

# 削孔検層システムによるトンネル切羽前方の地山予測

## Predicting Geological Conditions Ahead of a Tunnel Face

### Using the Drill Logging System

塚本耕治\* 今泉和俊\*

#### 要 旨

山岳トンネルの施工段階において実施する切羽前方調査の一つに、油圧削岩機の油圧や削孔速度などの削孔データを用いて、削孔区間の地山状況を予測する削孔検層法がある。トンネル切羽前方の地質変化をリアルタイムに評価できる削孔検層システムを開発し、多くのトンネル現場に適用している。このシステムでは、単位掘削体積あたりの削孔に要したエネルギー量を用いて地山の状態を評価している。開発した削孔検層システムを適用することにより、地山の硬軟の程度や硬岩地山における亀裂分布などを精度よく予測できることを確認した。

キーワード：トンネル、削孔エネルギー、地山評価

#### 1. まえがき

山岳トンネルにおいては、技術的、経済的な理由によりトンネルルートを選定段階や設計・施工の計画段階時に十分な地質調査を実施することが難しく、施工中に予期せぬ地山変状に遭遇することがある。山岳トンネルを安全かつ経済的に施工するためには、切羽前方の地質変化、地山の硬軟、亀裂発達状況、破碎帯の有無、風化状況、帯水状況など（以下、地山状況とする）を事前に把握することが重要であり、それらの探査結果を用いて補助工法の検討や掘削後の変状などの予測に適用する。

山岳トンネルの施工段階に行う切羽前方探査の一つとして、油圧削岩機の油圧や削孔速度などの削孔データを計測、解析し、削孔区間の地山状況を予測する削孔検層法がある。

一般的な削孔検層法では、サンプリング周波数が 1Hz 程度であり、削孔速度が大きくなる脆弱な地山の硬軟の程度を精度よく把握することが困難である。このことから、2kHz のサンプリング周波数を用いて、切羽前方の地質変化をリアルタイムに評価できる削孔検層システムを開発し、多くのトンネル現場に適用してきた。

ここでは、開発した高周波サンプリング削孔検層システムの概要、および亀裂の存在により削孔エネルギーが敏感に反応した事例、切羽前方の脆弱な地山位置を予測して補助工法を適用することで切羽崩落の危険を回避した事例について報告する。

#### 2. 削孔検層システムの概要

##### 2.1 システムの構成

本システムの計測機器は表 1 のように油圧削岩機（ドリルジャンボ）に設置する油圧センサーや油量センサーなどの各種センサー、および削孔検層時の計測データを AD 変換する AD 変換器、計測結果を表示、記録する計測パソコン、およびそれらを接続するケーブルからなる。

##### 2.2 油圧削岩機の構成と削孔データ計測

油圧削岩機は、図 1 のようにドリフターの打撃力をシャンクロッドに加えるピストン、ロッドに回転力と推力（フィード圧）を加えるシャンクロッド、打撃力と回転力を前方に伝達するロッド、ロッドとロッドを連結して力を伝達するスリーブ、岩盤を直接打撃して破碎するビットなどからなる。

油圧削岩機の油圧回路に設置した油圧センサーを用いて削孔時の打撃圧、回転圧、フィード圧を計測する。また、フィードシリンダに流入する油量を流量計を用いて計測し、流量計が発するパルス信号から削孔長を求める。流量計が発する最大パルス数は約 1000 パルス/秒であることから、計測のサンプリング周波数を 2kHz にした。削孔データの計測処理方法を図 2 に示す。計測を開始すると、各センサーの信号を AD 変換してバッファに取り込む。バッファの削孔データをパソコンのハードディスクに記録すると同時に削孔データから地山評価の計算処理を逐次行い、削孔深度方向 1~5cm 区間ごとに打撃圧、回転圧、フィード圧、削孔速度、および削孔エネルギーの平均値を計算し、パソコン画面上にリアルタイム

\* 技術研究所

表－1 計測機器の主な仕様

計測機器名	主な仕様	
油量センサー	流量範囲	0～80 l /min
	入力電圧	12VDC
	出力電圧	12VDC (パルス)
	最大圧力	30MPa
油圧センサー	圧力範囲	0～20MPa
	出力電圧	1～5VDC
AD 変換器	入力チャンネル数	8
	分解能	12 ビット
	入力電圧	0～10VDC
	最大サンプリング周波数	1MHz
計測パソコン	OS	WindowsXp
	CPU	Pen-900MHz 以上

