

削孔検層システムを用いたトンネル全長にわたる地山評価

Tunnel Rock Mass Evaluation that uses Drill-Logging System

山田文孝¹・山本信幸²・山下高俊³・山地宏志⁴

Fumitaka Yamada, Nobuyuki Yamamoto, Takatoshi Yamashita and Hiroshi Yamachi

¹正会員 工博 三井住友建設株式会社 土木技術部 (〒164-0011 東京都中野区中央1-38-1)

E-mail:FumitakaYamada@smcon.co.jp

²非会員 三井住友建設株式会社 土木技術部 (〒164-0011 東京都中野区中央1-38-1)

³非会員 三井住友建設株式会社 機電部 (〒164-0011 東京都中野区中央1-38-1)

²正会員 工博 三井住友建設株式会社 技術研究所 (〒270-0132 千葉県流山市駒木518-1)

The Drill-Logging System that recorded and analyzed all the hydraulic data of the hydraulic drill used for the tunnel construction was developed. Evaluating the rock mass properties around the tunnel in total by using the data of the rockbolt hole and the blasting hole in addition to the fore survey hole and feeding back to the design and construction become possible. This time, rock mass evaluation was executed to the road tunnel construction of the extension about 1km. This paper describes the outline of this system and the results of application to the real construction site.

Key Words : tunnel, hydraulic rock drill, drill- logging system, geological survey, support pattern

1. はじめに

近年、土木分野における情報化施工技術の発展は目覚しく、施工の自動化、省力化に大きな成果を挙げている¹⁾。

山岳トンネル工事においては、昭和50年代のNATM導入にともない切羽観察や変位・応力計測結果を実施設計にフィードバックさせる手法が一般化され、大きな意味での情報化施工は既に標準的な施工法となっていると言ってよい²⁾。ところが近年の自動化・省力化を旨とした情報化施工技術は他工種と比較して導入が遅れている。これは、山岳トンネル工事では刻々と変化する地山性状に臨機応変に対応することが求められること、複雑な地質状況を定量的に評価することが困難なこと、実際に地山に触れた技術者の総合的な判断が重要視されること、などが原因であると考えられる。

NATMの導入以来、山岳トンネルにおける合理化の主眼は地山性状を迅速かつ的確に評価し合理的な支保構造を適用することにある。従来この評価・判断は技術者の勘と経験に負うところが大きかったが、近年の情報化施工技術の発展により、より多くの客観的な判断材料が提供されるようになってきた。た

えば自動計測技術、弾性波による切羽前方探査技術³⁾などはいずれもこの目的に沿ったものである。

さて、このような情報化施工技術の一環として開発され一部で実用化されているものに削孔検層（穿孔探査・削孔探査とも呼ばれる）がある^{4)~10)}。この技術は山岳トンネル施工に不可欠な油圧削岩機の作動状況から地質性状を推定するもので、切羽前方地山を確認するために実施する切羽前方探査に利用されている。

一方、油圧削岩機はロックボルト孔や発破孔の削孔に日常的に利用されており、これらの削孔データを切羽前方探査と同じように記録・解析することができれば、トンネル周辺の地山性状を評価するための判断材料を提供することができる。さらに切羽前方探査と組み合わせることで、切羽周辺の地山性状をトータルに評価して設計・施工にフィードバックすることが可能となる。

筆者らは、あらゆる削孔データを用いて切羽前方を含めたトンネル周辺地山性状の評価が可能な削孔検層システムを開発した。また当該システムを実トンネル施工に本格的に導入してシステムの実用性と信頼性を検証した。

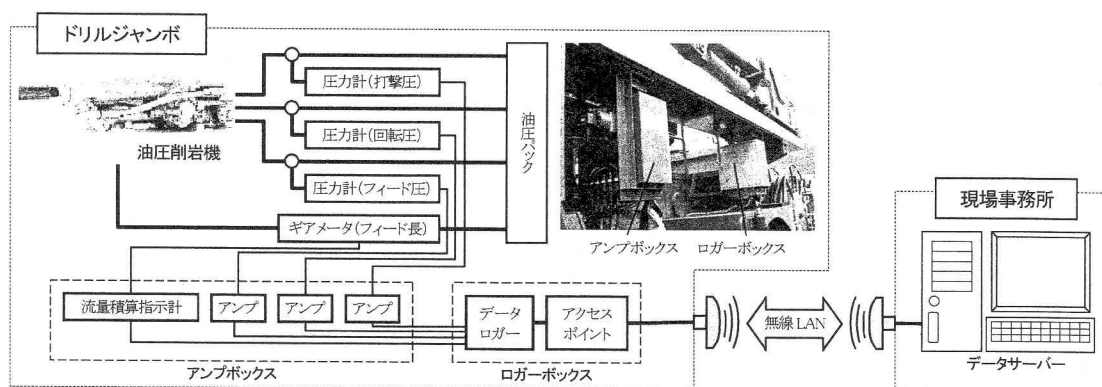


図-1 削孔検層システム概要図

2. 削孔検層システム

(1) 削孔検層システムの特徴

従来の削孔検層は、山岳トンネルでは切羽前方探查の際に削孔データを採取、地山性状評価を行なうものであった。これに対し今回開発した削孔検層システムは、切羽前方探查時の削孔データに加え、ロックボルト孔や発破孔といった施工サイクルに組み込まれた削孔のデータ（以下日常削孔データと呼ぶ）も利用することを意図した。

