

(71) TBM掘進における切羽安定手法について

(株)間組 正会員 ○ 大沼和弘
" 山本浩之

The Results of Geological Observation on Tunnelling by a Tunnel Boring Machine(TBM)

Kazuhiro ONUMA, Horoyuki YAMAMOYO, HAZAMA Corporation

Abstract

Excavation by a tunnel boring machine (TBM) is one of the mechanical excavation on tunnelling. TBM enables to shorten construction schedule, but there is always possibility like rock fall which causes the working loss.

Having recorded the operation data of TBM and the geological conditions of excavated surface, close relation between the thrust data, one of TBM operation data, and the geological conditions is found.

During the tunnelling, we run into some troubles like rock fall. It is considered that four geological factors, i.e. Length of section showing low thrust, Scale of fracture zone, Distribution of joint and Water flow, mainly attribute the excavation problems, among them Water in-flow is the first cause.

1. はじめに

山岳トンネルの機械化施工のひとつにトンネルボーリングマシン（以下TBMと略）による施工が挙げられる。TBM工法の導入により、急速施工が可能となるほか、トンネル坑壁が真円となるためのアーチ効果および地山の損傷が小さいことから、支保工の軽減が計られる。しかし、TBM自体が巨大であるため坑内が機械で占有される。このため、切羽の観察が不十分となり、地山状況の把握が困難となっている。また、フォアパイリングなどの補助工法も施工困難である。さらに、坑壁崩壊などのトラブルが発生した場合、工期延長などの施工ロスが発生しがちである。また、TBMは地山が良好な場合進行が速いため、前方の地質調査を目的とした坑内地質調査ボーリングを実施しにくい。このため、現状では、前方の地質状況を予測し、トラブルを回避する方法は限られたものとなっている。

今回、TBM掘削後の坑壁の地質状況（岩種、岩盤等級、破碎帯、シーム・節理、湧水状況など）の観察およびTBMの運転データ（純掘進速度、スラスト推力、カッター電流値、グリッパー圧力）の解析を実施した。ここでは、運転データと地山状況の関係について考察するとともに、実際の施工中に発生したトラブル発生箇所の関係について考察し報告する。

2. 地質概要

トンネル付近の地質は地質構造上、美濃帯に属し、中生代の堆積岩よりなる。坑内で見られた岩種は

チャート、粘板岩およびこれらの互層が主となっている。部分的に砂岩が見られるほか、ひん岩の貫入が見られる。地層の一般的な走向はトンネル進行に対して右手前から左奥に向かって15～30°で斜交し、傾斜は50～70°の流れ盤である。また、進行方向に対する見かけ上の傾斜は25～45°の流れ盤となっている。

チャート、粘板岩はどちらも岩片自体は硬質であり、表-1に示すように一軸圧縮試験は約1,000 kg/cm²である。しかし、層理が発達するものが多く、割れやすい。特にチャートの一部は層内褶曲が著しく不規則に割れる。小規模な破碎帯やシームは多数見られるが、数m以上の破碎幅をもつ大規模な破碎帯は見られない。

地表からの弾性波探査の結果は概ね4.0～5.0 km/sとなっており、一部2.0～3.5 km/sの低速度帯が見られる。

湧水は全域で見られ、部分的に1t/min以上の多量の出水が見られた。

表-1 一軸圧縮試験結果

岩種	供試体数	一軸圧縮強度(平均値)
チャート	25	994 kg/cm ²
粘板岩	31	982 kg/cm ²

3. トンネル施工状況

トンネルは全長約3,000m、掘削径はφ2.600mである。TBMはシールドのないオープンタイプを使用した。貫通までに19ヶ月を要したが、この間に坑壁崩壊などのトラブルにより、17ヶ所において対策工を実施した。表-2に対策工の概要を示す。このうち、トンネル拡幅や薬液注入による岩盤改良といった大規模な対策工を5ヶ所で行っている。

TBMの運転状況データはパソコンにより逐次処理を行った。今回、TBM運転データとして、純掘進速度、スラスト推力、カッター回転モーター使用電流値(以下カッター電流値と略)およびグリッパー圧力を収集している。

