

TBM掘削指数 (TEI) に基づく TBM施工管理基準の提案

谷本 親伯¹・津坂 仁和^{1*}・山仲 俊一朗²・中根 達人³・平野 實⁴・亀山 克裕⁵

¹大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

²大成建設株式会社 本社 土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

³国土交通省 四国地方整備局 徳島河川国道事務所 (〒770-0803 徳島県徳島市上吉野町3-35)

⁴西松建設株式会社 本社 (〒105-8401 東京都港区虎ノ門1-20-10)

⁵西松建設株式会社 中部支店 土木部 (〒461-8558 愛知県名古屋市中区泉2-25-13)

*E-mail: tsusaka@civil.eng.osaka-u.ac.jp

TBMの総仕事量を、地山掘削に費やされた一次破碎仕事量とそれ以外の破碎に費やされた二次破碎仕事量に区別することに基づいて、その掘削効率や施工管理の基準となる新たな指標として、TBM掘削指数 (TBM Excavation Index, 略してTEI) を提案した。TEIはトルク、スラスト、切込量から算出される。そして、このTEIを同一の掘削径4.5mの改良オープン型TBMで堆積岩地山と火成岩地山に掘削された2つの施工事例に適用した。それらは、ディスクカッタの消費積算基準値を約2.5倍上回る摩耗が生じた事例と、断層破碎帯にてTBMの掘削停止が生じた事例である。結果として、TEIの標準偏差が0.2を閾値として、切込量が不足する非常に硬質な地山状況や地山の变形が著しい軟弱な地山状況を予測できることを示した。

Key Words : TBM, TBM Excavation Index, practical guide, secondary fragmentation, rock condition

1. 緒言

TBM (Tunnel Boring Machine) の施工に伴う問題点として、切込量の低下やディスクカッタの偏摩耗、グリッパの反力不足、掘削ずりの取込過多などがあり、それらは地質要因と関連付けられて整理されている¹⁾。これら他に重要な問題の一つとして二次破碎が挙げられる。一般的に、二次破碎とは、隣接破碎により地山から掘削された岩片が切羽面とカッタヘッドの間にたまり再破碎される現象を指す。施工中には、カッタヘッドやスクレーパ、ゲージカッタの摩耗や損傷によって認知される。これまでの研究において、掘削ずりの取込量を増加させるためにスクレーパの形状を改善し、二次破碎エネルギーを低減させた事例²⁾や掘削ずりの形状から二次破碎に関する考察を試みているもの³⁾などがある。TBM施工においては、TBMに投入されるエネルギーを高い効率で岩盤掘削に消費するために、二次破碎によるエネルギー損失をできるだけ抑える必要がある。

一方、TBMの機械データを用いた地山評価や施工状況の把握を試みる研究として、福井ら⁴⁾の推定岩盤強度式や青木ら⁵⁾のトルクの変動係数、橋詰ら⁶⁾の β 値などが挙げられる。しかしながら、二次破碎を定量的に評価し、

TBMの掘削性を論じた研究は少なく、それに基づいた施工管理基準は提案されていない。

そこで本論文では、二次破碎を考慮した施工管理基準を提案する。はじめに、TBMが行う総仕事量を一次破碎仕事量と二次破碎仕事量の和として考える。ここで、一次破碎仕事量を直接地山の掘削に寄与した仕事量と、二次破碎仕事量をそれ以外の仕事量と定義する。ここで、二次破碎仕事量としては、一般的に周知された二次破碎に費やされる仕事量やカッタヘッドの底部にたまった掘削ずりを掻き揚げる際に費やされる仕事量、地山の变形やトンネルの線形によってTBM機体にかかる摩擦抵抗力、後続台車などを牽引する際に費やされる仕事量などが考えられる。

次に、ディスクカッタによる岩石切削理論に基づいて、Sanio⁷⁾などにより、切削機械の仕事量がほぼ全て岩石の掘削に使用される理想的な掘削状況下にあるディスクカッタの背分力と主分力の理論式が導かれている。この仮定された掘削状況は、掘削に要したエネルギーが全て一次破碎に費やされた場合であり、現実のTBM施工においては、一次破碎による掘削が順調に行われている場合と同義として仮定することができる。一方、岩盤を対象としたTBM掘削においては、二次破碎により、一次破

