

TBM掘進データを用いた地山判定基準の作成 その2

久 慈 雅 栄 井 上 博 之
橋 詰 茂 *1 南 浩 輔

要 旨

TBM(Tunnel Boring Machine)工法は日本の地質に適合するように改良が進んだことにより適用事例は増加しているが、トラブルを未然に防止することがTBMの特徴を引き出す上で重要な課題の1つとなっている。

筆者らは、前報でTBM工事で実際に得られる施工データから、地質的トラブルが発生する前にマシンを停止させる判定基準を作成した。本報では、これを現場で運用するにあたりリアルタイムに判定するために修正を加え、崩壊時のデータを用いて基準値を作成し、その有効性を確認した。その結果、以下のことが明らかになった。

- ①リアルタイムに判定するために、ズリ評価点(18点)、 β 値平均(0.3)、 β 値変動幅(± 0.1)を設定した。
- ②判断基準を再発進区間と地質変化区間で評価した結果、基準はほぼ妥当であった。
- ③判定基準の意味合いは、カッターヘッド近傍で発生している小崩壊のモニタリングと評価された。

キーワード 山岳トンネル/TBM/地山評価

目 次

- | | |
|----------------------|---------------------|
| 1. はじめに | 4. 判定基準値の検証 |
| 2. 実現場への適用に当たっての修正 | 5. トラブル判定基準と地山状態の考察 |
| 3. 崩壊時データによる判定基準値の検討 | 6. 結論 |

STANDARDIZATION OF CRITERIA FOR GEOLOGICAL CONDITION USING BY DRIVING DATA FROM TUNNEL BORING MACHINE (PART 2)

Masayoshi KUJI
Shigeru HASHIZUME

Hiroyuki INOUE
Kosuke MINAMI

Synopsis:

Recently, TBM(Tunnel Boring Machine) has been developed that can adjust to geology of JAPAN, so it has been augmented at construction case. It is important problem for favorable TBM driving that trouble should be prevented.

In last paper, authors standardized the criteria for TBM driving limit, using driving data. In this paper, limit criteria are revised for real-time judgement, and describes are;

- ①For real-time judgement, muck score(18), average of β -number(0.3), variation of β -number(± 0.1) are decided as limit criteria.
- ②These limit criteria are proper on checked at re-start period and geological changing period.
- ③Meaning of limit criteria are monitoring of collapse at near of TBM cutter-head.

* 1 本店 技術本部 技術部

1. はじめに

近年、我が国の複雑な地質にも対応可能なTBM (Tunnel Boring Machine)の開発が進み、施工延長、施工件数ともに増加の傾向にある。TBMは連続掘進が可能であることから急速施工が可能な反面、地質的トラブルによりマシンが停止した場合、復旧には多大な時間と労力を要することになる。したがって、この地質的要因によるトラブルを未然に防止することが、TBMの特徴を引き出す上で重要な課題の1つとなっている。

地質トラブルの評価に重要な地山の安定に関する施工時地質観察は、一般的な山岳トンネルでは切羽で行われる。しかしながら、TBMでは掘削最前線の切羽はカッターヘッドにより覆われ、また掘進中はカッターヘッドが回転しているため、切羽を観察することは非常に困難である。そこで、掘進中に得られる種々の情報から地山の状態を推定し、地質トラブルが発生する前にマシンの停止を判定する基準を作成する目的で研究を行った。

前報¹⁾では、既存のTBMデータを分析し、「地山データ」としての掘削ズリの状態、および「機械データ」のうちトルク、推力、カッター切り込み量の関数である β 値を用いることにより、TBMの掘進限界の判定が可能と評価した。また、地山データの単一指標化、実際の運用を考えたシステムの構築などが課題としてあげられた。

本報では、これらの判定基準を実際に掘進中のTBMに適用して、リアルタイムで判定を行うために、前報で指摘した課題の解決も含めて検討、修正を加えたので、その結果について報告する。

なお、 β 値¹⁾は福井、大久保²⁾が提案している機械データから岩盤強度を推定する1式、2式の係数比で、3式で定義するものである。

$$\sigma_c = \alpha_1 (F/Pe) \quad [1]$$

$$\sigma_c = \alpha_2 (T/Pe^{0.5}) \quad [2]$$

$$\beta = \alpha_1 / \alpha_2 = T / (F \cdot Pe^{0.5}) \quad [3]$$

ここに、 σ_c :岩盤強度[N/m²]

