

穿孔探査法のトンネル施工管理への適用

AN APPLICATION OF DRILLING SURVEY METHOD TO TUNNEL CONSTRUCTION MANAGERMENTS

木村 哲^{*}・石山 宏二^{*}・大西 有三^{**}

Tetsu KIMURA, Koji ISHIYAMA, Yuzo OHNISHI

Recently, the quantitative evaluation of mountain rock bodies using the "evaluation score" has been examined at many construction sites of tunnels. However, some of the basis of evaluation score often depend on subjective observations such as a human observation, and such subjective factors cannot be clearly removed from the evaluation. We applied the sensor measurement data of Drilling survey method for evaluation basis, and the suitable support pattern could be obtained. Here, we show our exploration methods and its application to rock evaluations.

Key Words : fore survey ahead of tunnel face, Drilling survey system, evaluation parameters, support pattern, geological conditions

1. はじめに

山岳トンネル掘削時の地山評価手法として近年、評価点方式の導入等による定量化が試みられている。しかし、評価点方式の構成要素である切羽観察記録などは、観察者の主観による影響を完全に取り除くことは難しく、支保パターン決定に至る客観的な地山評価手法の確立が望まれている。

一方、トンネル掘削時に切羽前方探査として実施する穿孔探査法は、主に不良地山の出現位置の把握と不良の程度を予測しトラブルを未然に回避する目的で利用されるが、探査データの分析・評価の結果、支保パターンの選択や補助工法の選定等、施工のための指標となる特定の傾向があることが明らかになってきた¹⁾。本論分では、穿孔探査の概要を述べ、探査結果と掘削時の地山特性の関係から客観的な地山評価への適用の可能性について事例を示すとともに、穿孔探査法の将来の施工管理面への適用について論じる。

2. 穿孔探査法

(1) 穿孔探査法の概要

穿孔探査法は、油圧削岩機を用いた穿孔によって切羽前方の地山に関するデータを取得するものである。穿孔はφ64 程度のビットを装着した孔曲がり防止用先頭ロッド (φ45、L=1.8~3.0m) に丸ロッド (φ32、L=1.8~3.0m) を順次継ぎ足しながら行う。穿孔作業の概念を第1図に示す。削岩機およびロッド・ビットを岩盤に押しつけながらピストンに打撃圧を加えて岩盤を破壊させるのと同時に、ビットの回転およびその先端から噴出される削孔水により破碎したくり粉を排出させるといったサイクルを連続的に繰り返す。このとき、岩盤の破壊に要したエネルギーと打撃エネルギーの差分の余剰エネルギーが打撃反力として削岩機内のダンピングピストンに伝達され、ダンパーの役割を持つ油圧によって受け止められて吸収され、ダンピング

* 正会員 西松建設(株) 技術研究所

** 正会員 京都大学大学院工学研究科

圧が評価される。

本手法においては、油圧式削岩機の穿孔時における穿孔速度、穿孔エネルギーおよび穿孔時の反力であるダンピング圧によって地山の評価を行う。穿孔作業中に削岩機から岩盤に伝達する打撃エネルギーを一定に保持すれば、岩盤からダンピングピストンに伝達される打撃反力の値は岩盤の性状によって変化する。

すなわち、地山が硬質であるほど岩盤の破壊に使用される1打撃当たりのエネルギーは小さくなり、打撃エネルギーの余剰エネルギーである打撃反力は大きくなる。また、脆弱な岩盤は、逆に打撃反力が小さくなる。このようにダンピング圧は、シュミットハンマーの反発度に類似したパラメータである。

また、単位体積あたりの岩盤を穿孔するのに要するエネルギー量である穿孔エネルギーは、式(1)および式(2)によって算出される。

$$\text{穿孔エネルギー} Ed(J/cm^3) = \frac{\text{打撃エネルギー} Ep(J) \times \text{打撃数} Cp(bpm) \times \text{損失係数} K}{\text{穿孔速度} Vd(cm/min) \times \text{孔断面積} S(cm^2)} \quad \dots (1)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \text{打撃エネルギー} Ep(J) &= \text{ピストン受圧面積} A(cm^2) \times \text{ピストンストローク} L(m) \quad \dots (2) \\ &\times \text{打撃圧} Pp(kgf/cm^2) \times 9.80665(J/kg \cdot m) \end{aligned}$$