さらに、全長においてTBM掘削直後に坑壁の地質観察を行ったほか、坑口において坑内湧水量の測定を行っている。

表-2 トラブル対策工一覧

NO	トラブル概要	ファイバー コンクリート 吹付	鋼リング 支保工 設置	拡 掘	幅 削	薬 液 注 入
A	坑壁の小崩落	○	○			
B	切羽崩落等、TBM カッター回転不能	○	○		○	
C	坑壁の小崩落	○				
D	坑壁の小崩落	○	○			
E	坑壁の小崩落	○	○			
F	切羽崩落、TBM 姿勢制御不能	○	○		○	
G	坑壁の小崩落	○	○			
H	坑壁の小崩落	○	○			
I	坑壁の崩落、比較的大きい	○	○			
J	頂部の崩壊、地山の流出	○	○		○	
K	坑壁の小崩落	○	○			
L	坑壁の小崩落	○	○			
M	切羽の崩壊、地山の流出	○	○		○	○
N	切羽の崩壊、地山の流出	○	○		○	○
O	坑壁の小崩落	○	○			
P	坑壁の小崩落	○	○			
Q	坑壁の小崩落	○				

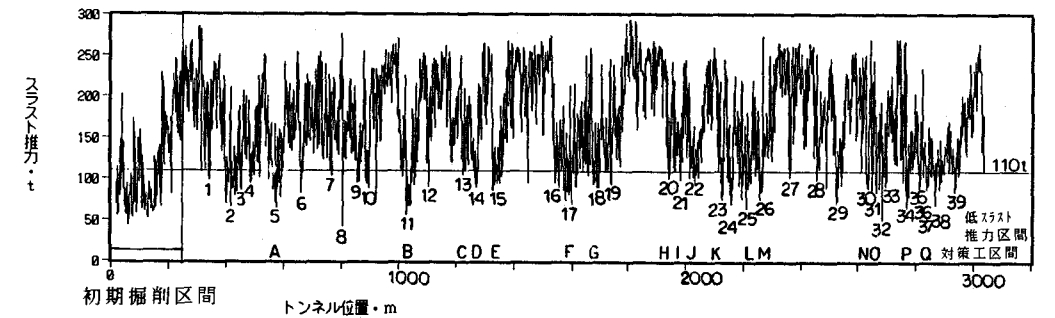
表-3 TBM掘削データの特徴

項 目	内 容	脆弱部 の傾向	地山状況の把握 に対する有効性
純掘進 速度	・(進行/純掘削時間) ・地山脆弱部では、運転者が減速させる。	↑ 上 昇	無効
スラスト 推力	・カッターヘッドを切羽に押付ける力 ・TBM 本体と坑壁との摩擦力 ・屑搬出設備の牽引力 ・掘削速度と関係する	低 下 ↓	・人為的に変化有効 ・一定掘削速度が必要有効
カッター 電流値	・カッターヘッドと地山との回転抵抗力 ・バケットが屑をすくい上げる力 ・屑が大量に発生すると電流値が上昇する	低 下 ↓	・崩落時のばらつきが多い有効
グリッパ ー圧力	・推進反力を得るため、TBM 後部のグリッパーが坑壁を押付ける力 ・坑壁の凹凸により、十分な反力が得られない場合がある	低 下 ↓	・坑壁崩壊時、圧力減少

4. スラスト推力について

TBM運転データは、それぞれ、表－3に示すような特徴を持つ。今回の施工では、地山状況の把握の管理項目として、純掘進速度はオペレーターが30～50mm/minに操作していること、カッター電流値およびグリッパー圧力は切羽や坑壁の状態により影響を受けることから、スラスト推力を用いた。

トンネル内でのスラスト推力の変化を図－1に示す。この図には施工中発生した坑壁崩壊などのトラブルにより対策工を実施した箇所をA～Qと記している。対策工施工箇所ではスラスト推力が低下しており、概ね、110 t以下となっていることがわかる。さらに、初期掘削区間を除いた低スラスト推力を示す区間について、1～39と番号を記している。