に表示する。削孔検層時には、長さが約 3m のロッドを 10～15 本繋ぐことにより切羽前方 30～45m を削孔する。なお、ロッドを繋ぐ際の削岩機の動作が削孔検層の結果に影響を与えないように、計測担当者は計測パソコンから計測の中断、および再開の操作を行う。

2.3 地山評価方法

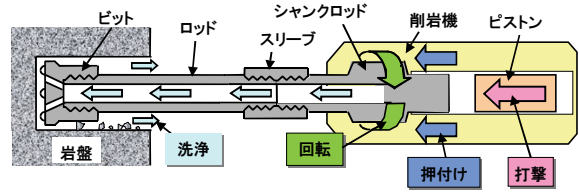
削孔データのうち打撃圧やフィード圧が高くなると削孔速度が速くなる。また、削孔長が長くなるとロッドと孔壁の摩擦が大きくなり削孔速度が遅くなる。そのため、地山状態の評価では、打撃圧、フィード圧、削孔長が削孔速度に与える影響を考慮して、単位掘削体積あたりの削孔エネルギー  $E_d$  に削孔エネルギー補正係数  $C$  を乗じた式(1)の削孔エネルギー  $E_v$  を用いる。

$$E_v = CE_d = C \left( \frac{E_k N}{aV} \right) \tag{1}$$

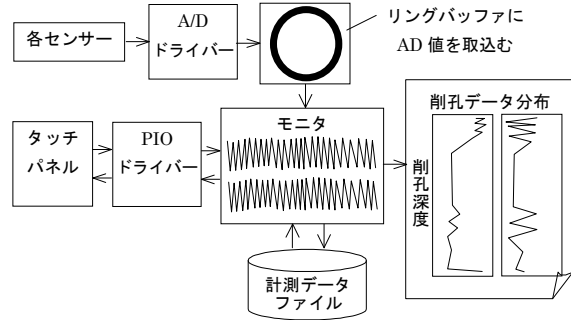
ただし、

- $E_d$ : 削孔エネルギー (J/cm<sup>3</sup>)
- $C$ : 打撃エネルギー補正係数 (=  $C_P C_F C_L$ )
- $C_P$ : 打撃圧による補正係数 (=  $P/17.2$ )
- $C_F$ : フィード圧による補正係数 (=  $(6.0/F)^{0.5}$ )
- $C_L$ : 削孔長による補正係数  
(=  $1/(0.004 L^2 + 0.0075 L + 0.9921)$ )
- $E_k$ : 一打撃あたりの打撃エネルギー (J)
- $N$ : 打撃数 (回/s)
- $V$ : 削孔速度 (cm/s)
- $a$ : 削孔断面積 (cm<sup>2</sup>)
- $P$ : 打撃圧 (MPa)
- $F$ : フィード圧 (MPa)
- $L$ : 削孔長 (m)

削孔時に油圧削岩機内のシャンクロッドを打撃するピストンの移動により、打撃圧には図－3に示す打撃に依



図－1 油圧削岩機の構成



図－2 削孔データの計測処理方法

じて周期的に繰り返す脈動が発生する。削孔エネルギーの計算に用いる打撃数  $N$  は 1 秒ごとの打撃圧波形からオフセット成分を除去した脈動波形をフーリエ変換した図－4に示すフーリエスペクトルを逐次計算し、その卓越振動数から求めた。

サンプリング周波数 1Hz で計測する従来のシステムによる結果と比較するため、本システムを用いて計測したサンプリング周波数 2kHz の削孔データを 1Hz で再サンプリングし、削孔長と削孔速度の関係から両システムを比較する。なお、従来のシステムの削孔速度は 1 秒間の削孔深度から求め、本システムの削孔速度は削孔深度 5mm に要した時間から求める。