日常削孔データを採取・解析することで以下のような評価が可能となる。

- ① ロックボルト孔削孔データの空間分布を示すことでトンネル壁面近傍地山の性状を評価し、切羽観察と合わせて地質をより広範に把握できる。またゆるみ領域を特定できる可能性があり、支保構造の妥当性検証に利用できる。
- ② 日常削孔データのトンネル縦断方向分布を示し支保パターンと比較することで、既施工区間の支保の妥当性を検証できる。また変状などの問題が生じた場合、切羽観察・計測結果などとともに原因究明の基礎資料となる。
- ③ 上記の既施工区間縦断方向分布と切羽前方探查結果を比較することで、支保パターンと直結する定量的な地山性状の予測が可能となる。

このように、日常削孔データを利用することによる利点は非常に大きいものの、データ量が膨大であることから効率的なデータ処理が必須となる。そのためデータ採取から表示までを可能なかぎり自動化したシステムを開発した。

今回開発した削孔検層システムの概要を図-1に示す。システムはドリルジャンボ搭載部分およびデータサーバーに分かれる。両者を無線LANで結ぶことで、データ採取を自動化している。

(2) 削孔データの採取機構

当該システムでは、油圧削岩機の打撃圧・回転圧・フィード圧の各油圧を圧力センサーにより測定する。また削孔長を求めるためにフィードシリンダー中を流れる作動油の流量を常にモニターし、ガイドシェルとドリフタ間の相対位置を決定する。削孔中はフィードの前後運動が生じるため、両方向の流量が測定できる機器を選定している。

測定データはドリルジャンボに搭載したデータロガーにより記録する。128MBメモリーカードにより、通常作業で約一週間分のデータを記録できる。

データ記録開始/停止操作を人間の手に委ねることは切羽作業の煩雑化を招き、オペレータの注意力を損なううえ、データ取り忘れなどの不具合が生じる恐れがある。そこで搭載油圧モーターのオン/オフと連動する完全自動型のデータ採取機構を構築した。

データロガーに記録された測定データは、現場内に構築した無線LAN網を通じて現場事務所内のデータサーバーに転送されるシステムとした。これにより切羽近傍のドリルジャンボ上でのメモリーカード交換という危険作業を省略することができる。現場内無線LAN網は既設のものを利用できる。

(3) 削孔データの処理方法

a) 評価指標

旧来の油圧削岩機による前方探查（さぐり削孔）では削孔速度、スライムの状態およびオペレータの感触により地山性状を判断することが多かった。しかしこの場合、油圧削岩機の設定やオペレータの技量によって結果が左右され、客観的な評価とは必ずしも言えない面があった。この欠点を補うために開発された削孔検層では、削孔エネルギーという評価指標が導入された。削孔エネルギーとは一定体積の岩盤を破碎するために要した油圧エネルギーである。

また一部の油圧削岩機では、打撃時の反力が削岩機に悪影響を及ぼさないようにダンパーの役割を持つ油圧シリンダーにより反力を吸収する機構を持つものがある。このときの反力（ダンピング圧）を地山性状の評価に利用する試みもなされている⁵⁾。

今回は主に削孔エネルギーを地山性状の評価指標とし、削孔速度を参考とした。また岩盤の破碎状況や粘土化の状態を把握するために、トルク抵抗という指標を新たに導入した。これは削岩機のフィード圧と回転圧の比であり、地層境界や亀裂を評価できる可能性がある。各指標は以下の式により計算した。なお、これらの評価指標と測定された油圧データを合わせて機械量と呼ぶこととする。

$$V_d = \frac{\Delta \ell_d}{\Delta t} \quad (1)$$

$$E_d = \frac{\text{一定削孔長で岩盤に与えた打撃エネルギー}}{\text{一定削孔長で破壊した岩盤の体積}} \quad (2)$$

$$= \frac{a P_s L_s N_d \Delta t}{A \Delta \ell_d} = \frac{a P_s L_s N_d}{A V_d}$$

