	Tトンネル	Yトンネル
4	○	○	○	○	0.71	0.59
3	○	○	○		0.69	0.58
3		○	○	○	0.71	0.56
3	○		○	○	0.70	0.58
2	○	○			0.33	0.22
2		○	○		0.69	0.56
2			○	○	0.70	0.56
2	○		○		0.69	0.57
2	○			○	0.15	0.21
2		○		○	0.32	0.20
1	○				0.08	0.20
1		○			0.31	0.00
1			○		0.68	0.56
1				○	0.01	0.19

も検証材料にして、本システムの性能を調べた。すなわち、目的変数を一軸圧縮強度および弾性波速度とし、説明変数を式(1)の回帰式で用いた4種類の機械データとして重回帰分析を行った。一軸圧縮強度の予測値と実測値の相関関係を図-7に示す。回帰式の寄与率は0.89と大きく、強い相関関係が認められた。

一方、坑内弾性波探査による弾性波速度は、健全区間が2.8～3.8 km/s、脆弱区間が1.8～3.0 km/sである。弾性波速度を測定した測点と同じ切羽位置における機械データを用いて、同様な重回帰分析を行った。弾性波速度の予測値と実測値の相関関係を図-8に示す。回帰式の寄与率は0.87と大きく、一軸圧縮強度の場合と同様に強い相関関係が認められた。

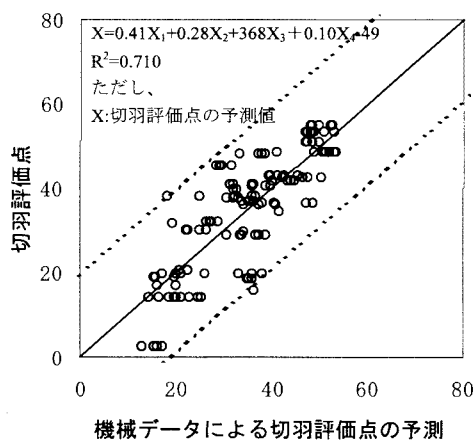


図-3 Tトンネルにおける切羽評価点の予測値と実績値の関係

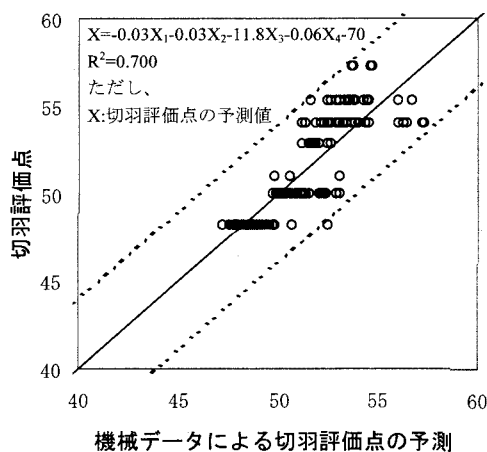


図-4 Mトンネルにおける切羽評価点の予測値と実績値の関係

データ数は少ないが、機械データを説明変数に用いた点載荷試験や弾性波探査の回帰式の寄与率は、切羽評価点の寄与率よりも大きく、データのばらつきが少ない。これは、一軸圧縮強度や弾性波速度の結果が地山物性を反映した客観的なデータであるのに対して、切羽評価点には観察を行う技術者の個人差が入り込んでいる可能性を示している。したがって、切羽の地山状態の評価には、機械データ等の客観的な情報を積極的に活用することが有効であると言える。

4. まとめ

本研究では、自由断面掘削機の機械データから、切羽一進行ごとに切羽評価点を自動的に推定できる地山評価システムを開発した。このシステムを3ヶ所のトンネルに試行し、実務適用可能な性能であることを確認した。さらに、点載荷試験や坑内弾性波探査の結果と本システムによる一軸圧縮強度や弾性波速度の推定値も比較し、本システムから地山物性を推定できる可能性を指摘した。以下に得られた知