穿孔エネルギーは単位体積当たりの削岩機の仕事量を表すもので、より硬質な岩盤を穿孔するほど穿孔エネルギーは大きくなる傾向を示す。しかしながら、式(1)において、穿孔エネルギーの変数として穿孔速度は考慮されているが、削岩機のフィード圧は考慮されない。削岩機には、フィード圧を増加させると穿孔速度は非線形に増加する関係があり、同一地山を穿孔する場合でもフィード圧が変化すると穿孔速度も変化し、その結果、穿孔エネルギーの値も変化してしまう。そこで本手法では、原則としてトンネル全線にわたり探査時のフィード圧を一定に保つことで、穿孔エネルギーの評価を行うことが可能のようにしている。また、同一の切羽面でフィード圧を変化させて削孔し、穿孔速度とフィード圧の関係を求めたところ第2図に示す結果が得られた。

著しく不均一な地山や厚い粘土層の場合など、地山条件によってはフィード圧を一定に保つのが困難な場合が生じる。そこで、フィード圧を一定に保てない地山においては、図中の関係式を用いた穿孔速度の補正によって穿孔エネルギーの算出を可能にした。

これらの穿孔データに加えて、穿孔速度あるいは場合によってはビットを回転するのに加える回転圧より切羽前方の地山を評価する。従来より山岳トンネルの現場においては、所定の穿孔距離を削岩する時間を測定し、区間平均速度を求めた値、いわゆる「のみ下がり」と称される穿孔速度で地山を評価することがあった。本研究では、第3図に示すように、これら穿孔データを、穿孔距離に対応した詳細な速度変化を表示できるようにシステム化し、脆弱層が現れる位置とその幅を特定できるようにした。また、本システムによる地山評価の概念を第4図に示す。

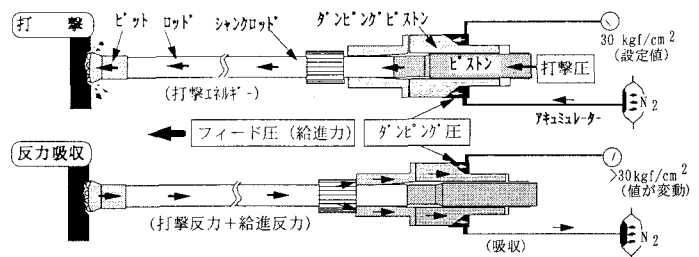


図-1 穿孔作業の概念

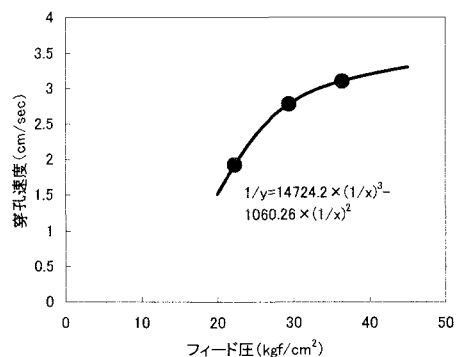
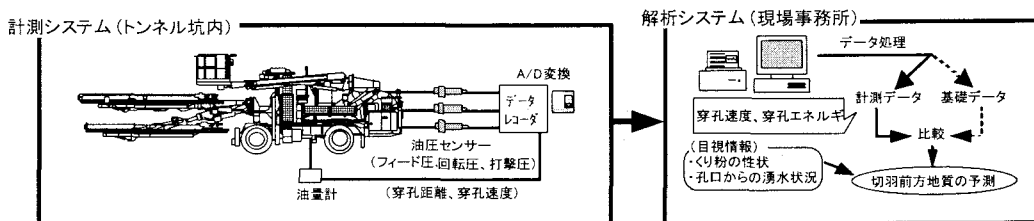