削孔長と削孔速度の関係を図－5に示す。サンプリング周波数が 1Hz の場合には、削孔長 1.5cm 付近の削孔速度が -0.105cm/s になり、削孔エネルギーが負の値になる。これは岩盤とビットの間に削孔した岩片が入り、実際の削孔長より短く計測したことが原因と考えられ、前後の削孔データを補間して削孔速度を正の値に修正する必要がある。また、削孔深度方向の計測間隔は、削孔速度が遅い場合に 0.21cm、削孔速度が速い場合に 1.37cm であり、削孔速度により削孔データの深度間隔にばらつきが生じる。したがって、詳細な削孔データを収集したい軟質化した地山では、削孔速度が速くなるため、細かい深度間隔の削孔データを計測できない。

これに対し、サンプリング周波数 2kHz で計測する本システムでは、指定した深度間隔ごとに削孔エネルギーの平均値を求めており、削孔エネルギーが負の値になることがなく、従来の計測システムに比べて精度の高い計測が可能である。

### 3. 適用事例

高周波サンプリング削孔検層システムの適用事例として、岩質が異なる2ヶ所のトンネルに適用した結果について報告する。

#### 3.1 Aトンネル

削孔検層を実施した地山は花崗閃緑岩 ( $q_u=90\sim 120\text{MPa}$ )が主体であり、事前調査による当初の支保パターンはC Iであった。トンネル切羽の左側から削孔長20mの削孔検層を行った。また、削孔検層の結果と実際の地山状況を比較検証するため、削孔検層後のボーリング孔に CCD カメラを挿入し、孔壁の状態を撮影した。削孔深度16~18m範囲における孔壁の展開画像と削孔エネルギーを対比した結果を図-6に示す。削孔エネルギーは概ね  $400\sim 800\text{J}/\text{cm}^3$ の範囲にあるが、亀裂1および亀裂2が存在する深度では  $200\sim 300\text{J}/\text{cm}^3$ 程度になる。これは、亀裂の存在によって岩盤を破碎しやすくなり、削孔エネルギーが小さくなったものと考えられる。

このように、硬岩地山において削孔検層の削孔エネルギーから亀裂位置や数などの情報を得ることができる。

#### 3.2 Bトンネル

削孔検層を行ったトンネル切羽の地山は泥質片岩が主体であり、事前調査による支保パターンはD IIとされていたが、実際はD Iであった。トンネル切羽の左右2ヶ所から削孔長42mの削孔検層を行った。削孔検層による削孔エネルギーと施工中に観察した実際の地山状況を対比した結果を図-7に示す。右側の削孔エネルギーのピークは、削孔深度5m付近が  $400\text{J}/\text{cm}^3$ 程度から  $200\text{J}/\text{cm}^3$ 程度、14.5m付近が  $200\text{J}/\text{cm}^3$ 程度から  $400\text{J}/\text{cm}^3$ 程度になる。また、27.5m付近では  $400\text{J}/\text{cm}^3$ 程度から  $800\text{J}/\text{cm}^3$ 程度になり、実際の地山状態も硬質であった。また、左側の削孔検層についても削孔エネルギーの大きさと地山状態の関係は同様の結果になった。削孔深度5~17.5mの範囲は、削孔エネルギーが概ね  $100\sim 300\text{J}/\text{cm}^3$ であり、D IIの地山等級に相当する脆弱な地山が当初の予測位置より切羽前方側8m程度の位置に出現すると予測した。切羽崩落の危険性があることから一旦掘削作業を中断し、鏡吹付け、長さ4mのGRP (Glassfiber Reinforced Plastic、ガラス繊維強化プラスチック) ボルトによる注入式フォアポーリング等の補助工法を実施した。この対策により切羽天端部の地山を安定した状態で掘削が可能になり、切羽崩落の危険を回避してD II区間を施工した。

当該のトンネルで実施した7回分の削孔検層から求めた削孔エネルギーを1m区間ごとに平均した値と切羽評価点をトンネルの距離程で比較した結果を図-8に示す。切羽評価点は、トンネル切羽の地山状況の観察記録から地山の圧縮強度、風化変質の度合い、割れ目間隔、割れ目状態、湧水等の各項目を点数化し、支保を選定する際

