

TBM機械データと地質状況の相関性について

Correlation Relation of TBM Excavation Data and Geological Condition

大窪正秋 1)、岩崎日出夫 2)、内藤将史 3)、岡村光政 4)

Masaaki.OKUBO, Hideo.IWASAKI, Masashi.NAITOH, Mitsumasa.OKAMURA

Excavation data such as the cutter torque and thrust that shows excavation condition in TBM execution, able to be acquired to a real time. Rational tunnel execution is able to be materialized, by establishing an estimation method of face geological condition by using these data. Many research reports such as the selection of the support pattern and estimation of face geological condition that used TBM excavation data heretofore, are observed. However, excavation data change largely by property of rock and degree of crack and degree of fracture etc., the application is in difficult situation.

In this report, it shows the result that carried out analysis about correlation relation between TBM excavation data and geological condition and also stability evaluation point, in an execution case of the rock mass that is composed of many crack andesite and cracking to comparatively a few tuff breccia.

Key Word: TBM, excavation data, stability evaluation

1. はじめに

近年、複雑な地山条件などにも対応できる全地質対応型TBM (Tunnel Boring Machine) 開発が進み、山岳トンネル施工における自動化、省力化、作業環境の改善という観点から、主に水路トンネルや上下水道トンネル、道路トンネルなど、その施工例が急速に増加する傾向にある。

特に、日本道路公団ではTBMの活用が積極化しており、①地質調査を兼ねた一期線避難坑の施工(東海北陸自動車道城端トンネル、袴越トンネル)②第二東名・名神、超大断面トンネル施工法の「TBM導坑先進拡幅掘削工法」(清水第三トンネル、富士川トンネル、栗東トンネル)、③大断面TBM計画(東海北陸自動車道飛騨トンネル)、などの工事が実施および計画されている。

本トンネル工事は、市街地に隣接し、また電力会社所有の導水路直下を横断するため、発破振動などの影響が懸念された。そこで、確実な発破振動制御を実現しつつ所要の掘削効率を確保するため、TBM先進導坑を発破心抜きとした導坑先進拡幅掘削工法を採用している。同工法では、TBM掘進時の機械データによる地山状況把握・導坑支保選定や本坑拡幅時の支保推定などが重要な検討課題とされた。

本報告では、主にTBM掘進データと地質状況との相関性、導坑地山評価と各種計測データとの関連などについて分析した結果を示す。

2. 工事概要

本トンネルは仕上がり半径=5.4m、延長=623mの2車線道路トンネルである。本工事におけるTBM先進導坑の施工目的は、確実な発破振動制御と掘削効率の向上を図るため、発破における“芯抜き効果”を最も評価し、導坑位置は本坑断面中央部(標準的な芯抜き位置、図-1参照)に設定した。導坑の所要断面としては、標準的な芯抜き面積(4~8m²)が必要となるが、経済性の観点から市場転用機の充当を考慮して掘削外径2.3m(断面積4.15m²、川崎重工製ハイブリッド型KTB-230S-J機)のTBMを用いた。

1)、2) 兵庫県土木部

3)、4) 正会員 戸田建設株式会社 土木技術開発室

掘削対象の地質は、新第三期に噴出した「玄武岩質安山岩～玄武岩質火砕岩」であり多量の火山礫や角礫を含んでいる。特徴的な緑色を帯びた“グリーンタフ(緑色凝灰岩)”であるが、膨張圧などに関わる典型的な物性はない。起点側坑口から75m区間は玄武岩質安山岩(An)を主体とし、それ以降は火山礫凝灰岩(Tf)の単一岩盤となっている。Tfの弾性波速度は3.4～3.6km/sec、圧縮強度の平均値は、40N/mm²程度、岩盤分類ではC₄～C₆級に分類され延長比率の80%を占める(図-2)。