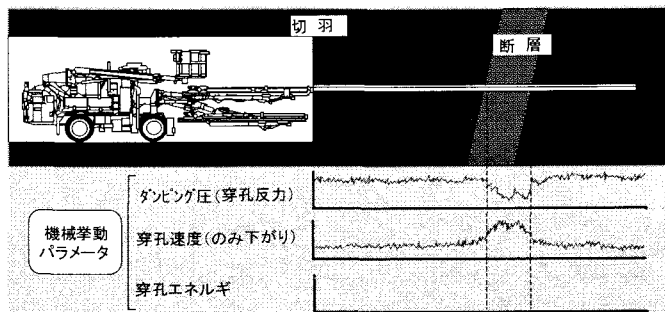
図-2 穿孔速度とフィード圧の関係



図－３ 穿孔探査システムの概要

(2) 切羽前方の探査事例

穿孔探査法による切羽前方のぜい弱層位置の抽出例を図－５に示す。この事例では、TD1918m 付近に黄褐色粘土を含む断層破碎帯が出現したが、探査時の穿孔エネルギーおよびダンピング圧の急激な低下によってその出現位置を事前に精度よく予測することができた。



図－４ 穿孔探査による地山評価の概念

上記事例においては、探査結果を受けて補助工法の適用を事前に準備し、断層出現時に迅速に適用したため、切羽の不安定化を招くことなく安全に掘削を進めることができた。穿孔エネルギーに着目すると、地山の性状が脆弱になるほど平均値および標準偏差が小さくなる傾向が認められるが、その値が特に 100 J/cm^3 以下となったときは鏡面の安定性が著しく損なわれ、補助工法の必要なケースが多い。本事例においても数メートル区間にわたり 50 J/cm^3 以下の穿孔エネルギー値と湧水量の急激な増加を示したため、注入式フォアポーリング工を実施し、これにより、掘削時に出現した断層破碎帯を突破することができた。

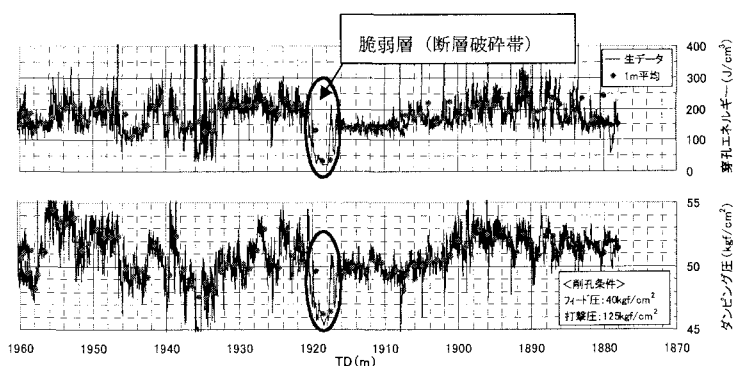
表－１に、これまでに穿孔探査法で得られた穿孔エネルギーと地山状況、補助工法の適用事例を示す。湧水の有無により幅はあるものの、岩質にかかわらず、穿孔エネルギー 100 J/cm^3 が補助工法適用の目安になると考えている。

(3) 探査結果による地山判定と 支保パターン想定

穿孔探査法の探査結果を事前のトンネル支保パターン想定に活用可能かどうかを探るための運用を試みた。花崗閃緑岩、終点側は白亜紀～古第三紀の変成岩類（ホルンフェルス）がそれぞれ広く分布している。

１回当たり約 40m 区間の穿孔探査を、起点および終点側からの掘削進行にあわせて計 62 回実施し、約 1,800m 間について連続適用した。

探査の初期段階に探査孔箇所の地山性状と穿孔エネルギーの関係を求め、その結果から地山分類を行うための管理値基準値を作成した。なお、岩種の違いにより穿孔エネルギーと地山分類に差が認められたため、花崗閃緑岩とホルンフェルスの岩種毎に判定基準を設定した。その結果を表－２に示す。



図－５ 切羽前方の脆弱層出現位置の推定例

表-1 穿孔探査で得られる穿孔エネルギーと地山状況、及び補助工法の適用事例

Case	削岩機	ビット	フィード 圧	岩種	支保	穿孔エネルギー (J/cm ³)	地山状況、補助工法
1	A社 タイプ1	クロス・Φ 80	3MPa	砂岩・ 頁岩	D I	>100	先受け工なし
						≤100	AGF
2	A社 タイプ2	ボタン・Φ 64	4MPa	花崗 斑岩	D I	>100	先受け工なし
						≤100	モルタル填充及びシリカレジン注入式フ ォオボーリング
3	B社	ボタン・Φ 64	4MPa	礫層	D I	>100	先受け工なし
						≤100	AGF 及びシリカレジン注入式フォオボーリ ング