α_1, α_2 :係数

T:カッタートルク[N・m]

F:推力(スラスト)[N]

Pe:切り込み量 = V/N [cm/回]

V:掘進速度[cm/min]

N:カッターヘッド回転数[回/min]

β 値は、順調に掘進している場合にはある範囲内で安定するが、地山崩落などでトルクと推力のバランスが崩れたときにその範囲からはずれていくものと考えられる。

2. 実現場への適用に当たっての修正

2.1 適用現場の概要

今回、TBMの地質トラブルの判定基準を適用した現場の概要を示す。

地質は、第三紀の泥岩優勢の砂岩泥岩互層であり、一

部に砂岩、スランプ性含礫泥岩が分布している。泥岩は比較的しっかりとしており、圧縮強度20Mpa程度を示すものが多い。亀裂の方向は、トンネルにほぼ平行で縦目が優勢である。このため、現場で予想される地質的トラブルは、切羽、天端の崩落が主体と予想された。

TBMの型式は、地質が比較的しっかりとしているとの評価から、改良セミオープン型が採用された。このTBMの型式は、オープン型のTBMの天端と側壁部にサポート板が装着されており、天端や側壁からの崩落に対し機体や作業員を防護する機能が備わっている。サポート板の後方にメイングリップが装着されている。TBMの直径は5.0mである。

なお、前報でデータを評価したTBMはシールドタイプであり、直径2.6mと、本現場のマシンとは異なるものである。

2.2 修正の項目

前報で取り上げられた課題の解決を含め、実現場への適用に当たり、事前に次のような修正を行った。

①掘削ズリ評価の単一指標化

②リアルタイムの判定が可能なシステムの構築

以下、各項目について詳述する。

2.3 掘削ズリ評価の単一指標化

前報では、機械データについては β 値という単一指標を提案できたが、地山データについては掘削ズリの複数の判定項目での評価となっており、現場での判定は煩雑であった。表-1に地山データ項目の評価区分一覧を、表-2に地山データの掘進限界判定基準を示す。

表-1 地山データ項目の評価区分一覧表¹⁾

項目	区分	判断の目安・根拠
ズリの状態	1. 偏平	切削された岩片
	2. 偏平/丸	偏平と丸が混在
	3. 丸	亀裂に沿って剥落
	4. 丸/土砂	丸と土砂が混在
	5. 土砂	破碎された状態
平均粒径	1. 0~30mm	500円硬貨程度
	2. 30~50mm	ピンポン玉程度
	3. 50~100mm	握り拳程度
	4. 100~150mm	ソフトボール程度
	5. 150~200mm	手の平を広げた程度
	6. 200mm以上	
湧水の有無	1. なし	ズリが乾いている
	2. 少量	ズリが湿っている
	3. 多量	ズリが水没している
粘土の含有	1. なし	粘土は含まれず
	2. 少量	粘土含有50%以下
	3. 多量	ズリの50%以上が粘土
ズリの出方	1. 規則的	平山で出てくる
	2. 不規則	山が大きくなる
	3. 不規則かつ大塊	大塊のズリが出てくる

表-2 地山データ掘進限界判断基準⁽¹⁾に加筆)

評価項目	判断基準
ズリの状態	区分 5 =土砂
平均粒径	区分 5 =150mm 以上
湧水の有無	区分 3 =多量
粘土の有無	区分 3 =多量
ズリの出方	区分 2 =不規則

そこで、掘削ズリの判定項目を単一の指標で評価するために、判定項目の各区分に点数を設定し、その合計点を「ズリ評価点」と定義して単一指標化することにした。例えば、表-2の掘進限界の判定基準を表-1の区分の点数で合計すると18点となる。実際の点数付けについては、各項目の重み付け等も考慮して割り振る必要があるが、今回はそこまでのデータが蓄積されていないので、各区分の値をそのまま適用することとした。