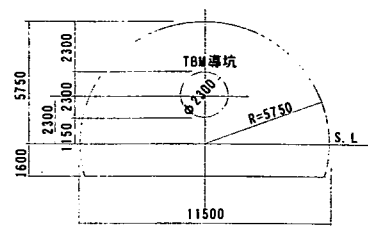


図-1 TBM導坑位置

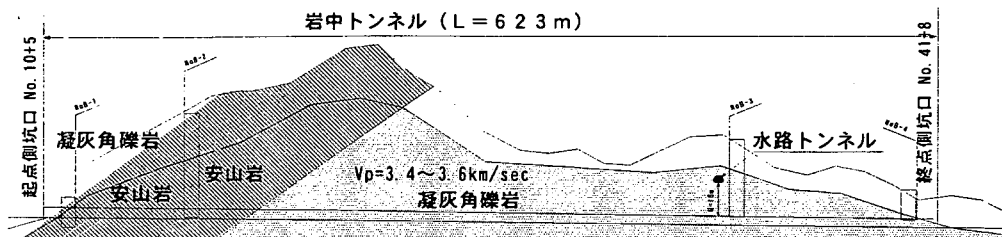


図-2 地質縦断図

3. 分析結果

3.1 TBM掘進データと地質データの相関性

1) 主なデータの推移

TBM導坑の地質状況とTBM掘進データおよび地質試験データの推移を図-3に示す。TBM導坑の地質状況には、岩種、破碎帯の規模と傾斜方向、坑壁の状況(肌落ち、崩落部位)、支保工の種類を示した。TBM掘進の実績によると、起点坑口側の地質は水中で噴出した安山岩質溶岩とハイアロクラスタイト(水中自破碎溶岩)から成り約90m区間にみられた。このハイアロクラスタイトは、基岩の強度は比較的大きいが、き裂が発達し粘土を挟んでいるため、側壁から天端にかけて小崩落の多い状況にあった。そのため、この区間全線に鋼製のリング支保工を採用している。その他の大部分を占める火山礫凝灰岩とトンネルの中央部にある安山岩質溶岩では、各所に破碎帯の存在が認められるが、その規模は小さく比較的安定した地質となっており、支保工の採用は少ない状況であった。

TBM掘進データの推移については、主な掘進データとしてカッタートルク、カッター回転数、推進速度、推進力に着目し、機械能力比(最大能力/実績能力)で表した。TBM掘進運転は、「カッタートルク優先運転」方式をとっている。この方式は、カッター回転数を事前設定(最大能力9rpm)し、カッタートルクをモニタリングしながら同基準値(15t-m)を参考に推進速度を制御するものである。これは、カッター回転数と同トルクが一つの動力源を共有しているためであり、カッター回転数を最大値に設定した場合、同トルクが制限を受けることになる。図中に示すように、カッタートルクの機械能力比50%(15t-m)程度を基準値として運転しているのがわかる。推進速度については、流体輸送設備能力の限界から機械能力比15～55%(最大85mm/min)とあまり上げていない。また、掘削抵抗の応答値となる推進力については、機械能力比が約10～70%の範囲であった。

地質試験データについては、地質状況を示す有力なパラメータとして、MG係数、SH換算強度、き裂密度に着目し、そのトレンドを示した。MG係数は、TBMメイングリッパーによる載荷試験結果から得られた導坑側壁岩盤の疑似的な変形係数を、また、SH換算強度はシュミットハンマー反発度から求めた側壁岩盤の一軸圧縮強度を表す。そして、き裂密度は掘進方向(縦断)および円周方向(横断)における単位長さ当たりのき裂本数で表した。なお、以降の分析に用いるデータについては、TBM掘進データや測定誤差の大きいSH換算強度など局所的なデータのばらつきを抑えるため移動平均値(n=5)を算出して分析した。