$$T_d = \frac{\text{回転圧}}{\text{フィード圧}} = \frac{P_r}{P_f} \quad (3)$$

ここに、

- V_d : 削孔速度 (m/min)
- E_d : 削孔エネルギー (MJ/m³)
- T_d : トルク抵抗
- P_s : 打撃圧 (MPa)
- P_r : 回転圧 (MPa)
- P_f : フィード圧 (MPa)
- A : 削孔面積 (m²)
- $\Delta \ell_d$: 削孔長 (m)
- Δt : 単位時間 (min)
- L_s : ピストンストローク (m)
- a : ピストン受圧面積 (m²)
- N_d : 単位時間あたりの打撃数 (回/min)

b) 地山の不均質性と評価指標の影響因子

トンネルが対象とする地山は不均質である場合が多く、切羽観察に基づく評点化などでは、定量化し難いそれらの不均質性がトンネル技術者の知識と経験によって処理されているものと考えられる。削孔検層データを蓄積することで期待されるのは、地山の不均質性を定量的に評価し得ることである。

ところが削孔効率には、フィード圧の操作などを含むオペレータの癖、個々の油圧削岩機が持つ機械的なバラツキ、上向き削孔か下向き削孔かの違い、削孔長の差、ビットの種類などいくつかの因子が影響を及ぼしている。削孔検層で得られる機械量には、

これらの影響がすべて含まれているものと考えなければならない。

これら因子の影響をひとつひとつ分離して補正することが理想的であり、前方探査時のフィード圧補正を行なっている例もある¹¹⁾。しかしながら、現象が非常に複雑であるうえ、不確定要素も多い。そこで今回は、各因子の影響を平均化するために多数のデータを取得し統計的に処理することとした。そのうえで、なお残るバラツキが地山の持つ不均質性を表現しているものと捉える。もちろん、機械量は直接地山の力学特性や地質を評価するパラメータではないが、これらに大きく支配されるため、その統計量は地山の統計量と共通することが考えられる。

c) 機械量の統計処理

当該システムでは、削孔データを10Hzという高頻度で取得し、削孔長5cm毎に平均して一箇所のデータとした。前方探査およびロックボルト孔削孔の場合は各々に空間座標を付与している。これは削孔速度2m/minの削孔であれば、1mの削孔中に取得した300個の生データを15個ごとに平均して20個の平均化データを得るということである。また、たとえば1断面で3mのロックボルト孔を16本、1.1mの発破孔を100本掘削した場合、1断面あたりの平均化データ数はロックボルト孔削孔データ960個、発破孔削孔データ2,200個と膨大な量になる。

これら機械量は断面ごとに正規度数分布をとり、最大値、最小値、平均値、標準偏差、流行値等の基本統計量を求める。この統計量ならびに度数分布の形状そのものを検討することで、断面内に存在する不均質性を評価する。また断面ごとに比較することで、トンネル縦断方向の地山性状の差異を検討する。

さらに機械量の空間分布を描画し統計量と比較検討することで、機械量のバラツキが地山の不均質性を表現しているものか否かを検証することとした。

(4) 削孔データの表示・分析

以下に機械量の表示方法の概要を述べる。当該システムでは以下の三種類の表示手法を用意した。

a) ロックボルト孔削孔データの表示

パソコン上で表示したい断面を指定すると二次元分布および度数分布、統計諸量が表示される。さらに次章に示すように図化処理ソフトウェアにより二次元および三次元のカラーコンターを表示できる¹²⁾。

これまでも大規模地下空洞周辺において機械量の平面分布により地山評価を行なった例はあるが⁴⁾、山岳トンネルにおいて日常的に得られるこれらの図は、ロックボルト孔の削孔状況を画面上で再現した

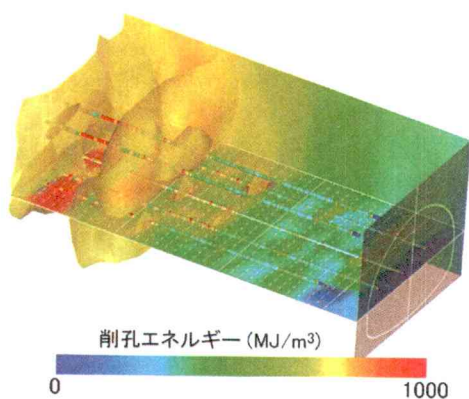


図-2 前方探査結果三次元立体表示例

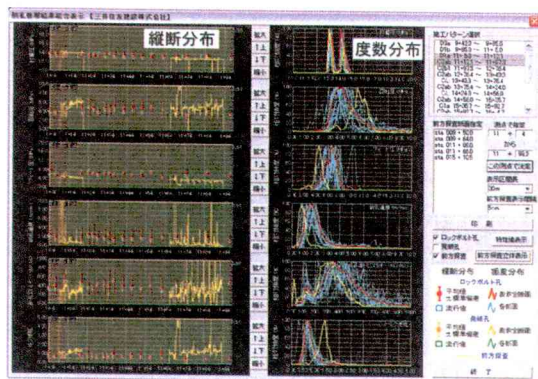


図-3 機械量の縦断方向比較・分析画面例

ものと考えることができ、切羽において各人が行なう観察を機械量の分布によって代替しようとするものである。

b) 前方探査データの三次元立体表示

油圧削岩機による切羽前方探査結果は機械量をグラフ表示することが一般的であるが、当該システムでは図-2のように三次元の立体図として表示可能とした。複数孔で前方探査を実施することで地質構造を視覚的に評価できる。