また、適用現場の地質条件(泥岩主体、砂岩泥岩互層)を考慮して、地質評価の項目を加えて、最終的に表-3に示す地山データ区分表を用いることとした。

2.4 リアルタイム判定可能なシステムの構築

現場で掘進限界を判定するためには、リアルタイムに判定することが求められる。判定基準のうち、掘削ズリについてはオペレータがズリ出しベルコンのモニタを常時監視できるので対応可能であるが、機械データの β 値に関しては、これまではコンピュータに蓄積されたデータを用いて、TBMの1ストロークの平均値で判定しているためリアルタイム評価への対応は困難であった。

一方、コンピュータや各種センサ、データ通信の進歩により、最近ではTBMの各種データをリアルタイムにモニタリングし、かつ図化处理表示等を行うことが可能な環境となっている。今回適用を行ったTBMでは、機械データのモニタリングを3秒毎に行い、2cm 毎および10cm 毎にデータを蓄積する運転管理システムが採用されている。そこで、この運転管理システムから常時機械データの供給を受けて、TBM運転席に1ストローク毎のリアルタイムモニタ画面を設置し、 β 値等を常時監視できる体制を整えた。

これにより、オペレータは β 値等の機械データの1ストローク内の変化(トレンドグラフ)を常に見ながら運転

できることとなる。

また、上述の運転管理システムでは、運転席のモニタ画面の他に、任意の機械データのリアルタイム経時変化グラフを事務所で監視することができる。したがって、オペレータが現在の掘進状況より崩壊の危険性が高いと判定したときに連絡を入れれば、すぐに職員が事務所で機械データを共有することができ、掘進限界について判定することが可能となった。

3. 崩壊時データによる判定基準値の検討

3.1 崩壊時の判定指標の特徴

TBMにより順調掘進区間(図-1)と、崩壊発生に至る区間(図-2)の判定指標(ズリ評価点、 β 値)のトレンドグラフを示す。図は横軸に掘進位置を、縦軸に β 値とズリ評価点を取り、 β 値についてはリアルタイムデータとストローク平均値を重ねて示した。

図を比較して、つぎのことがわかる。

- ①ズリ評価点は、順調掘進区間では14点~16点で推移しているのに対し、崩壊発生に至る区間では18点から20点へと次第に増加する傾向がある。
- ② β 値のストローク平均値は、順調掘進区間では0.10~0.15で推移しているのに対して、崩壊発生に至る区間では0.15から0.34と次第に上昇する傾向にある。
- ③ β 値のリアルタイムデータは、順調掘進区間ではストローク内でほぼ一定値を示し、変動が非常に小さいのに対して、崩壊発生に至る区間ではストローク内で平均値が上昇する傾向が認められる場合があり、かつ変動が大きくなる。
- ④ β 値のリアルタイムデータの変動幅は、特に崩壊発生に近づくときと大きくなる傾向にある。

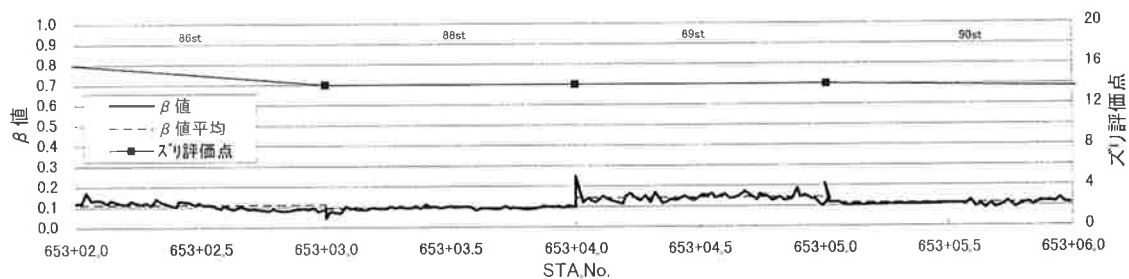
以上考察したように、崩壊発生に至る場合には順調掘進区間に比べてズリ評価点が増加すること、 β 値のストローク平均値が増加すること、 β 値のリアルタイムデータにおける変動が大きくなることが示された。