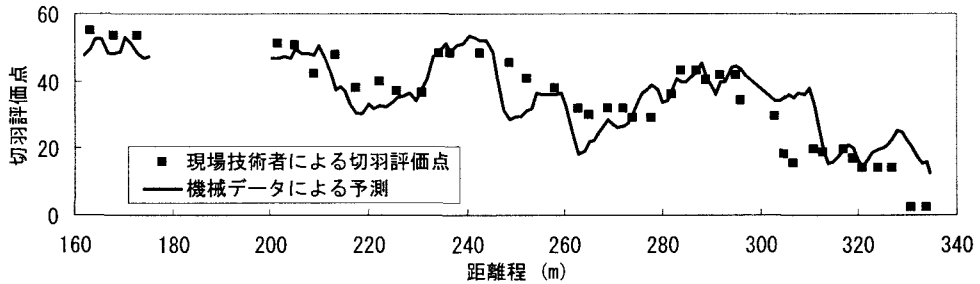


図-5 Tトンネルにおける切羽評価点の予測値と実績値の比較

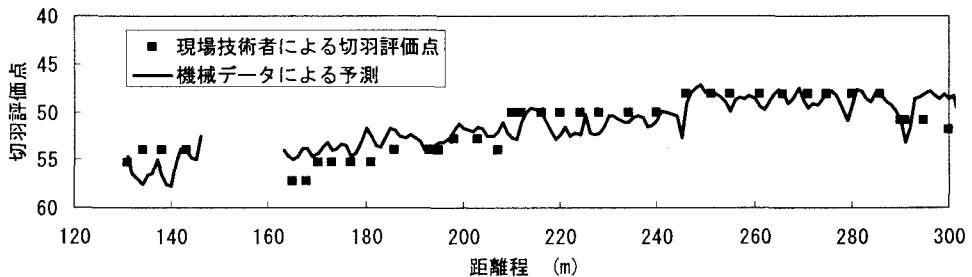


図-6 Mトンネルにおける切羽評価点の予測値と実績値の比較

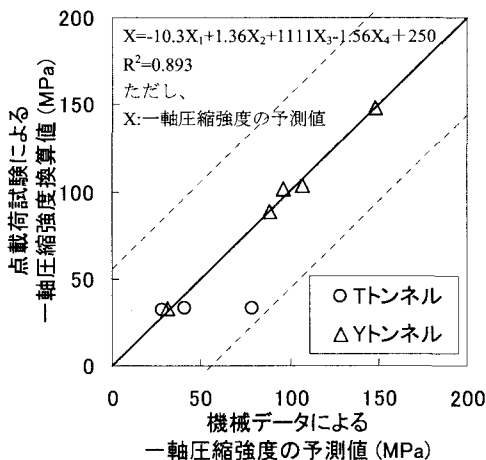


図-7 一軸圧縮強度の予測値と実績値の関係

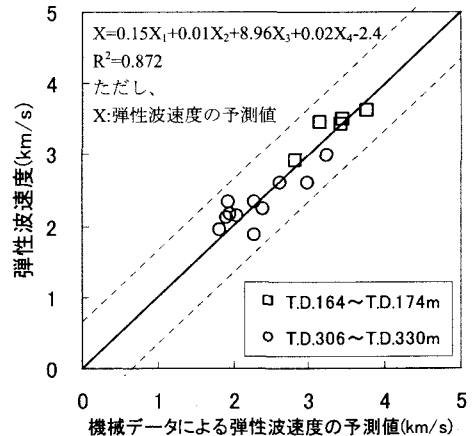


図-8 弾性波速度の予測値と実績値の関係

見を要約し、まとめとする。

- 1) 切羽評価点の予測に際して、説明変数として入力する機械データは、カッターヘッドの押付け力、単位掘削体積あたりの消費電力量、ブーム振動の平均振幅および実掘削能率の4種類が適当である。
- 2) 切羽一進行ごとの切羽評価点は、これら4種類の機械データの線形和として推定できること、また、システムの推定性能が実務に適用できるレベルにあることを、3ヶ所のトンネル現場での検証から確認した。
- 3) 点载荷試験による一軸圧縮強度や坑内弾性波探査による弾性波速度も、機械データを用いて本システムから推定できることを示し、その性能が切羽評価点を推定する場合を上回る可能性を指摘した。
- 4) 現場技術者が採点した切羽評価点には個人差や判定誤差が入り込む余地があるため、客観的な機械データを用いる本システムの適用が有効であることを指摘した。
- 5) 自由断面掘削機の構造が異なる場合には、それまでの相関係数を使えない。そのため、工事の初期段階に収録した機械データから相関係数を求めてシステムの運用を開始し、その後は適宜に相関係数と推定精度をチェックする必要がある。

参考文献

- 1) 塚本耕治, 蛭子清二, 栗本雅祐, 栗田猛志, 石原基嗣, 中川浩二: 自由断面掘削機の機械データを用いた地山評価法の基礎的研究, 第11回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, CD-ROM, H02, 2002.
- 2) 北川博通: トンネルの計画・設計, 土木施工, pp. 14-19, 43巻, 12号, 山海堂, 2002.
- 3) 福井勝則, 大久保誠介: TBMの掘削抵抗を利用した岩盤物性の把握, トンネルと地下, Vol.28, No.2, pp.123-131, 1997.
- 4) 中山隆義, 溜渕孝治, 篠原茂, 安井義則, 進士正人, 中川浩二: 合理的なTBM掘削を目的としたリアルタイム地山評価システムの開発と適用結果, 土木学会論文集, No.742/VI-60, pp.75-86, 2003.
- 5) 三谷哲: ロードヘッダーの施工性評価基準案, 熊谷技報, 45, pp.224-232, 2000.

ROCK MASS ESTIMATION SYSTEM BY ROADHEADER CUTTING DATA

Koji TSUKAMOTO, Seiji EBISU and Koji NAKAGAWA

We report a new rock mass classification system by measuring cutting data of a roadheader during excavation. As a result of having compared the score of rock mass evaluation estimated by measuring cutting data with by an expert, those score showed comparatively good agreement. In addition, we proved that it could estimate a uniaxial compressive strength estimated by point load test and a seismic velocity by the tunnel seismic exploration of rock mass from cutting data.