

TBM機械データを利用した支保の合理的選定方法

A STUDY ON THE METHOD FOR SELECTING THE SUPPORT PATTERN OF THE TUNNEL EXCAVATED BY TBMs

白鷺 卓^{*}・山本拓治^{*}・水戸義忠^{**}・山本真哉^{***}・青木謙治^{**}

S. SHIRASAGI, T. YAMAMOTO, Y. MITO, S. YAMAMOTO and K. AOKI

Recent tunneling projects in rock masses must be required to secure not only the reliable stability but also safety and rationality during the construction taking its cost and the environments surrounding the tunnel into account. TBM is one of the top-rated excavation methods for solving those kinds of problems because of its favorable features that realize the rapid excavation with cheaper cost by a few operators. However, there is one avoidable unfavorable point such that the geological condition at the tunnel face cannot be observed since the TBM covers the entire face. Therefore, it is rather difficult to carry out sufficiently rational support according to the rapid excavation, especially in Japan, where the geological structure is very complex.

In this study, the relationship between TBM driving data, geological data obtained from tunnel wall observation and support pattern in a sedimentary rock mountain is statistically described by multivariate analysis (discriminant analysis and quantification theory analysis), and then the contributions of each variable to support pattern is quantitatively clarified as the first step of selection of support pattern.

Key Words: TBMs, driving data, support pattern, multivariate analysis

1. はじめに

TBMによるトンネル掘削は、少子高齢化・経済・安全・環境問題を解決する優れた工法として、近年第二東名神トンネルの導坑掘削をはじめ、国内外を問わず多く採用されている。しかし、日本の複雑な地質条件においては、TBMの高速掘進性という長所を十分に発揮できず、逆効果をもたらすことも少なくない。

筆者らが開発したTBM掘削管理システム¹⁾は、日本の複雑な地質条件下においてもトラブルを回避し最適なTBM掘削を実現できることを目的としたシステムで、これまでに数多くの実績を積み上げてきている。しかし、そこで採取されているTBM機械データは、掘削時のTBM制御には活用されているものの、その後の支保パターン選定に積極的に活用されることは少なく、また、そのデータについて統計的に分析・検討された例は少ないのが現状であった。

したがって、我々は、亀裂性の花崗岩地山におけるオープンタイプTBM掘削時のTBM機械データや坑壁地質評価点を多変量解析により分析し、断層や破碎帯、風化帯や多亀裂帯等の地質変化に伴う支保パターンの変化をTBM機械データを分析することによって定量的に評価できることを検討してきた²⁾。

本論文では、上記地質条件より全体に軟らかい新第三紀の砂岩泥岩互層地山において、シールドタイプTBMで掘削時に採取された各種施工データを多変量解析により分析し、本手法による支保選定が新第三紀の堆積岩地