3.2 判定基準値の検討

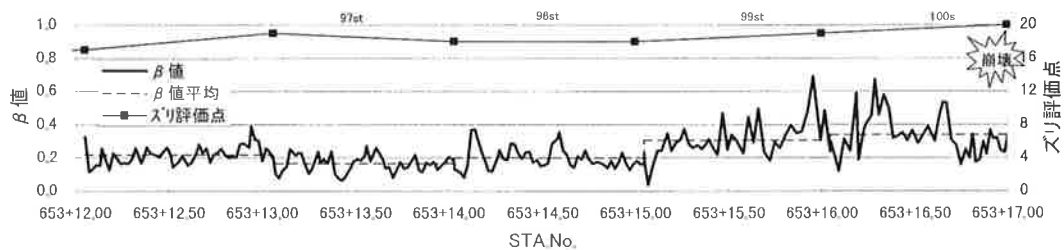
上記の崩壊時の判定指標の特徴より、掘進限界の判定基準値を設定する。

表-3 地山データ区分表

項目	1点	2点	3点	4点	5点	6点
ズリ形状	偏平	偏平と丸(礫)が混在	丸(礫)	丸(礫)と土砂が混在	土砂	—
粘土の含有	なし	わずかな含む	多量に含む	—	—	—
色	灰色(砂岩主体)	黒色混じり(砂頁互層)	黒色(頁岩主体)	茶褐色(風化進行)	その他	—
粒径(mm)	0~30	30~50	50~100	100~150	150~200	200以上
湧水の有無	なし	少量	多量	—	—	—
ズリの出方	規則的 等間隔平山	不規則 山が大きい	不規則 大塊ズリ	—	—	—



図一1 順調掘削区間の判定指標



図一2 崩壊に至る区間の判定指標

(1) ズリ評価点

ズリ評価点については、図一1に示す順調掘進区間では14点～16点を示すのに対して、図一2に示す崩壊発生に至る区間では18点以上を示すことより、18点を目安とすることにした。

この点数は、2.2で述べているように、表一1と表一2の掘進限界基準から求められる評価点と同一である。しかし、本現場では地質の色の指標を加え、泥岩部(3点)が多いことから実質は評価点は15点相当となり、前報での掘進限界よりは余裕を持った基準となっている。

表一4に順調掘進区間と崩壊発生に至る区間でのズリ評価点指標の判定を示す。崩壊発生に至る区間では、ズリ評価点指標のうち平均粒径とズリの出方が敏感に反応している。これは、後述するβ値の上昇と変動の発生の原因を示唆していると考えられる。

表一4 ズリ評価点の推移(順調掘進と崩壊発生)

状態	ST No.	ズリ評価点指標						
		形状	粘土	色	粒径	湧水	出方	合計
順調掘進	86	4	2	3	3	1	1	14
	88	4	2	3	3	1	1	14
	89	4	2	3	3	1	1	14
	90	4	2	3	3	1	1	14
崩壊発生に至る	96	4	3	3	6	1	2	19
	97	4	3	3	4	2	2	18
	98	4	3	3	4	2	2	18
	99	4	3	3	4	2	3	19
	100	4	3	3	5	2	3	20

(2) β値(ストローク平均)

β値のうち、ストローク平均値については、図一1と図一2に示すように、順調掘進区間では0.10～0.15で推移しているのに対して、崩壊発生の直前では0.30以上を示すことから、0.30を目安とすることにした。

この数字は、前報で紹介した亀裂の発達した崩落性の結晶片岩区間と同じ結果となった。前報の現場と本報の現場ではTBMの直径(2.6mと5.0m)、TBMタイプ(フルシールドとセミオープンシールド)、地質(結晶片岩と泥岩優勢砂岩泥岩互層)などの基本部分が違うため、一般的にはトルク、推力と地山との関係は異なるので、当初は掘進限界のβ値は変化すると予想された。これに対し、TBMではトルクと推力のバランス、すなわちβ値はどこでもそれほど変わらないという見方もある。今後、適用現場を増やして評価を行う予定である。

(3) β値(リアルタイムデータの変動)

β値のうちリアルタイムデータの変動については、順調掘進区間では非常に小さいのに対して、崩壊発生に至る区間では変動が大きくかつ崩壊発生に近づくとも変動幅が大きくなる傾向にある。変動の程度を比較するために、表一5に、順調掘進区間のストローク番号86st,88st,89st,90stおよび崩壊発生に至る区間のストローク番号97st,98st,99st,100stのβ値リアルタイムデータの平均値と標準偏差、変動係数(=標準偏差/平均値で定義)を示す。このように、順調掘進区間には平均値も小さく、変動係数も0.1強を示すのに対し、崩壊発生に至る区間では平均値と標準偏差が次第に大きくなり、変動係数も0.3から0.4弱と順調掘進区間の3倍程度となってい