砕以外にもエネルギーが費やされるため、理論的なトルクや推力と実際のTBM機械データから得られるそれらとの間に相違が生じる。そこで、本研究ではこの理論値からの相違に着目する。実際のTBM機械データに現れるトルクと推力の比を理論式より導かれるそれらの比で除した値を「TBM掘削指数 (TBM Excavation Index)」（以下、TEIと省略する）として定義する。このTEIを2件のTBM施工事例に適用し、掘削効率や地山性状の評価を行った。

2. TBM掘削指数 (TBM Excavation Index) の提案

Sanio⁷⁾は、き裂のない岩石に対してディスクカッタを垂直に押付け、直線上を移動させながら切削した場合の理論的な掘削抵抗として以下の式を導いている。

$$F_n = Sk \cdot (d \cdot S \cdot p)^{0.5} \cdot \tan \frac{\phi}{2} \quad (1)$$

$$F_r = 0.8 \left(\frac{p}{d} \right)^{0.5} \cdot F_n \quad (2)$$

ここで、 F_n ：カッタ押付け力 (kN)、 F_r ：カッタ転がり抵抗 (kN)、 Sk ：切削定数 (kN/mm^{1.5})、 d ：カッタ径 (mm)、 S ：カッタ間隔 (mm)、 p ：切込量 (mm/rev)、 ϕ ：カッタ刃先角度 (°) を示す。なお、切削定数は理論的には求めることはできず、岩石の強度、破碎過程における放射状き裂の数や破碎部の形状に依存するとされる。Gongら⁸⁾が行った室内円周切削実験においてもSanioの理論式がほぼ成立することが示されている。

そこで、式(1)、式(2)よりTBMの推力とトルクは以下のようになる。

$$F_N = n \cdot F_n \quad (3)$$

$$T_R = \sum_{k=1}^n r_k \cdot F_r \quad (4)$$

ここで、 F_N ：TBMの推力 (kN)、 T_R ：TBMのトルク (kN・m)、 n ：カッタ個数 (個)、 r_k ： k 番目のカッタの取付半径 (m) である。さて、TBMが行った一次破碎仕事を考える場合、推力が行った仕事量およびトルクが行った仕事量をそれぞれ算出する必要があるが、式(3)と式(4)中には未知数である切削定数が含まれているため、実際には求めることはできない。そこで、トルクを推力で除すことによって切削定数を消去し、理論式から求まるトルクと推力の比を、TBMの総仕事量が全て一次破碎に費やされる理想状態の基準値として、TBMの掘削効率を考察することとする。式(3)、(4)よりトルクを推力で除すと、次式が得られる。

$$\frac{T_R}{F_N} = \frac{0.8 \sum_{k=1}^n r_k}{n \cdot d^{0.5}} \cdot p^{0.5} = m \times p^{0.5} = G_T \quad (5)$$

TBMによりき裂のない岩盤を掘削し、その総仕事量が全て一次破碎に費やされたと仮定すると、機械データより得られるトルクと推力の比は式(5)の $m \cdot p^{0.5}$ に近い値となる。そこで、TBM施工実績から求まるトルクと推力の比を G_p とし、これと理論から求まる G_T との比を「TBM掘削指数 (TBM Excavation Index)」として定義する。これを次式で表す。

$$TEI = \frac{G_p}{G_T} \quad (6)$$

TBMの総仕事量が全て一次破碎に費やされている場合、TEIは1に近い値となり、逆に1から遠ざかる程、切羽の崩落や周辺地山の变形により、二次破碎仕事量が大いことを示す。さらに、理想と実績の相違は $|1 - TEI|$ で表すことができ、この値を「二次破碎率」と定義する。

3. 対象トンネルの地山性状と掘進速度

(1) 対象トンネルの概要

Aトンネルは、TBMの掘進延長が2,590mであり、掘削に約8ヶ月を要した。使用されたTBMの諸元を表-1に示す。地質は、主に中生代白亜紀の砂岩と頁岩から成る。トンネル縦断面における実施支保工、事前調査における地山弾性波速度、純掘削量、単位掘削体積当りのディスクカッタ平均摩耗量 (以下、摩耗量とする)、TEI、10ストローク毎のTEIの標準偏差、TEIに基づく二次破碎率を図-1に示す。ここで、純掘削量とはTBMの1次データとして得られるスラストジャッキの単位変化量である純掘進速度 V_n (m/h) に掘削断面積 A (m²) をかけた値である。また、摩耗量の算出方法は既報⁹⁾に譲る。まず、ト