^{*} 正会員 鹿島 技術研究所 土木技術研究部

^{**} 正会員 工学博士 京都大学大学院 工学研究科

^{***} 学生会員 京都大学大学院 工学研究科

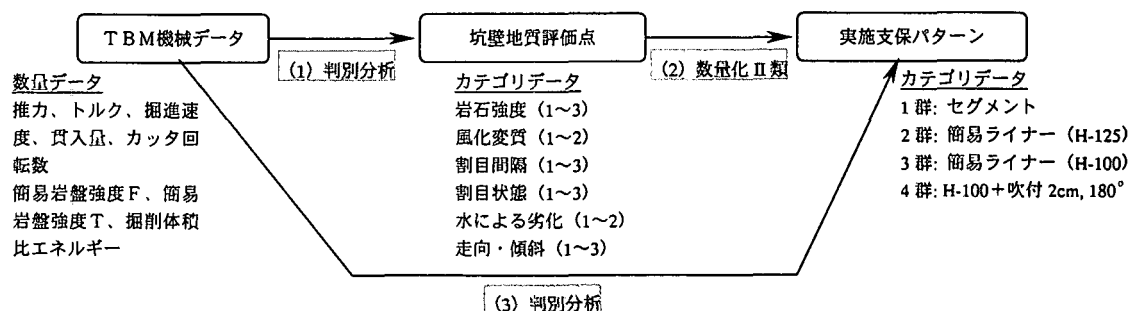


図-1 多変量解析による各種データ間の関係分析手順

山においても適用可能であることを検証したので報告する。

表-1 各モデルの説明変数

	説明変数
モデル①	掘削体積比エネルギー $Et = \frac{\text{推力}}{\text{掘削断面積}} + \frac{2\pi \times \text{回転数} \times \text{トルク}}{\text{掘削断面積} \times \text{掘進速度}}$
モデル②	簡易岩盤強度F $\propto F = \frac{\text{推力}}{\text{貫入量}}$
モデル③	簡易岩盤強度T $\propto Tr = \frac{\text{トルク}}{\text{貫入量}^{1.5}}$
モデル④	簡易岩盤強度F、簡易岩盤強度T
モデル⑤	掘削体積比エネルギー、簡易岩盤強度F、簡易岩盤強度T
モデル⑥	推力、トルク、掘進速度、貫入量、回転数
モデル⑦	L_n (推力、トルク、掘進速度、貫入量、回転数)
モデル⑧	推力、トルク、掘進速度、貫入量、回転数、ベルコン土量
モデル⑨	L_n (推力、トルク、掘進速度、貫入量、回転数、ベルコン土量)

2. 多変量解析による検討方法

分析した各種データは、新第三紀の砂岩泥岩互層をシールドタイプTBMで掘削した際に得られたTBM機械データ、坑壁地質評価点、実施支保パターンで、総データ数は62個である。図-1に各種データ間の関係の分析手順を示す。

TBM機械データとは、推力、トルク、掘進速度、カット1回転あたりの貫入量、1分間あたりのカット回転数と定数を1に設定した岩盤強度³⁾（以降、簡易岩盤

強度）と掘削体積比エネルギーで、すべて数量データである。また、ベルトコンベアに設置したベルトスケールで計測している掘削すり重量（以降、ベルコン土量⁴⁾）も数量データとして利用した。今回は、これらデータについて表-1に表した9つのモデルを設定した。

坑壁地質評価点（表-2）とは、ある地点（TD）の天端および左右側壁部の3箇所における「岩石強度」「風化変質」「割目間隔」「割目状態」「水による劣化」「走向・傾斜」を2～4段階で評価したカテゴリーデータで、評価点が小さいほど地質の状態が良いことを示している。「岩石強度」はハンマー打撃による岩片の硬さの評価、「風化変質」は岩盤の風化変質度の評価、「割目間隔」は割目の存在する距離間隔の評価、「割目状態」は割目の開口幅や挟在物の評価、「水による劣化」は湧水による軟弱度の評価、「走向・傾斜」は割目のトンネル軸との交差角

表-2 坑壁地質評価点

評価項目	評価点	評価基準	評価項目	評価点	評価基準
岩石強度	1	岩片を地面においてハンマー強打で割れる	割目状態	1	一部開口1mm未満
	2	岩片を手にとってハンマーで割れる		2	多く開口1mm未満
	3 → 2	岩片どおしをたたき合わせて割れる		3	開口1～5mmで粘土挟在
	4 → 3	両手で岩片を割れる		4	開口5mm以上で粘土挟在
風化変質	1	新鮮	水による劣化	1	なし
	2	割目沿いのみ		2	ゆるみあり
	3	岩芯まで	走向・傾斜	1	差し目 (45～90度)
割目間隔	1	1m以上		2	差し目 (20～45度)
	2	50cm以上1m未満		3	差し目あるいは流れ目 (0～20度)
	3 → 2	20cm以上50cm未満		4	流れ目 (20～45度)
	4 → 3	5cm以上20cm未満			

の評価である。なお、評価点に偏りが見られたため、解析においては「岩石強度」「割目間隔」「割目状態」「走向・傾斜」を3段階、「風化変質」を2段階にカテゴライズしなおしている。

実施支保パターンは、1群をセグメント、2群をH-125を使用した簡易ライナー、3群をH-100を使用した簡易ライナー、4群をH-100+吹付コンクリート（厚さ2cm、180°）と設定したカテゴリーデータである。4群が最も軽く、1群が最も重い支保である。

まず、図-1中（1）ではTBM機械データを説明変数、坑壁地質質観点を目的変数とし判別分析を実施した。説明変数の組み合わせは表-1に示す9つのモデルを設定した。また、坑壁地質評価点は、天端および左右側壁部の3箇所の最大値、最小値、平均値を求め、それぞれに対して9つのモデルで判別分析した。次に、図-1中（2）では坑壁地質評価点を説明変数、実施支保パターンを目的変数とし、数量化理論Ⅱ類による判別を実施した。天端および左右側壁部の評点の最大値、最小値、平均値を利用して、4つの支保パターンを判別した。最後に、図-1中（3）ではTBM機械データの9つのモデルそれぞれを説明変数とし、4つの支保パターンを判別分析した。