る。特に、崩壊発生の2ストローク前(98st)から1ストローク前(99st)までは、平均値は1.54倍、標準偏差は1.76倍と急増していることがわかる。したがって、 β 値の変動も判定基準の指標になり得るものと判断される。しかし、平均値や標準偏差、変動係数を計算しては、現場でリアルタイムに判定することは難しい。

表－5 β 値特性の推移(順調掘進と崩壊発生)

状態	ST No.	平均値	標準偏差	変動係数
順調掘進	86	0.110	0.0202	0.184
	88	0.094	0.0101	0.107
	89	0.142	0.0219	0.154
	90	0.114	0.0211	0.186
崩壊発生	97	0.164	0.0499	0.304
	98	0.198	0.0651	0.329
	99	0.305	0.1143	0.375
	100	0.337	0.1224	0.363

そこで、トレンドグラフ上で変動についてある程度の目安を付ける方法を考察する。図－2に示すトレンドグラフでは、崩壊発生に至る区間において、99ストロークから変動幅(トレンドグラフの中心値[≡平均値]からのピークの隔たり、半波長)が大きくなり、特に変動幅が0.1を越える大きな変動が目立って増える傾向が読みとれる。この傾向を評価するために、リアルタイムデータにおける2cm毎の β 値の差分の平均(平均差分)を表－6に示す。このデータは表－5に示す標準偏差と似たような評価ではあるが、リアルタイムモニタ画面上での打点の変化の程度を直接的に示すものと考えられる。ただし、いわゆる振幅の平均とは異なるものである。これより、平均差分は順調掘進区間では0.015程度を示すが、崩壊発生に至る過程では0.04から0.10程度まで上昇していることが

表－6 β 値の平均差分

状態	ST No.	平均差分
順調掘進	86	0.0101
	88	0.0069
	89	0.0199
	90	0.0150
崩壊発生	97	0.0403
	98	0.0412
	99	0.1047
	100	0.1096

表－7 掘進限界判定基準値

判断項目	基準値
ズリ評価点	18点
β 値・平均値	0.3
β 値・変動幅	±0.1

β 値はトレンドグラフ上で評価

わかる。図－3より感覚的に捉えた変動幅0.1が、数値的にも裏付けられたと考えられる。

以上より、本現場での β 値のリアルタイムデータの変動幅の目安は、±0.1とすることにした。表－7に新たに設定した判定基準値を示す。

4. 判定基準値の検証

4.1 崩壊区間から自立区間への推移

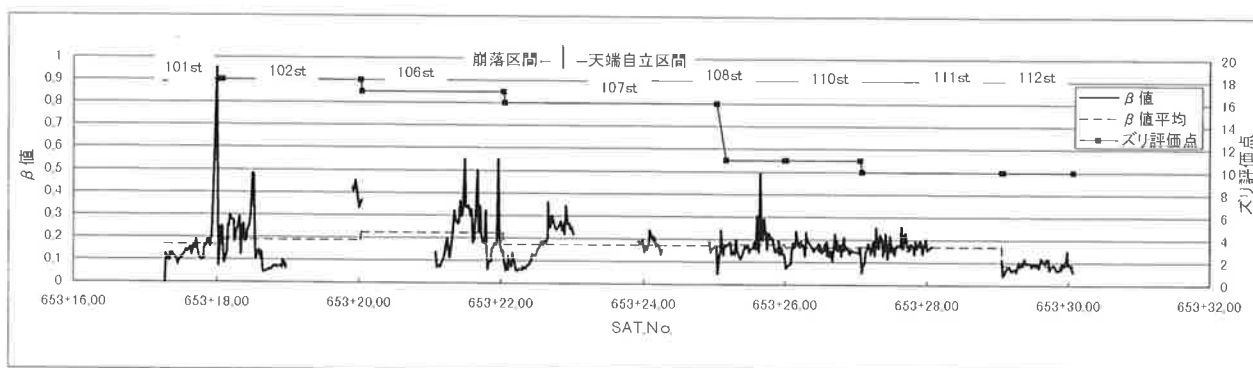
図－3に、崩壊地点で拡幅掘削を行い、再発進した時の崩壊区間から自立区間へ至るズリ評価点と β 値の推移を示す。データ転送のトラブルから、 β 値のリアルタイムデータは途中欠損しており、グラフが見にくくなっている。このうち、崩壊区間ではズリ評価点が18点以上で、 β 値に関しては平均はやや低いものの、変動は非常に大きい。一方、自立区間ではズリ評価点は11点以下、変動も1/3程度に収まっていることが読みとれる。表－8に崩壊区間と自立区間に分けてズリ評価点の傾向を、表－9に同様に β 値の平均と標準偏差、変動係数、平均差分を示したが、明らかに数字の上でも上記が確認できる。ただし、天端自立区間の β 値の各項目は表－5、6に示した順調掘進区間に比べて大きめの値を示している。この原因は、天端自立区間では図－1に示す順調区間に比べて切羽や天端からの小崩壊等が多いためと考えられる。