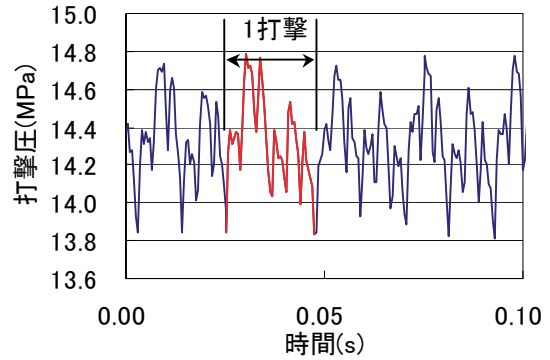


図-3 打撃圧の時刻歴波形

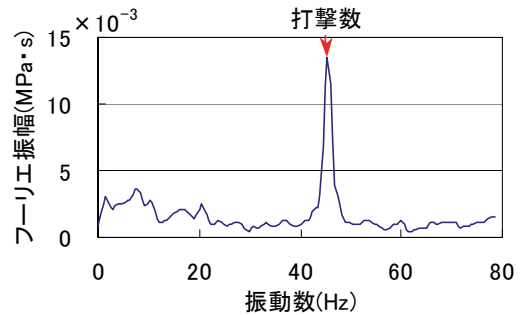


図-4 打撃圧のフーリエスペクトル

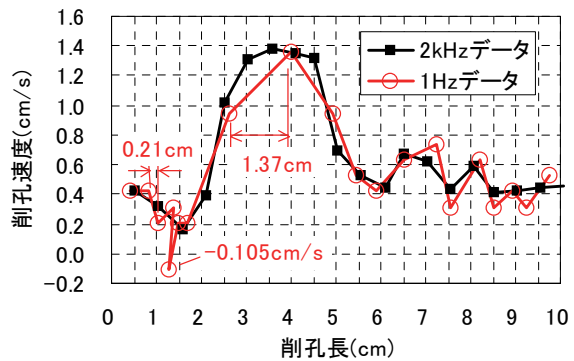


図-5 削孔長と削孔速度の関係

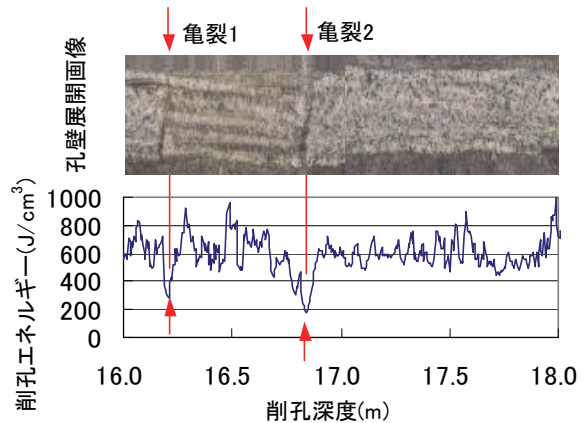


図-6 削孔エネルギーと亀裂の関係

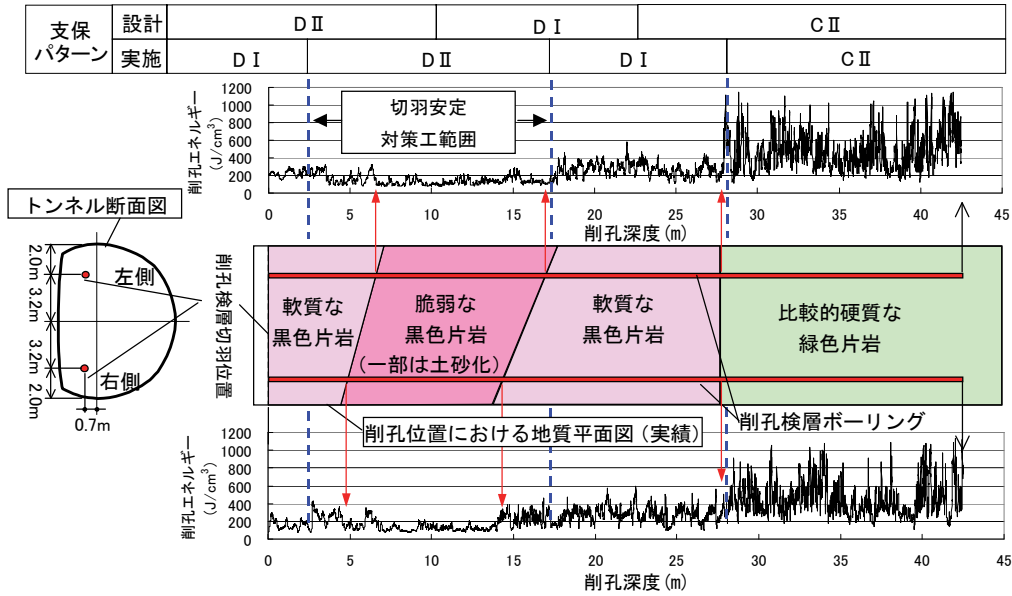


図-7 削孔エネルギーと実際の地山状況の対比 (Bトンネル)