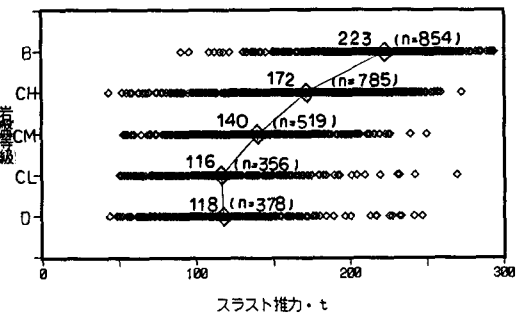


図－1 スラスト推力の変化

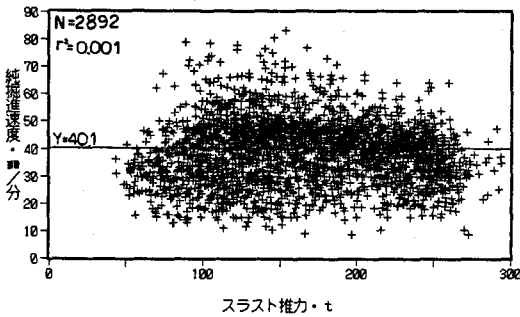
次に、スラスト推力と地質調査結果、他のTBM運転データとの関係を検証する。

岩盤等級との関係を図－2に示す。各岩盤等級ごとのスラスト推力の平均値を記入している。これを見るとCL～D級では明瞭な差は見られないものの、良好な岩盤ほど大きなスラスト推力を示していることがわかる。

他のTBM運転データについては、スラスト推力と純掘進速度の関係を図－3、スラスト推力とカッター電流値の関係を図－4、スラスト推力とグリッパー圧力の関係を図－5に示す。カッター電流値、グリッパー圧力はスラスト推力と相関を示しており、地山状況の把握の管理項目としてスラスト推力と同様に有効であることがわかる。純掘進速度はスラスト推力の変化によらずほぼ一定であり、速度はオペレーターが人為的に操作したものと判断される。



図－2 スラスト推力と岩盤等級の関係



図－3 スラスト推力と純掘進速度の関係

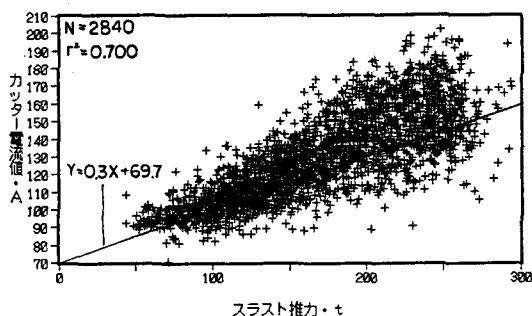


図-4 スラスト推力とカッター電流値の関係

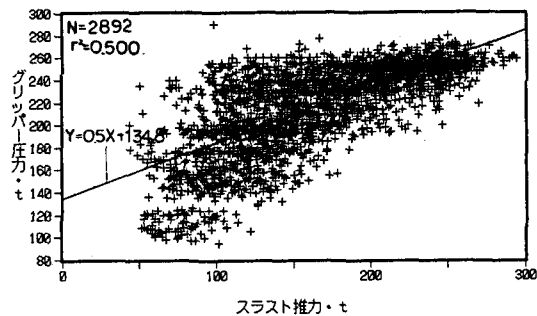


図-5 スラスト推力とグリッパー圧力の関係

5. 対策工施工区間の

地山状況について

スラスト推力の変化が岩盤等級など、地山状況の変化を示すことがわかる。しかし、必ずしもスラスト推力の低下区間において坑壁崩壊などの対策工を施工していない。

この差を明瞭にするため、表-4に示すように、地質上の要因として、低スラスト推力区間(110t以下)の区間長、岩種、岩盤等級、破碎帯数、シーム・節理数、湧水量を取り上げ、考察した。なお、湧水量については、概ね1t/min以上を大量(◎)とした。対策工については坑内拡張や薬液注入を施工した箇所を大規模(◎)としている。N0は図-1に示したものである。