表－8 ズリ評価点の推移(崩壊区間と自立区間)

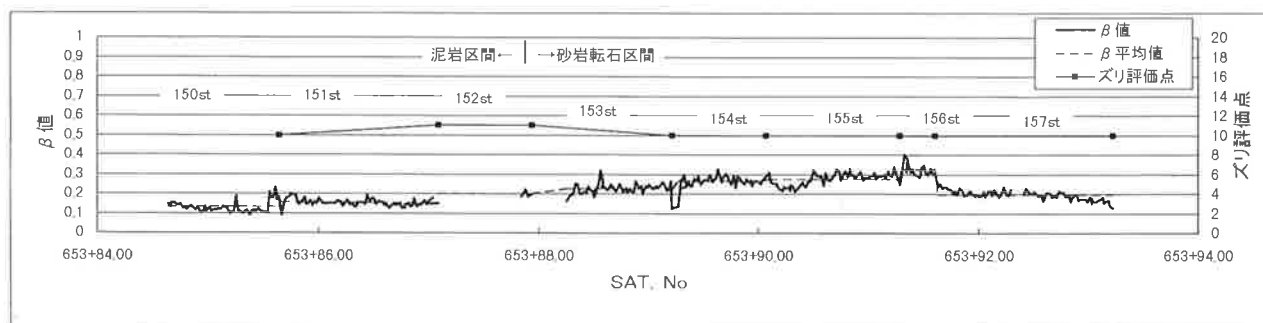
状態	ST No.	ズリ評価点指標						
		形状	粘土	色	粒径	湧水	出方	合計
崩壊区間	101	4	2	3	4	2	3	18
	102	4	2	3	4	2	3	18
	106	4	1	3	5	2	2	17
天端自立区間	107	4	1	3	4	2	2	16
	108	2	1	3	3	1	1	11
	110	2	1	3	3	1	1	11
	111	2	1	3	2	1	1	10
	112	2	1	3	2	1	1	10

表－9 β 値特性の推移(崩壊区間と自立区間)

状態	ST No.	平均値	標準偏差	変動係数	平均差分
崩壊発生区間	101	0.166	0.1491	0.898	0.0645
	102	0.188	0.1258	0.669	0.0495
	106	0.222	0.1182	0.532	0.0739
天端自立区間	107	0.167	0.0740	0.443	0.0256
	108	0.176	0.0639	0.363	0.0493
	110	0.164	0.0322	0.196	0.0322
	111	0.167	0.0378	0.226	0.0369
	112	0.086	0.0193	0.224	0.0131



図一3 崩落区間から自立区間への判定指標の推移



図一4 泥岩区間から砂岩転石区間への判定指標の推移

4.2 地質変化に伴う推移

図一4に、地質変化が認められた地点でのズリ評価点と β 値の推移を示す。図より、 β 値の平均値が上昇して、判定基準の0.3を上回っているものの、実際には切羽および天端ともに安定しており、地山が崩壊する兆候は認められなかった。トレンドグラフにおいても、 β 値は上昇しているものの、変動幅はほとんど変わらず、ズリ評価点も変化していない傾向が認められる。表一10にズリ評価点の推移、表一11に β 値の推移を示す。ズリ評価点は、色(地質)の項目の変化が予想されたが、砂岩が転石状に分布しているため、主体は泥岩として評価され、判定の変化はない。 β 値は数値的には平均値と標準偏差、平均差分は同程度に上昇しており、変動係数はほとんど変わらない傾向を示している。