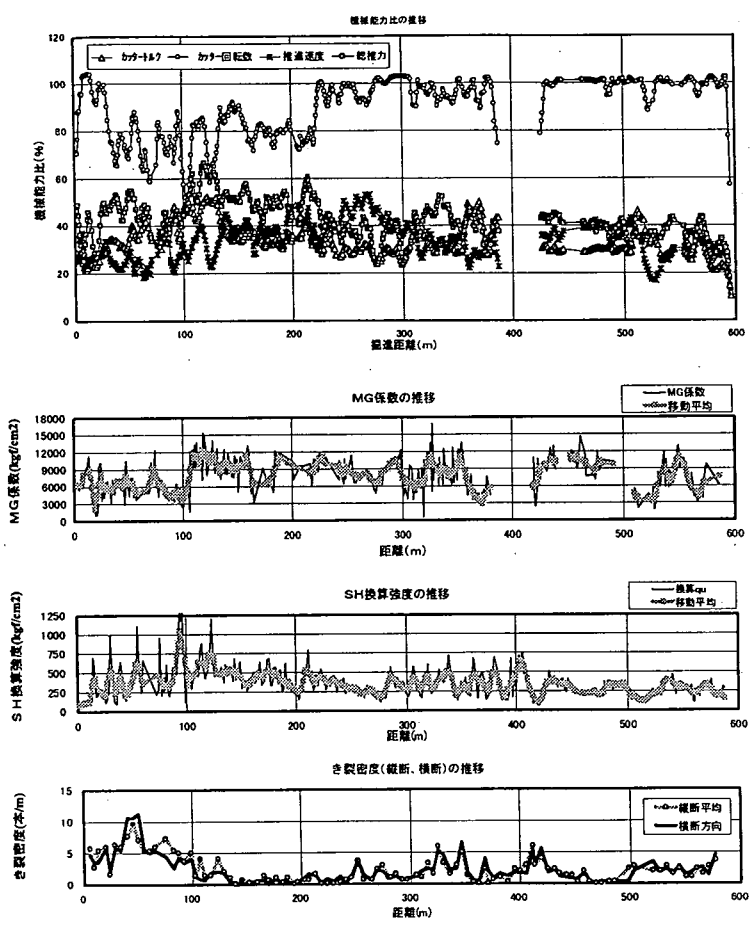
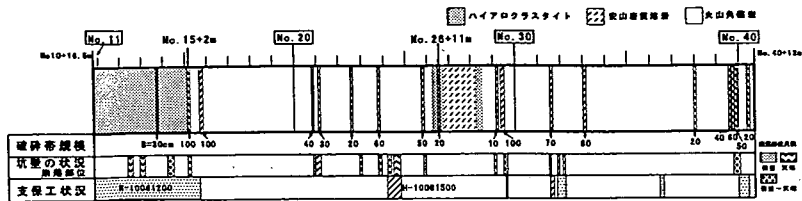
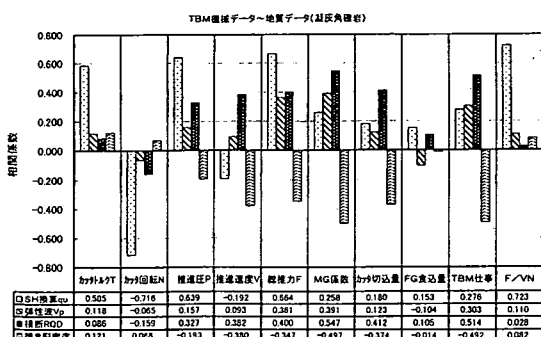