c) 機械量の縦断方向比較・分析

図-3の画面左側には、横軸に距離程をとり日常削孔データおよび前方探査データを、実施支保パターンとともに表示した。日常削孔データはロックボルト孔・発破孔別に各断面の平均値・標準偏差・流行値を、前方探査データはグラフとして表示した。画面右側には表示範囲に含まれる各断面の度数分布を示した。表示範囲は自由に設定可能である。

これにより、実施支保パターンと機械量の関係が明瞭になり、既施工区間の支保パターンの妥当性を検証できる。また日常削孔データと前方探査データを容易に比較することができ、支保パターンも含めて直感的な前方予測が可能となる。

表-1 削孔検層システム試験導入工事一覧

トンネル	年	実施内容	適用区間
A	2000	切羽前方探査適用性検討 (深成岩)	1切羽 (30m×5本)
B	2000	切羽前方探査適用性検討 (火山砕屑岩)	400m (2~6m/回)
C	2000	ゆるみ領域評価への適用性検討	5m (6断面)
D	2002	支保パターン選定支援適用性検討 ゆるみ領域評価への適用性検討	200m+300m, B計測断面
E	2004	長尺鋼管フォアパイリングの有効性検討へ適用	200m (177ト12.5m)

3. 実現場への導入

(1) これまでの実績

これまで当該システムを表-1に示す山岳トンネル工事に試験的に導入し、現場で実際に稼働している油圧削岩機への適用性と機械量による地山評価手法の妥当性を検証してきた。詳細は文献^{13)~15)}に譲るが、いずれの工事においても所期の目標を達成し、当該システムが山岳トンネル工事に十分適用可能であることが確認できた。

(2) 対象トンネルの概要

これまでの成果を踏まえた形で、今回延長1,085mの東九州自動車道津久見トンネル工事において当該システムを掘削当初から導入し、全線にわたって削孔検層による地山評価を実施した。

地質は秩父帯の付加体¹⁶⁾であり、砂岩・粘板岩・チャート・石灰岩から構成される。トンネル前半は数m~十数m大のチャート・砂岩・石灰岩ブロックを含む混在岩¹⁶⁾、中央部は石灰岩、後半は砂岩頁岩互層が主体であった。なお、トンネル坑口付近において大規模な断層破砕帯に遭遇した。

(3) 導入システムの概要

当該トンネルでは、硬岩対応の3ブームドリルジャンボを使用した。データ採取はこのうち左右の2ブームを対象とした。ロックボルト孔削孔は左右の油圧削岩機を用いて削孔する範囲が広いので、2ブーム対応とすることで主要な削孔データの大部分を取得することができると判断した。

取得したデータは現場内に構築した無線LAN網を通じ切羽から事務所まで転送した。スライドセンタや現場一事務所間で無線を中継する必要が生じたが、工事全期間を通じて良好な通信環境を維持することができた。

また施工中、機器の故障によるトラブルは皆無であり、継続してデータを採取することができた。

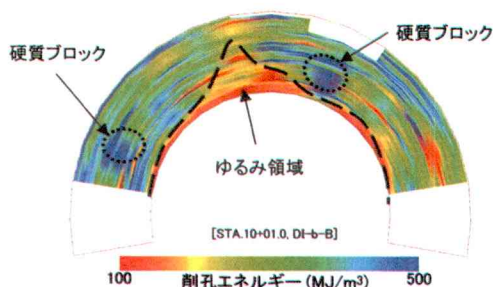


図-4 ロックボルト孔削孔データ断面コンター(単一断面)

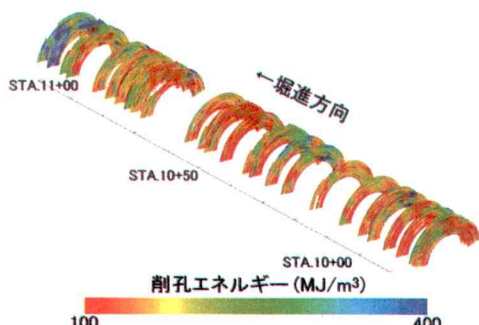


図-5 ロックボルト孔削孔データ断面コンター(複数断面)