表-2 穿孔エネルギーと地山分類の判定基準

岩 種	地山 分類	穿孔エネルギー (J/cm ³)	岩 種	地山 分類	穿孔エネルギー (J/cm ³)
花崗閃緑岩	C I	550～	ホルンフェルス	C I	300～900
	C II	250～550		C II	300～600
	D I	150～250		D I	150～300
	D II	～150		D II	～150

現場での切羽前方の地山評価は、表-2に示す基準値に従って1m毎に穿孔探査区間の地山分類を行った。また、各深度の前後5mを含む10m区間（トンネル径：1Dに相当）において得られた穿孔データから支保パターンを想定した。当想定においては、最も低ランクの地山分類（以下Aと称す）が占有する比率から次のように求めた。

i) Aの占有比率≥30% の場合は、支保パターンD II 想定

ii) 10%≤Aの占有比率<30% の場合は、支保パターンD II または1ランク上の支保パターンを想定

iii) Aの占有比率<10% の場合は、支保パターンD II の1ランク上の分類を占有比率を求めて想定する

例えばii)及びiii)において複数の支保パターンが想定される場合、その前後の想定パターンとの連続性を考慮して支保パターンを決定していく。このようにして1m毎の支保パターンを決定した後、施工性等を加味して同一パターンの区間が概ね10m以上となるように支保パターンの区間を再度定めていった。

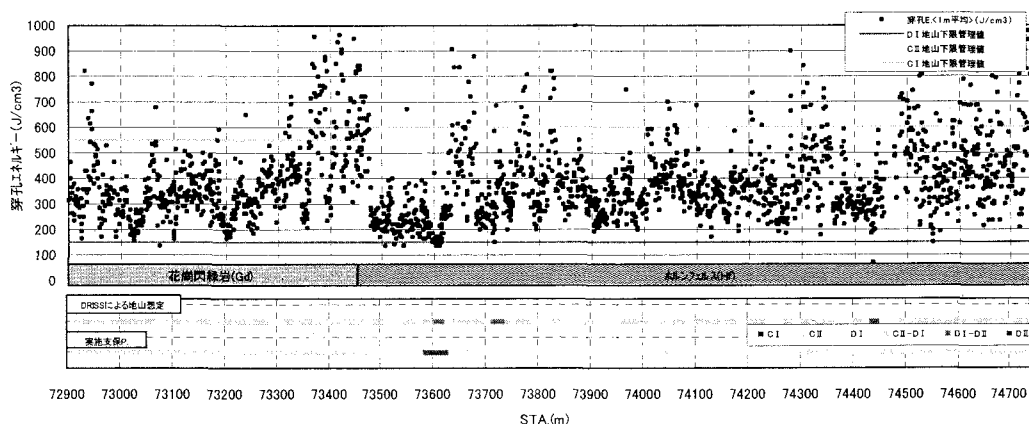
図-6には、1m区間ごとの穿孔エネルギーの分布状況と上記の方法で想定した支保パターン（DRISSによる想定と記述）および実際に施工した支保パターンの一覧を示す。

穿孔エネルギーの結果を見ると、STA73450m付近の花崗閃緑岩とホルンフェルスの地質境界を明瞭に識別できることが分かる。またSTA73500m付近およびSTA74500m付近のC IIからD Iへの支保パターン変更部や掘削区間中最も脆弱な地山が分布していたSTA73600m付近のD IIパターン適用区間等、本探査手法による事前想定は、実績と概ね一致している。これより、本手法によって、トンネル切羽前方の地山調査の有用性及びそれを利用した支保の決定が、経験者によって決められたものとほぼ一致することが実証された。このように、従来“探り削孔”あるいは“のみ下がり”といった指標で地山性状を判断していたものをシステム化することで、簡便な作業で有用な地山情報を得ることができ探査手法へと発展させることが可能になったと考える。ただし、適用したトンネル地山は、性状の変化が比較的面状で、トンネル軸に高角度で交差する特徴を持っていたため、比較的良好な結果を得ることができたものとする。不規則な地山に対する穿孔探査法の適用法に関しては、今後事例を増やし、その検討を行っていく予定である。

(4) TBM 機械データによる地山評価との組み合わせ

TBM によるトンネル掘削は急速施工が期待される半面、一度予期せぬ地山脆弱層に遭遇すると安全性のみならず工期・工費にも多大な影響を及ぼす恐れがある。したがって、TBM 掘削時の切羽近傍の地山性状の変化を正確に把握し、その情報を施工に迅速に反映することは重要である。