これを見ると、トラブルにつながる要因として、

- ① 低スラスト区間の区間長
- ② 破碎帯の有無・数
- ③ シーム・節理の数・頻度
- ④ 湧水量

が考えられる。特に、大量の湧水が発生した箇所では大規模な対策工が必要になっている。

表-4 低スラスト推力(110t以下)区間一覧

NO	区間長 (m)	岩種	岩盤 等級	破碎帯 幅30cm 以上 (本)	シーム 幅30cm 未満 (本)	湧水量 ◎大量 ○多 △少 ×なし	対策工 ◎大 ○小 ×なし
1	6.6	Alc	CH	1	2	△	×
2	57.2	Ss~Als	CL	1	8	△	×
3	6.9	Ch	CH~CM	0	1	△	×
4	2.4	Ch	CH	0	1	△	×
5	36.9	Als	D	3	2	○	A○
6	6.8	Sl~Alc	CH	0	2	△	×
7	3.3	Ch	CL	0	1	△	×
8	1.6	Ch~Alc	CH~CM	0	1	○	×
9	6.6	Ch	CM	0	2	○	×
10	12.3	Ch	D~CL	1	1	○	×
11	32.6	Ch	D~CL	1	1	◎	B◎
12	1.2	Ch	CH	0	1	○	×
13	9.6	Sl~Ch	CL~CH	0	3	△	C○
14	12.1	Alc	D	0	7	△	D○
15	31.6	Ch	D	1	6	△	E○
16	5.0	Sl	CM	0	2	△	×
17	51.6	Sl~Als	D	1	13	◎	F◎
18	25.1	Ch~Sl	CM	0	3	○	G○
19	2.0	Ch	CM	0	1	△	×
20	2.3	Ch	D	0	2	△	H○
21	5.6	Pt~Ch	D	0	1	○	I○
22	13.5	Alc	D~CL	1	4	◎	J◎
23	5.8	Ch	D	0	1	○	K○
24	21.3	Ch	D	0	4	△	×
25	40.3	Alc	CL	1	10	○	L○
26	12.4	Ch	D	1	2	○	M◎
27	2.4	Ch	CH	0	1	△	×
28	2.3	Ch	CH	0	1	△	×
29	6.9	Ch	CL	0	2	△	×
30	8.0	Ch	D	0	2	◎	N◎
31	3.2	Ch	D	0	1	○	O○
32	1.7	Ch	CL	0	2	△	×
33	2.2	Ch	CL	0	2	△	×
34	10.7	Ch	D	0	4	△	P○
35	7.1	Ch	CL	0	2	△	×
36	2.4	Ch	CL	0	1	△	×
37	9.6	Ch	CL	0	2	△	Q○
38	47.0	Ch	CL	0	13	△	×
39	25.0	Ch	CL~CM	0	6	△	×

Ch: 珸t、Sl: 粘板岩、Ss: 砂岩、Pt: ひん岩
Alc: 珸t粘板岩互層、Als: 砂岩粘板岩互層

6. まとめ

今回、TBMによるトンネル施工に当たり、純掘進速度、スラスト推力、カッター電流値およびグリッパ圧力といったTBM運転データにより掘削管理を行った。この結果、スラスト推力、カッター電流値およびグリッパ圧力の変化は、それぞれ、地山状況の変化に関係し、その把握に有効であると思われる。

TBM施工上、最も問題となる坑壁崩壊などのトラブルの要因としては、スラスト推力低下区間において、その区間長、破碎帯の有無、シーム・節理の頻度および湧水量などが考えられる。この中でも湧水量の影響が大きいと考えられる。

今後、TBMによるトンネル施工に当たっては、スラスト推力により管理を行い、図-6に示すフローに従った施工を提案する。管理値については、当トンネルでは100t以下を要注意箇所として施工したが、この値はTBMの機構や大きさ、地山の違いによって異なると考えられる。一般には、スラスト推力低下区間では、その施工状況により、切羽や坑壁の地質状況の観察、必要により切羽前方の地質調査を行ったうえ、トラブル対策を選定することが必要と考えられる。

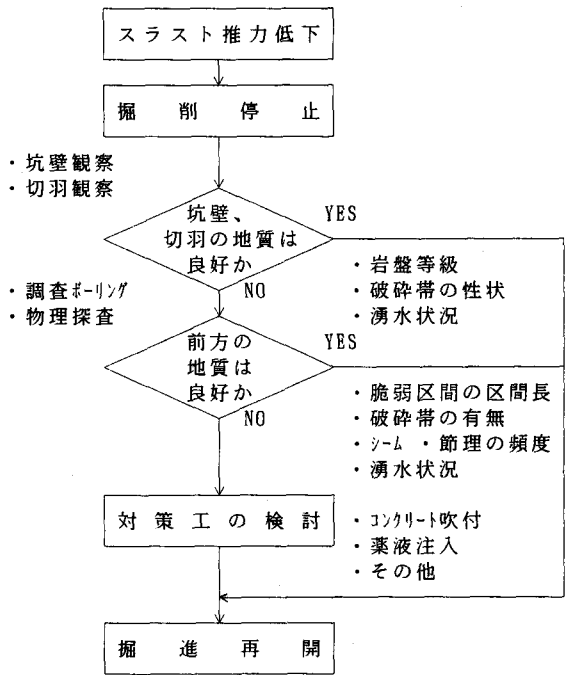


図-6 低スラスト推力区間の施工フロー