図-3 主な計測データの推移

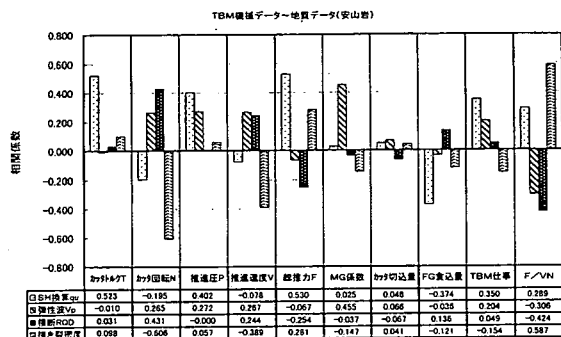
2) 単回帰分析結果

TBM掘進データと地質データの基本的な相関性を確認するために行った単回帰分析の結果を図-4に示す。分析は岩種別に火成岩(安山岩質溶岩、ハイアロクラスタイト)と堆積岩(火山礫凝灰岩)に分類して行った。TBM掘進データはカッタートルクなど10項目、地質データはSH換算強度、弾性波速度、RQD、き裂密度の4項目に着目した。各棒グラフは相関係数を示し、正の相関または負の相関を区別している。図の見方としては、掘進データ毎に4本の棒グラフあり、左からSH換算強度～き裂密度に対応し、その相関係数の値を下表に明記している。なお、RQDの算出に関しては、掘進方向の不連続面間隔をコアの長さと考えて掘進長の百分率で求めた。以降、この値を(疑似)RQD¹⁾と称する。

掘進データ項目のTBM仕事率は、単位時間当たりのTBM仕事量を示したもので、 $[W = F \times V / A]$ により算出する。ここに、W: TBM仕事率(tf-m/min/m²)、F: 推進力(tf)、V: 推進速度(m/min)、A: 掘削断面積(m²)を示す。また、 $[F / VN]$ のF: 推進力、V: 推進速度、N: カッター回転数であるが、本式の採用についての説明は後で述べる。



a) 堆積岩



b) 火成岩

図-4 TBM掘進データと地質データの相関性

図-4 a) 堆積岩において、SH換算強度と関連性の高い掘進データとしては、相関係数の大きい順にカッター回転数、F/VN、推進力となっている。弾性波速度については、全体的に相関係数が小さく、最大でもMG係数の0.4程度の結果となっている。き裂パラメータに関しては、全体的に相関係数が小さいものの、MG係数とTBM仕事率で0.5程度の結果が得られている。既往研究における相関係数をみると、最大でも0.6程度で本分析と同程度の結果となっており、如何にばらつきの大きいデータであるかがわかる。

図-4 b) 火成岩において、SH換算強度と関連性の高い掘進データとしては、カッタートルク、推進力が挙げられる。弾性波速度については堆積岩と同様、全体的に相関係数が小さい。き裂パラメータに関しては、カッター回転数、F/VNの相関係数が比較的大きい結果となっている。

なお、き裂パラメータについては、縦断（掘進方向）と横断（円周方向）に沿って測定しているが、カッター回転に伴って影響する縦断き裂の方が相関係数が大きいため、同データのみ取り扱っている。

3) 重回帰分析結果

ここでは単回帰分析の結果を参考に、ある程度用いる変数を取捨選択し、岩種別に重回帰分析を実施した結果について示す。重回帰分析の変数選択の方法としては、変数増減法（基準値0.15）²⁾を用いた。目的変数である地質データは、SH換算強度とき裂パラメータ（RQD、き裂密度）とし、単回帰分析で全体的に相関の低い弾性波速度については分析を行っていない。

表-1、2に堆積岩および火成岩の分析結果を示す。表中の標準回帰係数において、正符号は正の相関、負符号は負の相関を示し、その絶対値は回帰モデルにおける説明変数の影響度を表す。また、p値は説明変数として意味の変数であるか否かを検定するもので、1%あるいは5%未満値で説明変数として認めることができる。決定係数(R²)は寄与率とも呼ばれ、その値の大小が回帰モデルの適合度の程度を示す。そして、決定係数の正の平方根である重相関係数については、単回帰分析の相関係数と同じ意味をもつ。

表-1 堆積岩の分析結果によると、目的変数をSH換算強度とした場合の重相関係数が0.78と最も大きい。標準回帰係数に着目すると、推進力F、カッター回転数N、推進速度Vの順に影響度が大きいのがわかる。ただし、推進速度のp値が5%を超えているために検定合格していないが、一般的に重相関係数が0.8程度であること、p値が6%程度であること、からほぼ適合した回帰モデルであると判断される。これらの結果から、単回帰分析においてF/VNの変数を用いている。

RQDとき裂密度は、説明変数としてTBM仕事率とMG係数などが選択され、検定合格しているものの、重相関係数が0.6程度で回帰モデルとしてはやや不適合と考えられる。しかしながら、MG係数やTBM仕事率は、単回帰分析の結果からもわかるように、き裂の程度を表す有力な指標であると考えられる。