表-1 TBM諸元

項目	主要諸元
機種	改良オープン型TBM
掘削径 (m)	4.5
総重量 (kN)	2,734
最大推力 (kN)	8,036 (補助推力 4,155)
カッタヘッドトルク (kN・m)	1,372 - 1,470
総出力 (kW)	1,110
推進ストローク (mm)	1,500
カッタ回転速度 (rpm)	1.25 - 10.0
カッタ数	32
カッタ材質	SNCM
カッタ径 (mm)	432

ンネル全長を地質区分に基づいて、頁岩・砂岩層区間（a区間，T.D.0～448m），砂岩層区間（b区間，T.D.448～1,680m），砂岩・頁岩層区間（c区間，T.D.1,680～2,085m），頁岩層区間（d区間，T.D.2,085～2,590m）の4区間に分割する．摩耗量の推移には，旧日本道路公団のTBM積算資料¹⁰により算出された各支保区分別のディスクカッタの積算摩耗量が示されている．これより，b区間のT.D.780～900m，T.D.1,020～1,300m，およびT.D.1,430～1,670mの3つの区間（以下，b-1，b-2，b-3区間とする）において，支保区分に基づく積算の最大値であるBに設定される基準値を大きく上回る摩耗が生じている．

一方，Bトンネルは，TBMの掘進延長が2,795mであり，掘削に約20ヶ月を要した．使用されたTBMはAトンネルと同一である．地質は概ね，中生代白亜紀後期の流紋岩と，中生代前期の花崗斑岩から成る．事前の地質調査により一軸圧縮強さは，流紋岩は軟質部で50MPa前後，硬質部で400MPa前後であり，花崗斑岩は約100MPaである．トンネル縦断面における実施支保工，事前調査における地山弾性波速度，純掘削量，摩耗量，TEI，10ストローク毎のTEIの標準偏差，二次破碎率を図-2に示す．施工

においては，事前調査で得られていたとおり6ヶ所の断層が存在し，それぞれの断層周辺には粘土が介在するき裂が高密度で分布していた．そして，図-2に示すとおり，これらの断層掘削直後のT.D.1,885m付近とT.D.2,071m付近において，TBMの掘進停止を余儀なくされた．その主たる原因は，TBMのチャンバー内へ多量の土砂が流入したことにより，ベルトコンベヤが過負荷となったためであった．また，両地点においてTBMの掘進再開に約8週間を要した．

(2) 地山性状と掘進速度の関係

これまでにTBMの掘削速度と地山性状の関係として，純掘削速度と岩石の一軸圧縮強さには有意な相関関係がないことや，一方，掘進速度と弾性波速度および一軸圧縮強さと割れ目指数の3乗との積，切込量とき裂係数には有意な相関関係があることが示されてきた^{11)~14)}．

今回，Aトンネルにおいては，トンネル坑内の11地点において径45mm，深度2mのボーリングを実施し，採取されたコアを用いて，一軸圧縮試験，圧裂引張試験，弾性波速度測定，石英含有率測定を行った．図-1にボーリ