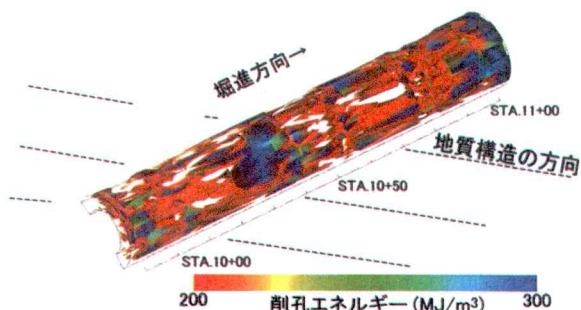


図-6 ロックボルト孔削孔データ三次元コンター

(4) ロックボルト孔削孔データによる周辺地山評価

以下に示すように、ロックボルト孔削孔データの空間分布を示すことで、トンネル付近の地山状況を視覚的にわかりやすく表現することができた。

図-4にSTA.11+1.0断面におけるロックボルト孔削孔データ(削孔エネルギー)の断面コンターを示す。支保パターンはDI-b、ロックボルト長は4.0mであり、コンターは坑壁から4mの範囲を示している。坑壁近傍から天端よりやや左の地山内にかけて削孔エネルギーの小さい領域が広がっている。この岩盤強度低下領域は、掘削によるゆるみが生じた領域であると考えられる。4.0mのロックボルトは、最大で2~3mのゆるみ領域を余裕を持って支保している。したがってロックボルト長は適切であったと判断できる。

また天端右肩および左側壁付近には、直径1m~

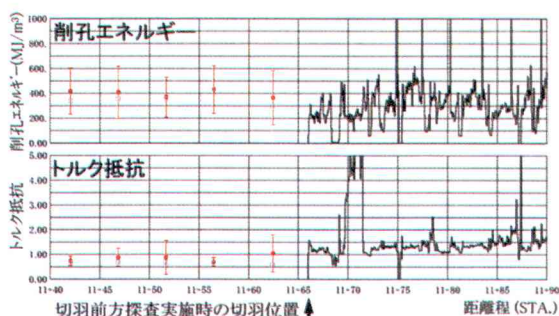


図-7 切羽前方探査の例(1)

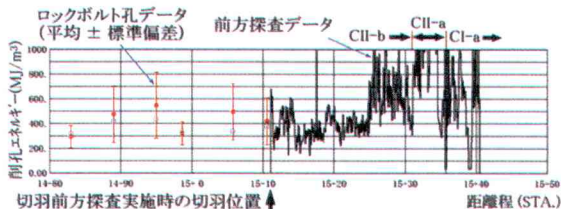


図-8 切羽前方探査の例(2)

2mで局所的に岩盤強度の高い領域が存在する。周辺の地質状況から判断すると、石灰岩または砂岩の硬質ブロックが分布するものと評価できる。

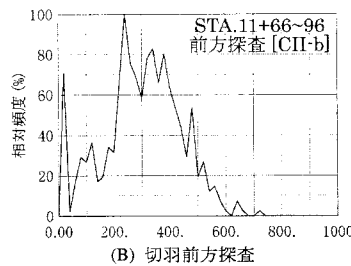
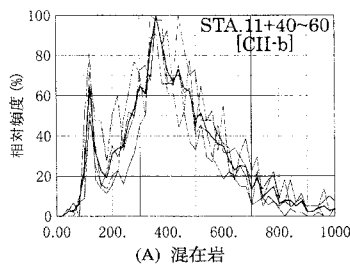
図-5、図-6にトンネル前半の120m区間におけるロックボルト孔削孔データ(削孔エネルギー)空間分布を示す。図-5は断面コンターを重ねた図である。図-6は同区間の三次元コンターであり、200MJ/m³以上の領域のみを示している。

切羽観察によると、STA.11+00付近までは破砕を受けた粘板岩中に砂岩や石灰岩の硬質ブロックが点在する地質状況であり、以降は比較的硬質な砂岩・粘板岩互層であった。支保パターンもSTA.11+00付近まではDI-bであり、その後DI-aパターンを挟んでCIIパターンに移行した。

図を見ると、STA.11+00付近を境に削孔エネルギーの低い区間とそれ以降の高い区間に明瞭に区分できる。また前半においては、STA.10+30~10+40をはじめとして軟質な岩盤中に硬質な部分がブロック状に点在する状況が表現されており、切羽で確認された地質状況が削孔エネルギー分布にも明瞭に示されている。さらに硬質ブロックは掘進方向に向かって左手前から右奥に配列しているように見える。これは周辺の地層の走向方向と調和的であり、トンネル周辺の大局的な地質構造が示されていると見てよい。

(5) 切羽前方探査

図-7はSTA.11+66において実施した切羽前方探査結果である。削孔エネルギーおよびトルク抵抗を縦断方向にグラフ化している。また図には前方探査結



- ・「前方探索」と明示したもの(B)以外はロックボルト孔削孔データ。
- ・区間内の断面ごとの値を細線で、区間全体の集計値を太線で示した。
- ・[] は実施パターン。