以上により、地質が変化した場合にはトルクと推力のバランスが変化することから β 値の平均値は変化するものの、変動幅はトラブルが発生している訳ではないので小さい状態となっている。

したがって、前述の判定基準において、 β 値の平均の1項目のみ基準を越えるものの、ズリ評価点と β 値の変動は基準値内であり、問題なしと判定することができた。

5. 掘進限界判定基準と地山状態の考察

前項で地質的トラブルにおける掘進限界判定基準の設定と、判定結果について実績に基づいて述べた。ここでは、この判定基準と地山状態について考察する。

表一10 ズリ評価点の推移(泥岩と砂岩転石)

状態	ST No.	ズリ評価点指標						
		形状	粘土	色	粒形	湧水	出方	合計
泥岩区間	150	2	2	2	2	1	1	10
	151	2	2	2	2	2	1	11
	152	2	2	2	2	2	1	11
砂岩転石区間	153	2	2	2	2	1	1	10
	154	2	2	2	2	1	1	10
	155	2	2	2	2	1	1	10
	156	2	2	2	2	1	1	10
	157	2	2	2	2	1	1	10

表一11 β 値特性の推移(泥岩と砂岩転石)

状態	ST No.	平均値	標準偏差	変動係数	平均差分
泥岩主体区間	150	0.130	0.0294	0.226	0.0181
	151	0.154	0.0179	0.117	0.0141
	152	0.199	0.0127	0.064	0.0164
砂岩転石区間	153	0.226	0.0293	0.129	0.0246
	154	0.265	0.0293	0.111	0.0272
	155	0.277	0.0320	0.116	0.0203
	156	0.325	0.0313	0.096	0.0316
	157	0.196	0.0234	0.120	0.0204

表-12 順調時と小崩落発生時のズリ評価点各指標の特徴

	順調掘進時	小崩落発生時
ズリ形状	カッターにより切削され偏平形状が主体	節理での抜け落ち、分離が多くなり、丸(礫)が主体
粘土の含有		差は少ない
色	砂岩(灰色)の場合、順調掘進が多い	差は少ない
粒径	カッターに切削され 30～50mm が多くなる	節理での分離が多くなり 100mm 以上が多くなる
湧水		湧水が多い地点では小崩落が発生しやすい
ズリの出方	一定の掘進により、規則的となる	一度に大量のズリが排出され不規則で大塊が混じる

掘進限界判定基準は、掘進が不可能になる過程で発生するズリ評価点の上昇、 β 値平均値の上昇、 β 値変動幅の拡大を、掘進停止に陥る前の段階で判定するためのしきい値であると考えることができる。

この指標値の増加の原因は、現場での観察結果、および図-3に示す再発進時の崩落区間で崩落が頻発している場合に指標値が上昇している状況から、掘進中にカッターヘッド近傍の切羽または天端で発生する小崩落が主な原因と考えられる。

この小崩落の発生により、ズリ評価点はどのように変化するか考察する。表-3に示すズリ評価の項目は、地山が安定しておりディスクカッターで切削されている状態に近い区分ほど小さな評価点を、地山が不安定で小崩落等が発生している状態を示す区分ほど大きな評価点を付与している。すなわち、小崩落が発生することにより各区分は大きな評価点が選択されるものと推定される。表-12に小崩落により予想される現象とズリ評価点の各項目の変化についてまとめた。3.2(1)では、ズリの形状については触れなかったが、地山が硬質で安定している場合にはカッターの切削により偏平形状が主体となり、小崩落が発生すると偏平形状から丸(節理での分離すなわち抜け落ちを意味している)と判定される割合が増える。粒径については切削時の 30mm～50mm から小崩落が節理で分離して発生するために 100mm 以上の大塊が増え、ズリの出方については安定した規則的な出方から、崩落岩塊を一度に掻き込むために不規則(大塊ズリ)が増えることになる。