表－１ 地質データの重回帰分析結果（堆積岩）

目的変数：SH換算強度 重相関係数=0.7825/決定係数=0.6123						
説明変数	回帰係数	標準回帰係数	標準誤差	t 値	p 値	検定
・定数項	430.5301	0.0000	144.5739	2.9779	0.0041	**
・カッター回転数	-33.6193	-0.3072	11.7747	-2.8552	0.0058	**
・推進速度	-2.9318	-0.1524	1.5523	-1.8888	0.0636	
・推進力	2.6816	0.5120	0.5553	4.8293	0.0000	**
目的変数：RQD 重相関係数=0.6109/決定係数=0.3732						
説明変数	回帰係数	標準回帰係数	標準誤差	t 値	p 値	検定
・定数項	85.8488	0.0000	2.3909	35.9061	0.0000	**
・TBM仕事率	0.0008	0.3848	0.0003	2.6730	0.0107	*
・MG係数	0.0053	0.3167	0.0024	2.1995	0.0335	*
目的変数：き裂密度 重相関係数=0.5691/決定係数=0.3239						
説明変数	回帰係数	標準回帰係数	標準誤差	t 値	p 値	検定
・定数項	3.4691	0.0000	0.7802	4.4464	0.0000	**
・TBM仕事率	-0.0016	-0.3321	0.0006	-2.5981	0.0117	*
・MG係数	-0.0002	-0.3206	0.0001	-2.5809	0.0122	*
・カッタートルク	0.0107	0.1579	0.0073	1.4576	0.1500	

表－２ 地質データの重回帰分析結果（火成岩）

目的変数：SH換算強度 重相関係数=0.6047/決定係数=0.3657						
説明変数	回帰係数	標準回帰係数	標準誤差	t 値	p 値	検定
・定数項	-190.2159	0.0000	155.3880	-1.2241	0.2351	
・カッタートルク	3.5193	0.3402	2.1617	1.6280	0.1192	
・推進力	2.3599	0.3526	1.3986	1.6874	0.1071	
目的変数：RQD 重相関係数=0.6908/決定係数=0.4772						
説明変数	回帰係数	標準回帰係数	標準誤差	t 値	p 値	検定
・定数項	-24.5155	0.0000	37.3542	-0.6563	0.5159	
・カッタートルク	0.8421	0.7229	0.2794	3.0135	0.0071	**
・カッター回転数	9.7655	0.7980	2.6724	3.6542	0.0017	**
・推進力	-0.2837	-0.3765	0.1467	-1.9340	0.0682	
目的変数：き裂密度 重相関係数=0.7836/決定係数=0.6140						
説明変数	回帰係数	標準回帰係数	標準誤差	t 値	p 値	検定
・定数項	29.7908	0.0000	6.5173	4.5710	0.0002	**
・カッタートルク	-0.1570	-0.6638	0.0488	-3.2205	0.0045	**
・カッター回転数	-2.3539	-0.9473	0.4663	-5.0484	0.0001	**
・推進力	0.0491	0.3209	0.0256	1.9186	0.0702	

表－３ RMR評価点の重回帰分析結果

目的変数：導坑RMR評価点（堆積岩） 重相関係数=0.7648/決定係数=0.5849						
説明変数	回帰係数	標準回帰係数	標準誤差	t 値	p 値	検定
・定数項	60.5741	0.0000	6.1228	9.8932	0.0000	**
・カッタートルク	1.8865	0.3216	0.6129	3.0794	0.0037	**
・MG係数	0.0011	0.2539	0.0005	2.1258	0.0397	*
・き裂密度	-3.9428	-0.5521	0.8550	-4.6112	0.0000	**
目的変数：導坑RMR評価点（火成岩） 重相関係数=0.7213/決定係数=0.5203						
説明変数	回帰係数	標準回帰係数	標準誤差	t 値	p 値	検定
・定数項	36.5365	0.0000	6.6047	5.5319	0.0000	**
・SH換算強度	0.0234	0.3917	0.0095	2.4643	0.0234	*
・MG係数	0.0030	0.5960	0.0008	3.7499	0.0014	**