	SC	RB	H	掘進長
CI-a	10cm	3m@1.5m	-	1.5
CII-a	10cm	3m@1.5m	-	1.2
CII-b1	10cm	3m@1.2m	-	1.2
CII-b	10cm	3m@1.5m	125	1.2
DI-b	15cm	4m@1.2m	125	1.2

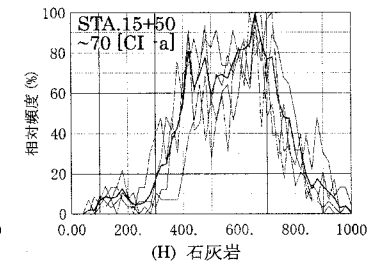
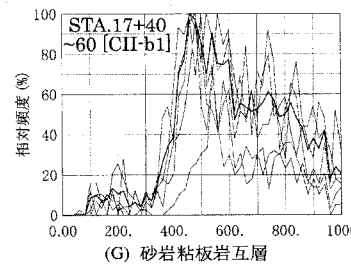
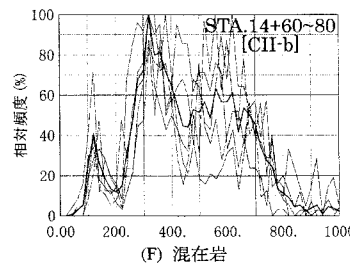
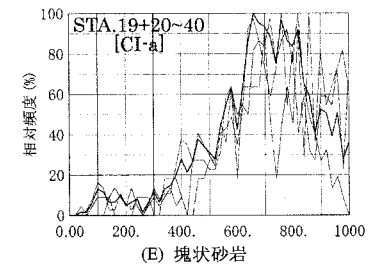
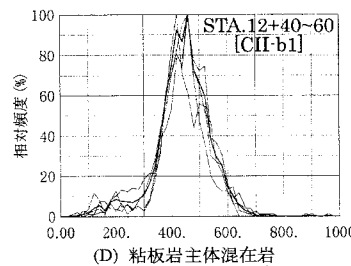
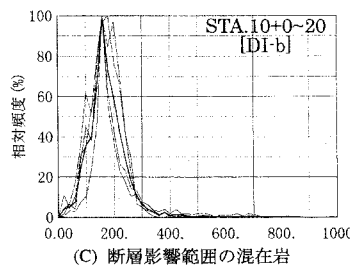


図-9 削孔エネルギー度数分布

果とともに既施工区間のロックボルト孔削孔データも表示し、両者を比較できるようにしている。切羽前方探索の削孔エネルギーが約3mサイクルでリズムカルに変動することから、ブロック状の砂岩と砂岩周辺の破碎を受けた粘板岩が交互に現れる互層を予想した。直近の既施工区間も同様の地質状況であり、また既施工区間の削孔エネルギーもほぼ同レベルの値を示すことから、少なくとも今後25m区間はこれまでとおおむね同じ地質状況が続くものと判断した。実際の切羽地質も予想通りであった。

ただしSTA.11+68~69では削孔エネルギーが極端に小さく、その先3mは大きなトルク抵抗が測定されている。これは1m程度の幅を持つ断層周辺の多亀裂帯と判断し、慎重な施工を行なった。実際の切羽では、脆弱な粘板岩が分布していたものの施工の障害となるような断層破碎帯は認められなかった。

図-8はSTA.15+10.5において実施した切羽前方探索結果である。削孔エネルギー縦断分布のみ示す。STA.15+25付近までは約400MJ/m³の削孔エネルギーで変動が小さい。この値はそれまでの施工区間とほぼ同等の値である。しかしこれ以降削孔エネルギー

が急激に増大し、大きく変動するようになる。この位置で地質が変化すると予想し、CII-bからCI-aへのパターン変更を計画した。実際の切羽状況も予想とほぼ一致したため、CII-a (STA.15+31~)、CI-a (STA.15+36~) へとパターン変更を実施した。

(6) 削孔エネルギー度数分布と地質の関係

図-9に、削孔エネルギー度数分布を示す。(B)以外はロックボルト孔削孔データであり、各々20m区間の複数断面で集計している。

さて(B)の前方探索データは前節図-7で取り上げた切羽前方探索の度数分布である。これを直前の施工区間のロックボルト孔削孔データ(A)と比較すると、その形状が類似していることがわかる。すなわち、大局的には300~400MJ/m³を中心とした正規分布を示すが、100MJ/m³付近に別のピークが存在し両者を重ね合わせた形状を示す。この図からは、約300~400MJ/m³の硬さを持つ岩盤が主体であるが局所的に比較的軟質な部分を挟在する地山状況が推定される。これは前節で述べた地質状況と一致する。