3. 多変量解析による検討結果

(1) TBM機械データによる坑壁地質評価点の判別結果

判別結果として各評価項目における判別の中率と各説明変数の正準判別関数係数を求めた。判別の中率とは各説明変数による目的変数の判別式から求められた予測値の観測値にたいする的中率のことで、高いほどその目的変数を精度よく判別できていることを示す。また、正準判別関数係数とは判別式の係数で、大きいほどある説明変数がある目的変数の判別に寄与していることを示す。表-3の網掛け部は判別の中率および正準判別関数係数の最大値を示している。

全モデルについて多変量解析による分析を行った結果、表-3に示したモデル⑧が最も坑壁地質評価点を精度よく判別できることを確認した。平均判別の中率は78.9%であった。モデル⑥よりも中率が高いことから、ベルコン土量を説明変数に加えたほうが判別率が高いことが確認できた。また、「水による劣化」の最大値の判別の中率が最も高いことから、モデル⑧は天端および左右側壁部の最も「水による劣化」が著しい箇所の地質状態をよく反映しているといえる。また、「走向・傾斜」についてもその的中率が比較的高かったことから、亀裂が差し目か流れ目かということに関してはTBM機械データやベルコン土量により判別できることがわかった。

各説明変数の正準判別関数係数の精査では、推力は「水による劣化」、トルクは「風化変質」「割目間隔」、掘進速度は「岩石強度」、回転数は「割目状態」の判別に寄与していることがわかる。また、この正準判別関数係数より判別式を立てられる。たとえば、「水による劣化」の最大値の場合、表-3より、

「水による劣化」最大値

$$=0.68F+0.47Tr-0.09V+0.20Pe+0.60N-0.65W \cdots (1)$$

ここで、F：推力、Tr：トルク、V：掘進速度、Pe：貫入量、N：カット回転数、W：ベルコン土量

となり、「水による劣化」の最大値の観測値と判別式による予測値を比較すると図-2のようになる。これより、判別式によって求められた予測値を四捨五入して整数にすれば、精度よく観測値を予測できることがわかった。ただし、各説明変数は標準化したもの（＝（観測値－平均値）÷標準偏差）を使用している。

一方、オープンタイプTBMによる一様な花崗岩地山掘削時の分析結果²⁾では、最も平均判別の中率が高かったのはTBM機械データと

表-3 モデル⑧による評価点の判別における正準判別関数係数と判別率

		正準判別関数係数						判別率
		推力	トルク	掘進速度	貫入量	回転数	ベルコン土量	
岩石強度	平均	0.06	0.25	-1.15	0.06	0.95	0.62	73.2%
風化変質	最小	0.45	0.86	0.01	-0.01	0.05	-0.48	83.9%
割目間隔	最小	0.17	0.84	-0.88	-0.10	0.26	0.21	69.6%
割目状態	最大	0.41	0.40	-0.50	0.03	0.53	0.18	83.9%
水による劣化	最大	0.68	0.47	-0.09	0.20	0.60	-0.65	91.1%
走向傾斜	最小	0.50	-0.21	-0.42	0.78	1.86	-1.12	71.4%
Ave.rate								78.9%

削孔検層より得られた破壊エネルギー係数のすべてを対数化したデータを説明変数としたモデルで、68.9%であった。目的変数のうち、「水による劣化」の最小値の判別率（81.7%）が最も高く、「割目間隔」最大値、「風化変質」最小値、「岩石強度」最小値、「割目状態」最小値と続く。説明変数が一部異なるため単純に比較はできないが、「割目状態」の的中率が硬質様な花崗岩地山では低く、軟質な砂岩泥岩互層地山では高くなっていることから、TBM機械データは、前者においては「割目状態」を反映しにくく、後者においては「割目状態」を反映していると考えられる。