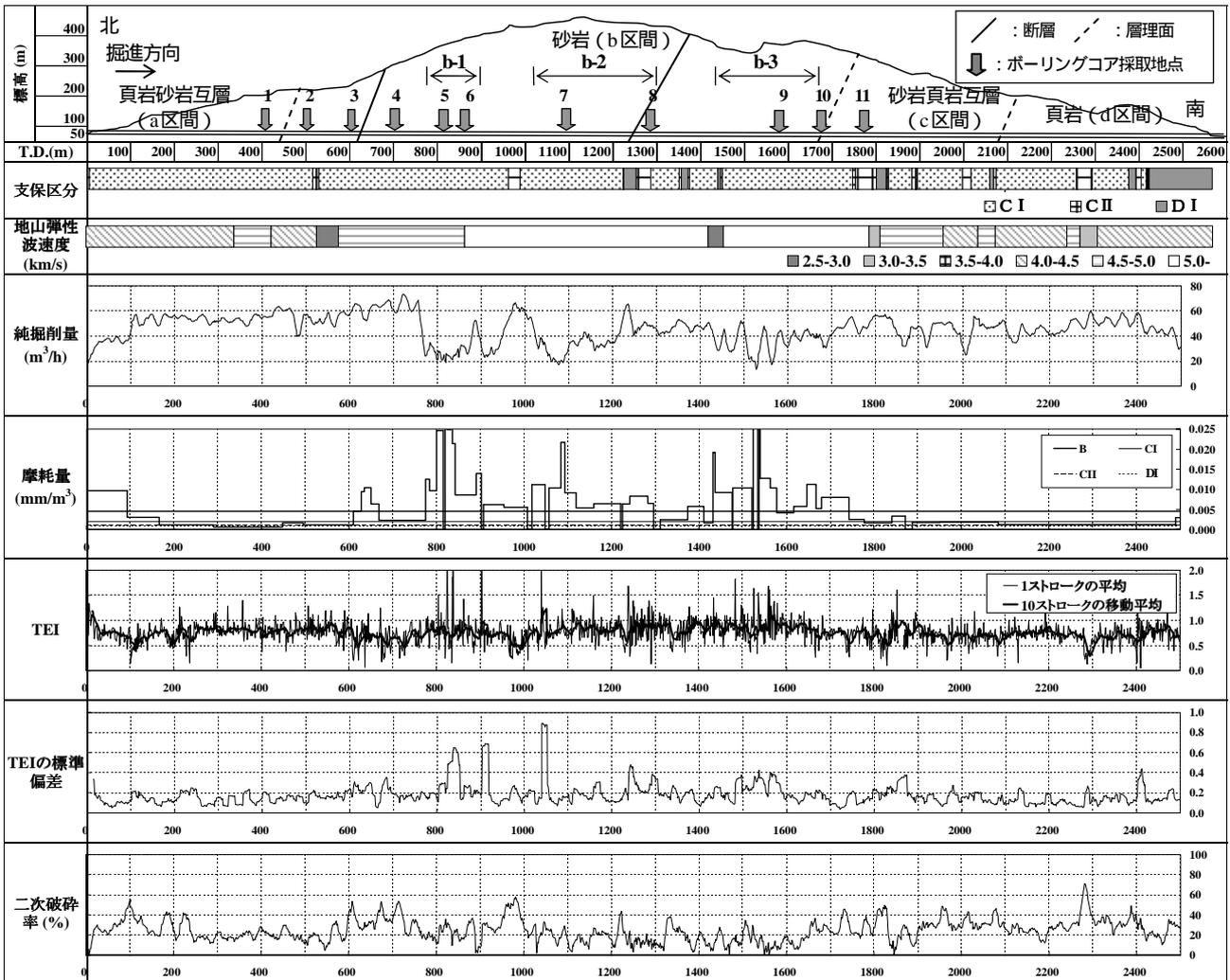


図-1 Aトンネルにおける実施支保工，地山弾性波速度，純掘削量，摩耗量，TEI，TEIの標準偏差，二次破碎率の推移

ングの実施位置を示す。また、トンネル縦断方向に対する153地点において掘削ずりを用いたISRM指針¹⁵⁾に準ずる点載荷強度試験を行った。一方、Bトンネルにおいては、トンネル縦断方向に対する62地点においてトンネル坑壁に対してシュミットロックハンマー反発値(以下、SH値とする)を測定した。これらの物理試験結果を用いて、TBMの掘進速度と地山性状との関係を調査した。TBMの掘進速度を表す指標として切込量とカッターヘッド回転数の積である純掘進速度を、地山性状を示す物理

試験結果として、Aトンネルでは一軸圧縮強さ、点載荷強度指数、脆性度を、BトンネルではSH値を用いた。その結果を図-3と4に示す。ただし、点載荷強度指数はボーリングを実施した地点の近傍で得られた掘削ずりによって求められた値である。図-3と4には、旧日本道路公団の積算基準¹⁰⁾に基づく、支保区分ごとの純掘進速度が示してあり、また、図中の番号は図-3のボーリングコア採取位置と一致する。図-3より、純掘進速度は、一軸圧縮強さと有意な相関関係が得られない、しかし、その値を