(C)~(E)は単一の正規分布を示す例である。断層

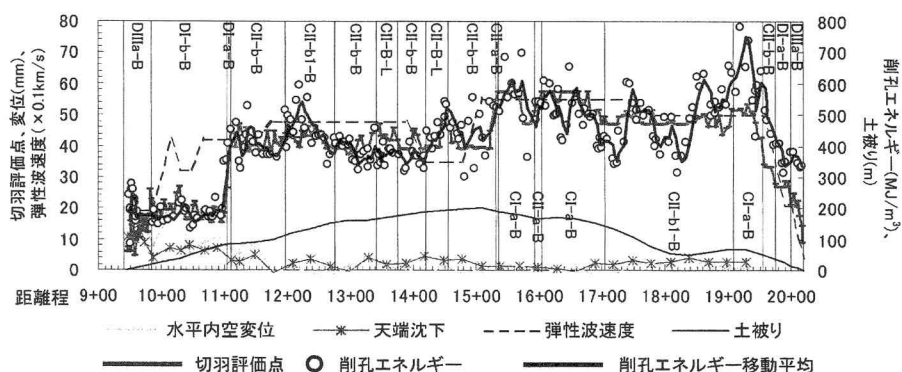


図-10 削孔エネルギーの縦断方向分布

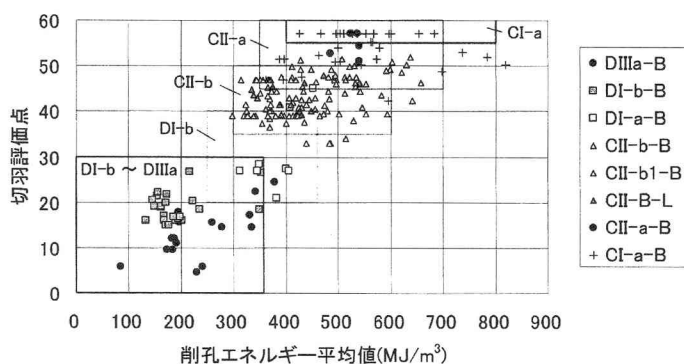


図-11 削孔エネルギーと実施パターンとの関係

の影響下にあり全体が破碎を受けている(C)では、 $100 \sim 200 \text{ MJ/m}^3$ にピークを持ち全体に削孔エネルギーが小さい。混在岩であるが硬質ブロックの分布が少ない(D)では、 400 MJ/m^3 付近にピークがある。硬質な塊状砂岩(E)では、 600 MJ/m^3 以上で不明瞭なピークを示す。それぞれ地質によってピークの位置が異なることから、これら各地質の判別は容易であり、対応する支保パターンも明確である。

一方、硬質ブロックを多数挟在する混在岩(F)や互層(G)では度数分布の形状自体が異なり、ピークが複数存在する。これは地山の不均質性を示す典型的な例であると考えられる。いずれも $100 \sim 200 \text{ MJ/m}^3$ 、 400 MJ/m^3 付近、 600 MJ/m^3 付近にピークを持ち(C)～(E)のピークと一致することを考慮すると、各ピークはそれぞれ破碎を受けた岩盤、堅硬な粘板岩、砂岩やチャートなどの硬質ブロックに対応すると評価できる。したがって $100 \sim 200 \text{ MJ/m}^3$ のピークが明瞭な(F)は硬質ブロック周りの局所的な破碎が進んだ混在岩であるから、抜け落ち防止のために鋼製支保工付きのCII-bパターンが採用され、ピークが不明瞭で局所的な破碎が進んでいない互層(G)では鋼製支保工なしのCII-b1パターンが採用されているものと考えることができる。石灰岩(H)の度数分布からは、石

灰岩自体の強度は不均質であるが全体的に硬質であり破碎部をほとんど含まないと評価できる。

(7) 支保パターンとの対比

津久見トンネルでは全線で削孔検層を実施したことから、縦断方向に連続したデータを得ることができた。図-10に切羽評価点¹⁷⁾と削孔エネルギー平均値の縦断分布を、図-11に両者の関係を示す。当該トンネルでは両者間にきわめて強い相関関係が認められた。また支保パターンとの対応も良好であった。

①STA.11付近までの断層破碎帯影響区間、②STA.15+50付近までの混在岩主体の区間、③それ以降の石灰岩分布域と砂岩頁岩互層主体の区間でそれぞれ特徴的なグラフ形状が得られている。①では削孔エネルギー平均値が 200 MJ/m^3 程度で一定している。パターンはDI。②では $400 \sim 500 \text{ MJ/m}^3$ で若干の上下変動がある。パターンはCII-b主体。③では互層の影響と考えられる振幅 $30 \text{ m} \sim 50 \text{ m}$ の上下動が確認される。パターンはCII-b～CI-aである。

削孔エネルギーは地山の硬軟を表すと考えられ、地山の総合的な評価指標である切羽評価点とは必ずしも一致しない。しかし両者の相関関係、支保パターンとの対応が良好であるという事実は重要である。