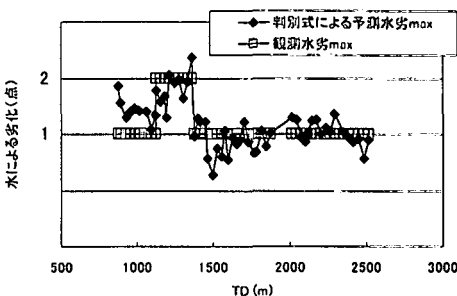


図-2 「水による劣化」の観測値と判別式による予測値の比較

(2) 坑壁地質評価点による実施支保パターンの判別結果

坑壁地質評価点の最大値、最小値、平均値をそれぞれ説明変数として、4つに分類された支保パターンを数理化Ⅱ類により判別した結果、「岩石強度」「風化変質」「割目状態」の最小値、「割目間隔」「水による劣化」の平均値を説明変数として判別すると最も判別率が高いことを確認した。なお、「走向・傾斜」はデータに大きな偏りが見られたため除外した。表-4にカテゴリースコア一覧、図-3にカテゴリースコアグラフ、図-4には上記組み合わせを説明変数としたときのサンプルスコアグラフと、「岩石強度」「風化変質」「割目状態」「水による劣化」の最小値と「割目間隔」の平均値を説明変数としたときのサンプルスコアグラフを示した。カテゴリースコアとは各説明変数の各カテゴリーに与えられた重みで、ある説明変数におけるカテゴリースコアの最大値と最小値の差が大きいほどその説明変数が判別に寄与している。また、サンプルスコアグラフは坑壁地質評価点のカテゴリースコア総計の度数分布で、これにより各群に属する坑壁地質評価点の分布傾向を見ることができる。

表-4 カテゴリースコア一覧

項目名	評点	カテゴリースコア
岩石強度	1 硬	0.4611
	2 中	-0.4319
	3 軟	-0.0512
風化変質	1 弱	0.2368
	2 強	-0.0402
割目間隔	1 広	0.0053
	2 中	-0.3573
	3 狭	0.5740
割目状態	1 良	0.9039
	2 中	-0.7229
	3 悪	-0.3831
水による劣化	1 無	0.0771
	2 有	-0.7197

まず、表-4 および図-3 のカテゴリースコアグラフから「割目状態」が最も実施支保パターン判別に寄与していることがわかる。以降、「割目間隔」「岩石強度」「水による劣化」「風化変質」と続く。また、図-4 のサンプルスコアグラフを見ると、右図に比べて左図のほうが、4つの各群に属する坑壁地質評価点の分布が大きく4つのエリアに区分できていることがわかる。右図において判別点（しきい値）を4群-3群間が-1.01、3群-2群間が0.35、2群-1群間が1.00と設定した時の判別率が58.1%で2位だったのに対し、左図において判別点を4群-3群間が1.04、3群-2群間が-0.54、2群-1群間が-1.14と設定すると、その判別率は最大の75.8%となった。つまり、天端および左右側壁部の3箇所のうち、「岩石強度」「風化変質」「割目状態」については最も地質状態のいい箇所、「割目間隔」「水による劣化」については3箇所の平均値を重視して支保パターンを選定するのが最も効率が良いと考えられる。

さらに、求められたカテゴリースコアとサンプルスコアのしきい値から支保パターンを予測することができる。たとえば、ある地点においてすべての坑壁地質評価点が1だった場合、表-4より、