図-2 Bトンネルにおける実施支保工、地山弾性波速度、純掘削量、摩耗量、TEI、TEIの標準偏差、二次破砕率の推移

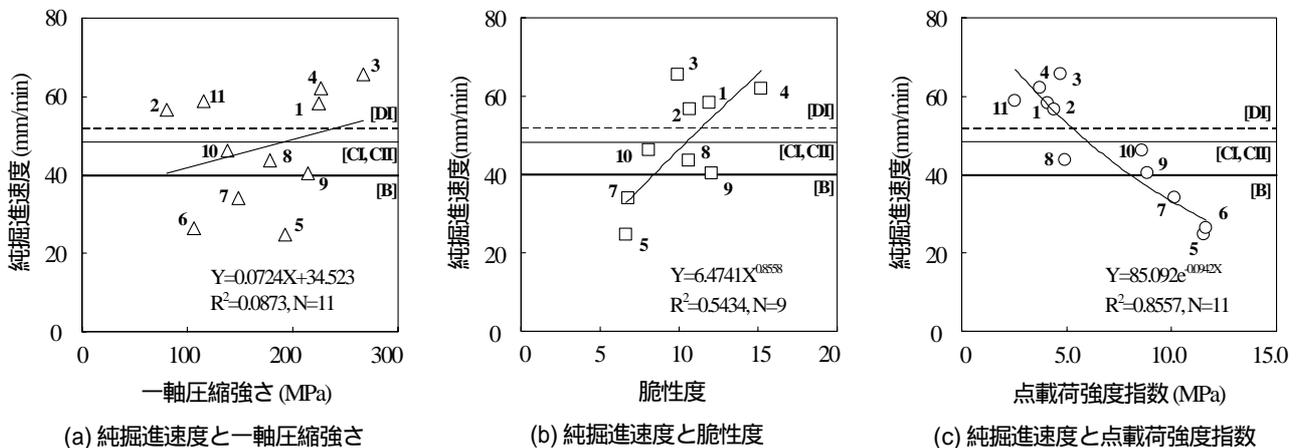


図-3 Aトンネルにおける純掘進速度と地山物性値の関係

圧裂引張強度で除して求められる脆性度とは有意な相関が見られる。また、点載荷強度指数においても有意な相関関係が見られる。脆性度との関係から、「しわい岩」よりも「さくい岩」の方がTBMの掘進速度は大きくなると考えられる。また、図-4より、SH値も一軸圧縮強度と同様に、純掘進速度との間に有意な相関関係は見られない。このように、岩石物性のうち、点載荷強度指数と脆性度は、純掘進速度と有意な相関関係があり、TBMの施工計画やその施工管理の一助となり得ると考えられる。

(3) TBM掘削指数 (TEI) による地山評価

a) Aトンネルの場合

TEIの推移に基づいて過剰摩耗が発生した地山状況の把握を試みる。はじめに、図-1に示すTEIの10サイクルの移動平均に着目すると、積算値を大きく上回る過剰摩耗が発生したb-1、b-2およびb-3の3区間と摩耗量が積算値以下であるT.D.100～600mにおける同値は、ともに0.8前後で推移し明瞭な違いは見られない。次に、TEIの1ストロークごとの変動に着目すると、過剰摩耗の生じた3区間では他の区間と比較して大きく変動している。そこで、各区間におけるTEIの平均値と標準偏差を表-2に示す。同表より、両者のTEIの平均値に大きな相違はみられないが、その標準偏差は前者の方が後者に比べ1.5倍程度大きい。さらに、その変動と摩耗量の関係から、ほとんどの地点でTEIの標準偏差が0.2未満であるのに対し、過剰摩耗の3区間では、TEIの標準偏差の上昇が確認でき、0.2以上となっている。よって、TEIそのものではなく、TEIの標準偏差に着目することにより、過剰摩耗が発生する地山状況を把握することができ、その基準値は0.2であると考えられる。

次に、このようなTEIの変動に関して、既往の事例に基づいて整理された地質要因とそれに伴うTBM施工現象との関係¹⁾から、過剰摩耗が発生するような地山を掘削する場合、トルクと切込量に顕著な変動が生じると考えられる。したがって、過剰摩耗が発生した3区間と他の区間におけるトルクと切込量の平均と標準偏差を表-3