TBM トンネル掘削にとっても穿孔探査法は、切羽前方の地質を予測し地山を評価する手法として有効である。しかし、穿孔探査法は、孔曲がりやジャミングを避けるため、1回の削孔長を30～50mとしており、月進400～500m掘進するTBM掘削にとっては頻繁な探査が必要になり、その度に掘進を停止しなければならず



図－6 探査結果および想定・実施支保パターンの比較

非効率である。そこで、地山性状を迅速に把握するため、TBM 掘進時の機械データと穿孔探査データを組み合わせた掘削管理を行った。TBM 機械掘削データから岩盤性状を把握する手法として、以下に示す福井らによる掘削抵抗から岩盤強度を算定する手法を用いた。

σ_c (TBM) = $FN / (C1 \cdot P) = TR / (C2 \cdot P1.5)$ ここで、 σ_c : 推定岩盤強度 (MPa)、FN: スラスト推力 (kN)、TR: カッタトルク (kN・m)、P: カッタ貫入量 (mm/rev)、C1, C2: 定数

TBM 掘進時に、予め定めたしきい値以下まで推定岩盤強度が低下した場合は、TBM が不良地山ゾーンに接近したと判断し掘進を止め、穿孔探査を実施して切羽前方の地山状況を調査し、探査結果から支保パターンの変更あるいは補助工法実施の可否等を判断するものとした。TBM 掘削データと穿孔探査の組み合わせによる地山評価の概念図を図－7 に示す。

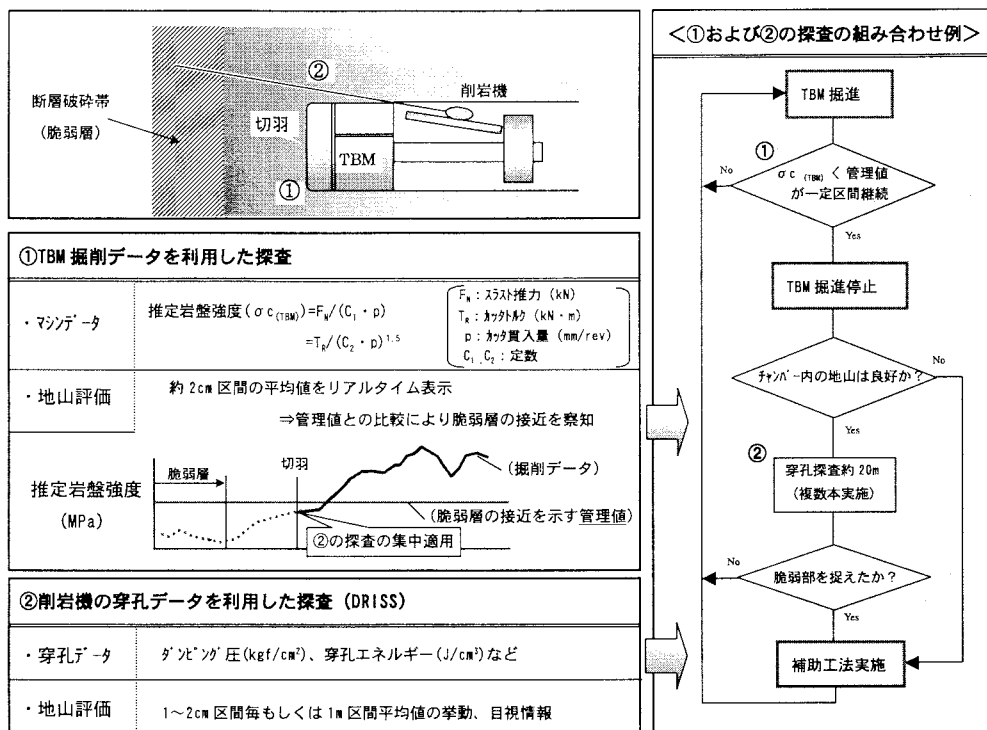
掘削開始時は、地山を評価するうえでの穿孔探査と TBM 掘進を関係付けるデータが無いため、過去のトンネル掘削の実績に従った。また、TBM 初期掘進段階において、データを評価するための穿孔探査のキャリブレーションを行い、穿孔探査のデータおよび TBM 初期掘進時のデータから得られる推定岩盤強度、ならびに実際の掘削状況から本トンネルにおける推定岩盤強度による管理基準値を設定した。穿孔探査の結果、ばらつきはあるものの $150 \sim 400 \text{ J/cm}^3$ で推移していた穿孔エネルギーの値が、急に 100 J/cm^3 以下を示す区間が出現したため、ここを脆弱層出現位置と見なした。TBM 掘進データは、脆弱層出現位置の約 8m 手前より推定岩盤強度が 20MPa を下回り始め、ルーフサポート部後方において天端部に小崩落の発生が見られた。本掘進開始後も同様の傾向が見られたため、一次管理基準を 20MPa に設定した。また、脆弱層位置付近においては、5MPa を下回る傾向が認められ、湧水を伴うと切羽の崩壊につながるものが懸念されたため、表－3 に示すとおり、二次管理基準を 5MPa に設定した。こうして TBM 掘進を無事終了したが、今後は、本システム適用事例を増やし、TBM 掘進時の施工サイクルへの影響を最小限に抑えた地山評価法を確立する所存である。