ある地点のサンプルスコア

$$= 0.4611 + 0.2368 + 0.0053 + 0.9039 + 0.0771 = 1.6842 \quad \dots (2)$$

となり、ある地点の支保パターンは4群に属することを予測できる。図-5

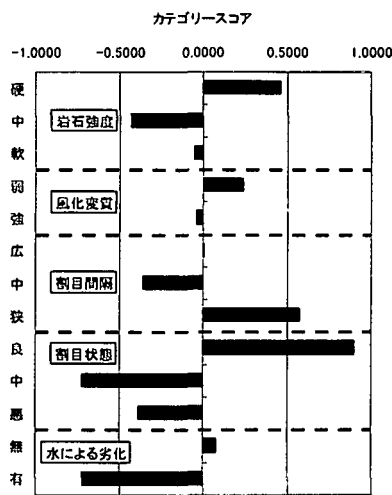


図-3 坑壁地質評価点による実施支保パターンの判別におけるカテゴリースコアグラフ

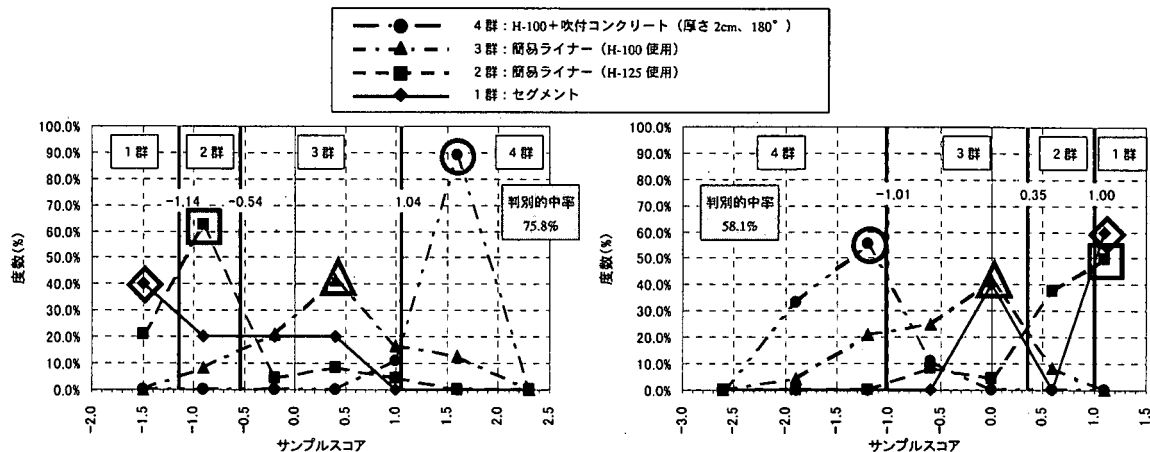


図-4 坑壁地質評価点による実施支保パターンの判別におけるサンプルスコアグラフ
(左：最高判別的中率を示した判別結果、右：次席判別の中率を示した判別結果)

に実施支保パターンとサンプルスコアによる予測支保パターンの比較を示す。これより、サンプルスコアを利用して精度よく実施支保パターンを予測できることを確認することができた。

一方、オープンタイプTBMによる一様な花崗岩地山掘削時の分析結果²⁾では、最も判別の中率が高かったのは「岩石強度」「風化変質」の平均値、「割目間隔」「割目状態」の最大値、「水による劣化」の最小値を説明変数としたときであった。また、判別に最も寄与した説明変数は「水による劣化」で、以降、「割目間隔」「風化変質」「割目状態」「岩石強度」と続く。

(3) TBM機械データによる実施支保パターンの判別結果

表-5 にTBM機械データによる実施支保パターンの判別分析結果のうち、最も中率の高かったモデル⑨の結果を示す。

正準判別関数係数を精査すると、モデル⑨では回転数の正準判別関数係数が最も大きい。これは掘削中にオペレータが状況に合わせて切り替えられる値(2.0、4.0、6.0rpmの3段階)であることから、オペレータは地質の変化を各種施工状況から判断し、回転数をコントロールすることによって地質変化に対応した最適なTBM運転を行っていたことがわかった。また、(3)式はモデル⑨の正準判別関数係数を利用して作成した判別式である。

実施支保パターン

$$=0.66\ln(F)-0.50\ln(Tr)-0.07\ln(V)+0.47\ln(Pe)+1.11\ln(N)+0.43\ln(W) \quad \cdots (3)$$

ここで、 F ：推力、 Tr ：トルク、 V ：掘進速度、 Pe ：貫入量、 N ：カット回転数、 W ：ベルコン土量

となり、実施支保パターンと判別式による予測支保パターンを比較すると図-6 のようになる。これより、判別式によって求められた予測値を四捨五入して整数にすれば、精度よく観測値を予測できることがわかった。ただし、各説明変数は標準化したもの(= (観測値-平均値) ÷ 標準偏差)を使用している。

一方、オープンタイプTBMによる一様な花崗岩地山掘削時の分析結果²⁾では、最も判別的

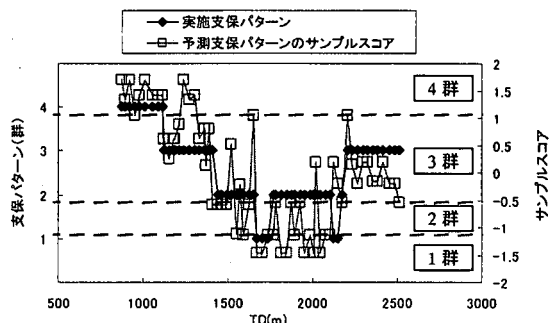


図-5 実施支保パターンと予測支保パターンの比較

表-5 モデル⑨による実施支保パターンの判別分析結果

モデル	説明変数の正準判別関数係数						判別率	順位
	Ln 推力	Ln トルク	Ln 掘削速度	Ln 貫入量	Ln 回転数	Ln ベルコン土量		
モデル⑨	0.66	-0.50	-0.07	0.47	1.11	0.43	60.7%	1