表－２火成岩の分析結果では、目的変数をSH換算強度あるいはRQDにした場合、p値検定の不合格が多く、重相関係数もあまり大きくない結果であり、その回帰モデルは不適合と考えられる。ただし、き裂密度の場合は、検定不合格が推進力の7%のみであり、重相関係数0.78程度とほぼ適合した回帰モデルであると考えることができる。3つの目的変数に対する説明変数としては、カッタートルク、推進力が全てに共通し、カッター回転数がき裂パラメータに共通しており、同様な説明変数が選択される傾向にある。

3.2 導坑地山評価と計測データの相関性

導坑支保パターンと密接な関係を示すRMR評価点を目的変数、各種計測データを説明変数として実施した重回帰分析の結果を表-3に示す。堆積岩の結果は、説明変数としてき裂密度、カッタートルク、MG係数が選択され、その影響度は同順に従って大きい。また、火成岩については、MG係数とSH換算強度が説明変数となり、影響度はMG係数の方が大きい。回帰モデルとしては、説明変数の全てが検定合格で、重相関係数も0.72~0.76と比較的大きいため、ほぼ適合しているものと考えられる。

このように堆積岩・火成岩に共通して、MG係数が選択されており、地山物性を示す有力なパラメータであることがわかる。

3.3 分析結果のまとめ

以上の分析結果を要約すると次の通りである。

①岩盤強度（SH換算強度）

き裂の少ない比較的安定した堆積岩においては、掘削抵抗となる推進力F、トルクT、あるいは F/V に比例する関係にある。この点は既往研究成果³⁾と一致しているが、カッター回転数との相関性が比較的高いこと、切込量との比例関係が見いだせないことが異なる結果として得られた。

カッター回転数は事前設定値であるが、単回帰分析結果からもわかるように相関係数の絶対値が0.7程度と最も大きく、岩盤強度に反比例する関係にある。すなわち、カッター回転数は、推進力、トルクに比較して鋭敏な掘削抵抗の応答値となっている。そして、重回帰分析結果でも示すように、 F/VN の指標が岩盤強度と良好な比例関係にある結果が得られた。き裂質の火成岩では、相関性の高い結果は得られなかった。

②き裂パラメータ（RQD、き裂密度）

堆積岩においては、き裂が少ないため掘進データとき裂パラメータの高い相関性は得られなかったが、火成岩においてはトルク、回転数などとの相関性が高く、重回帰分析の結果0.8程度の重相関係数が得られた。

③導坑RMR評価点（支保パターン）

堆積岩・火成岩に共通して、地山の擬似的な変形係数を表すMG係数が高い相関性を示しており、地山性状を反映した有力な指標となる。既往研究によると、岩盤分類の指標としては掘削エネルギー⁴⁾やTBM仕事量³⁾、MG係数などの指標が有力視されているが、今回の解析においてMG係数の有用性を確認した。

4. おわりに

TBM施工において、掘進トラブルを回避するため切羽前方地質を予測することは通常のトンネル以上に重要であり、TSPなどの切羽前方探査技術や掘進データによる地質推定手法、導坑支保パターン選定手法などの確立は重要な課題となる。岩中トンネルの施工事例では、先に示した結果が得られたが、他の岩種・岩質への適用によりデータ集積と分析を深め、より精度の高い推定手法の確立を図りたいと考えている。

<参考文献>

- 1) 社団法人日本トンネル技術協会：秋田自動車道湯田第二トンネル施工に関する調査検討、1994.2
- 2) 垂水共之 他：統計解析ハンドブッケー多変量解析、pp.30~39
- 3) 福井勝則 他：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、1997.2
- 4) 中村創 他：TBM掘進データによる地山判定手法について、土木学会第52回年次学術講演概要集、pp.106~107、1997.9
- 5) 山本浩之 他：TBM掘進データを用いた判別分析による定量的地山評価について、第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.491~496、1998