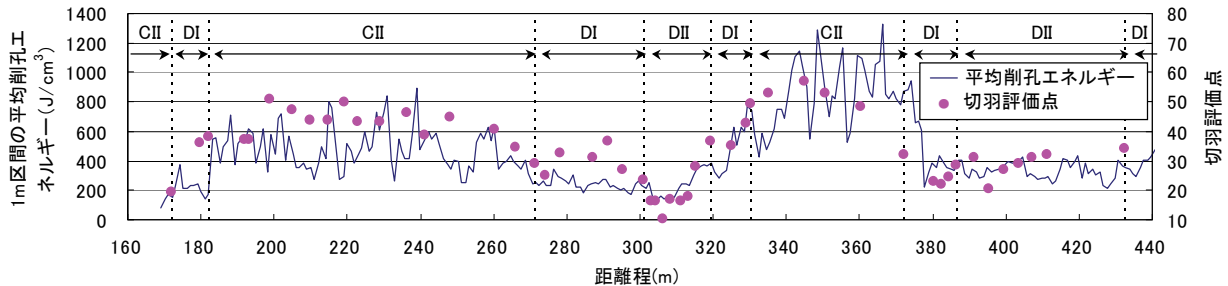


図-8 平均削孔エネルギーと切羽評価点の推移 (Bトンネル)

の指標として利用される。その値が小さいほど脆弱な地山と評価され、地山等級が低く判定される。距離程 260m 付近から削孔エネルギーが小さくなると切羽評価点も小さくなり、距離程 310m 付近から削孔エネルギーが大きくなると切羽評価点も大きくなっており、両者の傾向はよく一致している。1m 区間ごとに平均した削孔エネルギーと切羽評価点の関係を支保パターンごとに分けて整理した結果を図-9に示す。このトンネルの支保パターンと削孔エネルギーの関係は、概ねDIIの場合が 100~400J/cm<sup>3</sup>、D Iの場合が 200~500J/cm<sup>3</sup>、C IIの場合が 300~1000J/cm<sup>3</sup>の範囲にある。

以上から、削孔検層により求めた削孔エネルギーが切羽評価点と相関があること、支保パターンと対応がよいことがわかった。したがって、削孔検層システムの適用により切羽前方の削孔エネルギー変化の詳細を把握し、地山性状に適合した支保パターンを選定することにより、工事の安全性と経済性を確保したトンネルを構築できる。

#### 4. あとがき

トンネル切羽前方の地山調査に削孔検層システムを適用し、得られた切羽前方の削孔エネルギーから硬岩地山

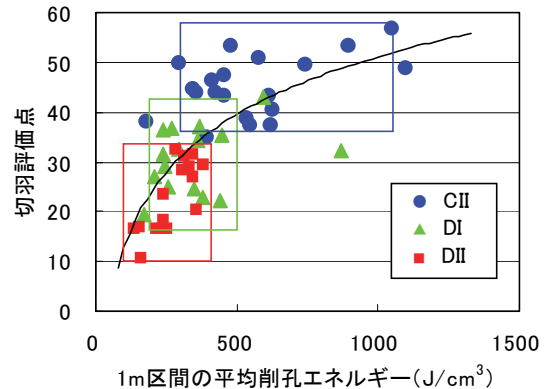


図-9 平均削孔エネルギーと切羽評価点の関係

における亀裂の分布や地山の硬軟の程度などを精度よく予測できることを確認した。今後、削孔検層システムから得られた削孔データの蓄積と分析により、さらに予測精度を高めたいと考えている。

#### 【参考文献】

- 「トンネル工事用機械ハンドブック上巻」、(社)日本トンネル技術協会、P8、1978