図-11の四角形は、各パターンに対応する切羽評価点および削孔エネルギー平均値の範囲を示したものである。削孔エネルギー平均値も切羽評価点と同様に支保パターンに対応することがわかる。したがって両者を用いて支保パターン選定を行なうことで、信頼性・妥当性が向上するものと考えられる。

また、切羽前方探査より得た削孔エネルギーを図-11と比較し、さらに前節のように度数分布による検討を加味することで、支保パターンに直結する定量的な前方地山評価が実施できる可能性がある。

4. まとめ

日常のロックボルト孔・発破孔削孔データを利用する削孔検層システムの開発と現場適用を通じ、以下の知見を得た。

- ①延長約1kmのトンネル工事において当該システムを掘削当初から導入し、全期間にわたって運用することで、システム自体の信頼性を確立することができた。
- ②ロックボルト孔削孔データの三次元分布を評価することで、トンネル周辺の地山状況を評価できることがわかった。
- ③日常削孔データより求めた削孔エネルギーの度数分布を示すことで、トンネル周辺地山の地質を詳細に評価できること、また支保変更の際の参考データとなり得ることがわかった。
- ④日常削孔データより求めた削孔エネルギーと切羽評価点・支保パターンとの間に相関関係が認められた。日常削孔データと切羽前方探査を対比することで、支保パターンに直結する定量的な前方地山評価が実施できる可能性が示された。

現在他の3トンネルにおいて同様の削孔検層を実施している。今後は基礎データを蓄積するとともに、対象地質を拡大し、検証を続けていく所存である。

参考文献

- 1) 建設省情報施工促進検討委員会：情報化施工のビジョン-21世紀の建設現場を支える情報化施工-，建設省情報化施工促進検討委員会，2001。
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説，1996。
- 3) 芦田譲，松岡俊文，楠見晴重：弾性波の3成分受振によるトンネル切羽前方の高精度イメージング，土木学

会論文集，No.680／III-55，pp.123-129，2001。

- 4) 青木謙治，稲葉武史，塩釜幸弘，手塚康成：油圧ドリルによる削孔データを用いた岩盤評価および切羽前方地質の予測技術について，第8回岩の力学シンポジウム講演論文集，pp.67～72，1990。
- 5) 山下雅之・石山宏二・稲葉力・早坂茂・塚田純一：油圧式削岩機のダンピング圧を利用した切羽前方探査法，トンネル工学研究論文・報告集第6巻，107-112，1996。
- 6) 皆川聡一，荒川宗久，伊藤毅浩，橋詰茂：さくり削孔による切羽前方予測と地山挙動について，トンネル工学論文・報告集第8巻，pp.139～144，1998。
- 7) 武田晃・鈴木裕一・小宮一朗：油圧削岩機の削孔データを利用した山岳トンネル切羽前方予測，第53回土木学会年次学術講演会講演概要集第6部，208-209，1998。
- 8) 瀬谷正巳・山本松生・川崎真史・中村創：切羽前方予測への削孔探査システムの適用，第53回土木学会年次学術講演会講演概要集第3部(B)，236-237，1998。
- 9) 永井誠二・中島典昭：短距離および長距離探査を組み合わせた切羽前方地質予測，第53回土木学会年次学術講演会講演概要集第3部(B)，240-241，1998。
- 10) 片山政弘・前沢卓郎：長尺穿孔データを活用したトンネル切羽前方予測（中古生層を対象として），日本応用地質学会研究発表会講演論文集，279-282，1999。
- 11) 原敏昭・熊谷成之・石垣和明・木村哲・平野享：穿孔探査システムでのフィードバック，第58回土木学会年次学術講演会講演概要集第3部，315-316，2003。
- 12) 株式会社ケー・ジー・ティー：MicroAVSユーザーズマニュアル第8版，2004。
- 13) 板倉賢一・岡野成敏・山地宏志：情報化施工におけるトンネル施工法および支保工の最適化に関する研究，平成12年度財団法人先端建設技術センター研究助成報告書，2001。
- 14) 桜井春輔・板倉賢一・山地宏志：情報化施工におけるトンネル施工法および支保工の最適化に関する研究，平成12年度財団法人先端建設技術センター研究助成報告書，2002。
- 15) 板倉賢一，田口真司，佐藤一彦，嵯峨正信，尾辻真紀，角丸吉浩，山地宏志：さく岩機の機械量データによるトンネル天端の可視化システムについて，社団法人資源・素材学会春季大会公演集2004，(I)資源編，pp.59-60，2004。
- 16) ジェオフロンテ研究会：付加体工事とトンネル施工，2004。
- 17) 城間博通，伊藤哲男，赤木渉：トンネル支保選定支援システムの構築，EXTEC，No.68，pp.21-25，2004。