に示す。同表より、トルクの平均値や標準偏差に大きな相違はみられないが、切込量の平均値は、過剰摩耗の生じた区間が他の区間比べて低く、また、標準偏差もやや大きくなっている傾向が認められる。ここで、これらの区間の切込量の変動状況を考察するに当たり、切込量の平均値に違いが見られたため、それぞれの区間の標準偏差を用いて、単純に変動の大きさを比較することはできない。そこで、異なるグループ間のデータの変動を比較する場合に有効な指標である、変動係数を用いて考察する。表-3より、過剰摩耗の生じた3区間では、切込量の変動係数が他の区間のそれと比較して2～4倍大きい。したがって、TEIの変動が過剰摩耗が発生した3区間において、他の区間と比較して大きくなった原因は、トルクの変動よりも切込量の変動が顕著であったためと考えられる。

また、二次破砕率に着目すると、過剰摩耗が生じた3区間においては、その値が20%前後で推移している。これより、同区間の純掘削量は30m³/hと掘進速度は低いものの、TBMの総仕事量のうち比較的高い割合で一次破砕に消費されており、掘削効率としては良好であると考えられる。そして、同区間では、所期の破砕の進展が比較的困難であったため、ディスクカッタが同一岩盤上を何度も回転し、摩耗量が増大したと考えられる。

b) Bトンネルの場合

Bトンネルでは、T.D.1,885mと2,071mにおいて、TBMの掘進停止が生じた。Aトンネル同様に、両地点におけるTEIの標準偏差の推移に着目すると、T.D.1,885m付近では0.2を超えるが、T.D.2,071m付近では0.18程度である。T.D.1,885m付近では、掘進停止の約5m手前から掘削ずりに土砂が含まれ始め、掘進に伴って掘削ずりの取込量が徐々に多くなったことで、推力に対するトルクの割合が大きくなり、TEIの変動として把握することができたと考えられる。一方、T.D.2,071m付近では、突然のチャンパー内への土砂流入により、TBMが停止された。したがって、このような突発的な現象を機械データの変動としてとらえることができなかったために、TEIに反映されなかったと考えられる。

また、二次破砕率に着目すると、最大の月進速度

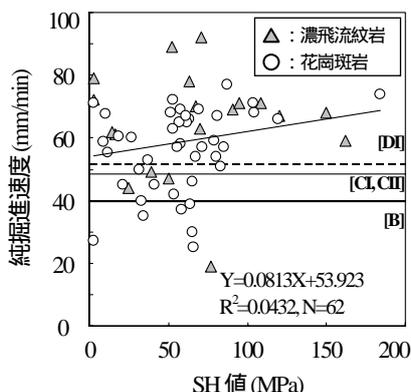


図-4 純掘進速度とSH値の関係

表-2 TEIの変動

地質区分	TEI	
	平均	標準偏差
a	0.79	0.16
b-1	0.78	0.33
b-2	0.84	0.29
b-3	0.87	0.25
c	0.72	0.18
d	0.69	0.18
全体	0.76	0.23

表-3 トルクと切込量の変動

地質区分	トルク (kN)		切込量 (mm/rev)		
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	変動係数
a	394.9	137.8	8.7	1.9	0.22
b-1	298.3	111.8	2.9	2.5	0.86
b-2	360.7	124.2	6.1	4.2	0.70
b-3	438.2	130.5	5.1	3.2	0.63
c	348.6	127.0	7.0	2.7	0.38
d	357.2	131.6	6.9	2.5	0.37
全体	347.9	136.7	7.1	3.5	0.50

(439.5m/month)を記録したT.D.422.1mから861.6mにおいては、その値が20%程度で推移し、二次破砕率が低い状態で良好な掘進がなされていたと判断できる。さらに、TBMが停止したT.D.1,885m付近より、純掘削量は概ね60m³/hから30m³/hに低下し、それに伴って、二次破砕率は約30%から70%近くまで上昇している。そして、同地点付近を境にして、5本の断層破砕帯が存在することや支保区分がCパターン主体からDパターン主体へと変化することに伴って、全体的な二次破砕率の推移が40%以下から40%以上へと変化する。このように、地山性状が悪化することにより二次破砕率が上昇したと考えられる。