中率が高かったのは掘削体積比エネルギー、簡易岩盤強度FおよびT、削孔検層による破壊エネルギー係数を説明変数としたモデルで61.0%であった。このときの説明変数のうち、判別に最も寄与していたのは簡易岩盤強度Tであった。また、説明変数の組み合わせが一部異なるため単純に比較はできないが、モデル⑨に類似するモデルを見てみると、判別に最も寄与している説明変数はトルクで、貫入量、推力と続く。

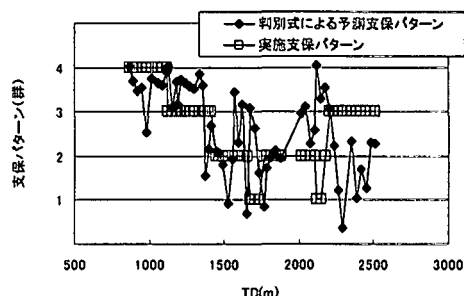


図-6 実施支保パターンと判別式による予測支保パターンの比較

4. 検討結果のまとめと考察

シールドタイプTBMで施工された新第三紀の砂岩頁岩互層

地山トンネルでのTBM機械データから坑壁地質評価点を判別する場合、モデル⑧を説明変数として利用すると最もの中率が高く、特にTBM機械データは「水による劣化」「風化変質」「割目状態」といった岩盤の割目の状態を表す評価項目を反映していることがわかった。このとき、推力は「水による劣化」、トルクは「風化変質」、掘進速度は「岩石強度」「割目間隔」、回転数は「割目状態」を判別する際に寄与していることがわかった。また、「走向・傾斜」についても、これらの説明変数での判別がある程度可能であることを確認した。

坑壁地質評価点から実施支保パターンを判別する場合は、「岩石強度」「風化変質」「割目状態」の最小値と「割目間隔」「水による劣化」の平均点を説明変数として判別すると最も判別率が高く、その内の「割目状態」が最も支保パターンの判別に寄与していることがわかった。

TBM機械データから実施支保パターンを判別する場合は、モデル⑨を説明変数として利用すると最もの中率が高いことを確認した。また、正準判別関数係数により、オペレータで切り替え可能なカット回転数が支保パターン判別に最も寄与していたということがわかった。この結果より、施工状況に応じた人間の感覚による判断が結果的に支保パターンと大きく相関していること、熟練したオペレータの選択した回転数は支保パターン選定に有効な指標であることを確認した。

また、このような分析から求められる正準判別関数係数やカテゴリースコアを利用して、対象地山の坑壁地質評価点や実施支保パターンを(1)(2)(3)式のような判別式により予測することができることがわかった。

これら3通りの分析結果を、硬質ではあるが亀裂の発達した花崗岩地山においてオープンタイプTBMにより掘削された各種施工データの分析結果と比較すると、それらの傾向は若干異なる。その理由として地質やマシンが違うこと以外にも様々な要素が絡んでいる可能性があるため、今回得られた結果を堆積岩地山一般の傾向とすることは現段階では当然無理がある。しかし、最も重要なことは、施工の初期にこのような手法で各種施工データを分析することで、少なくとも同じトンネルに関しては定量的に高い中率で支保パターンを選定することが可能であるということである。将来的には、TBM機械データから直接支保パターンを選定することが可能なインテリジェントTBMナビゲータのシステムとして確立し、さらなるTBM掘削の合理化、スピードアップに貢献していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 白鷺卓他：地山情報を重視したTBM掘削管理システムの開発と適用事例，第30回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.298-302，2000
- 2) 山本拓治他：TBM掘削データを用いた支保の合理的選定方法について，第11回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，F22，2002
- 3) 福井勝則他：TBMの掘削抵抗を利用した岩盤強度の推定—二軒小屋トンネルの事例—，資源と素材，Vol.112，pp.303-308，1996
- 4) 稲生道裕他：TBM掘削時のずり重量変化に着目した地山評価手法，第56回年次学術講演会講演概要集，III-B052，2001