表－3 推定岩盤強度の管理基準

管理基準	推定岩盤強度 (MPa)	処 置
Level I	20以下	サポート後方坑壁崩落注意
Level II	5以下	TBM拘束注意(チャンバー内点検、切羽からの湧水の有無確認、DRISS実施検討)

3. 将来の施工管理面への適用

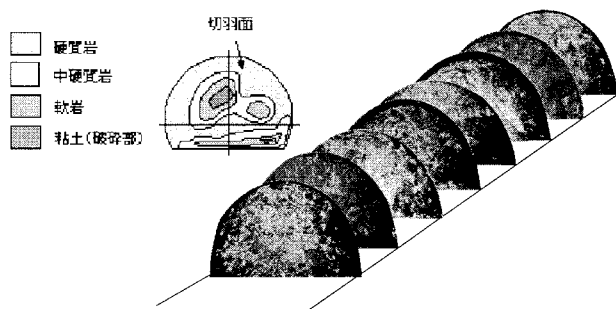
トンネル掘削時には切羽全面に発破孔の穿孔および周辺部にロックボルト孔の穿孔を実施するため、これら削岩機を使用する作業に上記で述べた探査システムを適用すれば、トンネル一発破進行ごとの定量的な地山評価が可能になる。図－8 に模式図を、図－9 に穿孔探査法の適用フローを示すが、このような適用手法は、



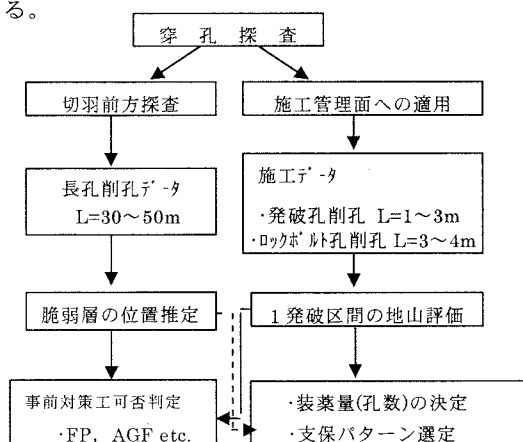
図－7 TBM 掘削データと穿孔探査の組み合わせによる地山評価の概念図

支保パターン、装薬量等の定量的・合理的な選定などの施工管理面への適用に大いに役立つ指標となると思われる。

ただし、穿孔エネルギー等のデータとセットで、全ての穿孔位置を座標等で把握しなければならず、その位置情報を認識する技術が必要である。現在、国内でも利用が始まったコンピュータ制御全自動ジャンボには、このような機能も有しており、今後の活用が期待できる。また、デジタルカメラを用いた写真測量により穿孔位置を三次元位置座標で表示する手法も適用可能であると考えられる。こうした新技術の導入により、探査手法の施工管理面への効率的な活用が図れるものと期待する。



図－8 穿孔探査による切羽の定量的評価



図－9 穿孔探査適用のフローチャート

参考文献

1) 例えば、山下雅之、石山宏二、木村哲、明石健、岡田隆治、福井勝則：穿孔探査法の TBM 掘削への適用、第 11 回岩の力学シンポジウム、岩の力学連合会、2002