4. 結言

本研究では、TBMが行う総仕事量を一次破砕仕事量と二次破砕仕事量の和として考えることに基づいて、TBM施工実績のトルクと推力の比と岩石を用いたのディスクカッタの切削理論式に基づくそれらとの比を比較することにより、新たなTBM施工の管理指針としてTBM掘削指数 (TEI) を定義した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 岩石の点載荷強度指と脆性度はスラスト推進速度と有意な相関関係があり、TBMの施工計画やその施工管理の一助となり得る。
- (2) ディスクカッタの過剰摩耗が生じた事例や切羽の崩落が生じTBMの掘進が停止した事例において、TEIの標準偏差に着目することにより、地山状況を把握することができ、その基準となる変動は0.2である。
- (3) 切羽や天端の突発的な崩落現象をTEIの変動から予測することは難しい。

参考文献

- 1) 社団法人日本トンネル技術協会：TBMハンドブック，pp.73，2000。

- 2) 三谷 哲，岩井孝幸，飯酒孟久夫：TBM貫入速度の予測について - 硬岩地質における小断面TBMの事例研究 - : 応用地質，第26巻，pp.157-173，1985。
- 3) 福井勝則，大久保誠介，工藤正彦，高山正志，谷卓也：TBMの掘削ずりに関する研究，資源・素材学会平成10年度秋季大会講演要旨集，pp.1-4，1998。
- 4) 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.122，pp.303-308，1996。
- 5) 青木智幸，島屋 進，谷 卓也：TBM掘削時のカッタトルクの変動に着目した切羽観察技術，大成建設技術研究所報，Vol.32，pp.65-68，1999。
- 6) 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。
- 7) Sanio, H.P.: Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 22 (3), pp. 153-161, 1985.
- 8) Gong Framing, 佐藤一彦，浅井秀明：円周軌道掘削における岩石の切削抵抗 - ディスクカッタによる岩石の切削に関する研究 (第1報) - ，資源と素材，Vol.108，pp.557-562，1992。
- 9) 谷本親伯，山仲俊一朗，津坂仁和，中根達人，平野實，神崎 浩，阿部 俊，岩田修一：TBM施工におけるディスクカッタの摩耗と岩石の物性に関する研究，材料，pp.29-36，2006。
- 10) 日本道路公団監修：日本道路公団土木工事積算基準 平成15年度版，34-14，2003。
- 11) 土木学会岩盤力学委員会編：わが国におけるトンネル掘進機の実績と展望，pp.183-184，1976。
- 12) 池田和彦，西松裕一：全断面方式トンネル掘進機の地質に対する適用性，応用地質，第22巻，pp.203-207，1981。
- 13) 三谷 哲，岩井孝幸，飯酒孟久夫，永沢 毅：TBM (トンネルボーリングマシン) の施工性と地山条件の関係について - 硬岩地質における小断面TBMの事例研究 - : 応用地質，第26巻1号，pp.10-21，1985。
- 14) 石山宏二，荒井紀之，稲葉 力，平野 享，中川浩二：TBMの施工性に及ぼす岩盤物性と機械要因の影響，第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.410-414，1992。
- 15) ISRM.: Suggested method for determining point load strength, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 22 (2), pp. 51-60, 1985. .

A PROPOSAL OF PRACTICAL GUIDE FOR TBM TUNNELING BASED ON TBM EXCAVATION INDEX

Chikaosa TANIMOTO, Kimikazu TSUSAKA, Shunichiro YAMANAKA,
Tatsuto NAKANE, Minoru HIRANO and Katsuhiko KAMEYAMA

In order to establish a useful and practical guide for TBM tunneling, several ideas and concepts have been proposed up to the present. Considering the papers in the past, the authors propose the concept of the TBM Excavation Index (TEI), which is based on dividing the total TBM's workload into the primary fragmentation for excavation and the secondary fragmentation for the other activities. And it is calculated with TBM torque, thrust and penetration, excluding any uncertain constant. This concept came from the analyses of TBM application to sedimentary and metamorphic rock formations. In conclusion, the standard deviation of 0.2 in the TEI clearly suggests the remarkable variation in geology.