また、 β 値については3式に示すようにトルク、推力、切り込み量の関数であるが、これらの機械データのうち、切羽または天端の小崩落の影響を大きく受けるのはトルクであると考えられる。トルクは4式³⁾で示す2種類の機能に大別される。

$$T = T1 + T2 \quad [4]$$

ここで T : カッターヘッドトルク

$T1$: ローラーカッターによる岩盤破碎のためのトルク

$T2$: カッターヘッド外面と坑壁の摩擦、バケットによる岩ズリのすくい上げのための力、カッターヘッドシール抵抗などを含めたトルク

切羽または天端が小崩落したときには、小崩落した岩塊はカッターヘッドの前面下部にズリとして落下する。つまり、一時的にカッターヘッドのバケットがすくい上げなければならないズリの量が増えることになり、式2のうち $T2$ トルクが通常時よりも上昇し、結果として全体トルクが上昇する。 β 値はトルク値とは 1:1 の関係を示すので、トルク値の上昇は β 値の上昇につながることになる。この一時的なトルク、すなわち β 値の上昇は、通常掘削状況における β 値の上乗せ部分となり、トレンドグラフでのプラスの変動として現れるものと考えられる。

小崩落が1度だけ発生する場合には、 β 値の上昇は小崩落分のズリが取り込まれた時点で解消する。しかし、再度小崩落が発生した場合には、 β 値の変動(上昇)が収まる前に次の変動が発生することになる。これが連続することにより、順調掘削時に比べて β 値の平均が上昇し、かつ変動も大きくなるものと推定される。これらの模式図を図-5に示す。この模式図を裏付ける現象は、例えば図-2における 653+15.5～653+16.3、あるいは図-3における 653+17～653+19、653+21～653+22 付近で見られる。小崩落の頻発は、一度崩落した部分が拡大する場合と考えられ、大崩落に至る前兆ととらえることができるものと考えられる。

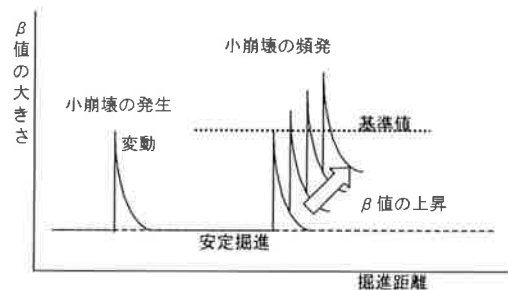


図-5 小崩落による β 値上昇の模式図

以上考察したように、基準値の意味合いは切羽または天端での小崩落の発生状況を機械データ、地山データからリアルタイムに推定する指標と考えることができる。

6. 結論

TBMにおける地質的トラブルの判定基準を設定し、実際のTBMトンネルで適用し、妥当性を検討した。その結果、次のような結論を得た。

①リアルタイムに判定するために、判定基準を次のように変更した。

- ・ズリ評価点(18点以上)
- ・ β 値平均値(0.3以上)
- ・ β 値変動(± 0.1)

②判定基準を適用し、再発進地点と地質変化地点で評価した結果、基準はほぼ妥当であった。

③判定基準の意味合いを検討した結果、カッターヘッド近傍で発生する小崩落をズリ性状、および機械データでリアルタイムにモニタリングしているもので、小崩落が頻発したときに基準値を超えるものと評価される。

この基準の適用により、現場ではリアルタイムデータで地質トラブルの判定を行い、地質状況を予測しながら施工を進めることができています。

今回検討した地質トラブルの判定基準は、一般的なTBMでも容易に入手できる項目に基づいており、他の物件へ展開することは容易である。しかし、その判定基準値については前述の通り各地点で独自に設定する必要がある。

ある。ただし、基本的な考え方については汎用性があると考えているので、掘進時のデータの変化をこのような視点で捉えていれば、たとえ基準値が決まっていなくても十分に判定は可能と考えられる。

残された問題点として、次の項目があげられる。

①ズリ評価点の判定指標についてはほぼ固まったと考えられるが、個々の区分、得点等については、例えば平均粒径の区分数や細粒側の評価について再評価する必要がある。

②本判定指標の適用数を拡大するとともに、判定基準値について再評価を行う。

今後、さらに適用を重ねた段階で改めて紹介していく予定である。

謝辞：本研究に当たり、適宜有益なご助言、ご配慮を頂いた現場職員の方々に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1)橋詰茂，井上博之：TBM掘進データを用いた地山判定基準の作成，前田技術研究所報，vol.41,pp.127～134, 2000
- 2)福井勝則，大久保誠介，本間直樹：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
- 3)日本道路公団技術部：TBM設計・施工の手引き，日本道路公団技術部，p.50, 1998