

TBM施工における掘削ずりと二次破碎の評価

津坂 仁和^{1*}・谷本 親伯²・中根達人³・上野 宇顕²・小泉 悠²

¹日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 幌延深地層研究ユニット
(〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432番2)

²大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 (〒560-0871 大阪府吹田市山田丘2丁目1番)

³国土交通省 四国地方整備局 港湾空港部 港湾計画課 (〒760-8554 香川県高松市サンポート3番33号)

*E-mail: tsusaka.kimikazu@jaea.go.jp

TBM施工で生じる掘削ずりの形状は、その掘削状況や地山性状を表す指標の一つとして認識されており、地山に隣接破碎が生じて掘削されたずりの形状は扁平なものとなる傾向にある。一方、き裂の著しく発達した地山を掘削し、二次破碎が著しく生じる場合は不均一な多面体となる。筆者らは、花崗岩地山を掘削径5mのTBMにより掘削した事例を対象として、掘削ずりの形状と二次破碎の関係を考察した。採取した掘削ずりの寸法と重量を測定し、典型的なずりの形状を5つに分類し、それらの形状を長径と厚さの比で表した。そして、筆者らの提案したTBM掘削指数による二次破碎率が30%以下となる掘削状況下での掘削ずりの形状は、粒径が37.5mm以上、扁平度が3.5以上であることを明らかにした。

Key Words : Tunnel boring machine, Hard rock, Secondary fragmentation, Chip shape, Flatness,

1. 緒言

山岳トンネルにおけるTBM (Tunnel Boring Machine) 施工は、発破掘削に比べ掘削に伴う坑道周辺地山の緩みを非常に小さく抑え、月進1,000m以上の高速掘進を可能とする。これまでに、地下発電所建設に伴う水路の施工や大断面のトンネル施工に伴う先進導坑掘削などに用いられ、今後は、高レベル放射性廃棄物の処分場の建設においても期待される掘削技術の一つである。しかし、これまでの日本における施工実績を概観すると、切込量の低下やディスクカッタの偏摩耗、グリッパーの反力不足、掘削ずりの取込過多などの問題が生じ、その掘進速度は著しく低下してしまった事例が多数報告されている。1990年代後半から現在までの掘削径5.0mのTBM施工実績21件¹⁾における平均月進（ここでは、単純に施工延長を施工期間で除した月進と定義する）は約250m（堆積岩系の地山では約240m、火成岩系の地山では約280m）である。このような実績に基づく、月進300m以上を記録したTBM施工は概ね順調であったと評価しなければならない。

TBMの掘進速度が低下する主要な原因として、岩盤中のき裂に起因して生じる二次破碎現象が挙げられる。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さす。この二次破碎現象により、カッタヘ

ッドやスクレーパ、カッタヘッド外周部に取り付けられたディスクカッタの過剰摩耗や損傷が生じる。そして、それらの補修や交換のために、著しく時間と費用が消費されてしまう。したがって、TBM施工において、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は、二次破碎に伴うエネルギー損失をできるだけ抑える必要がある。これまでに筆者ら²⁾は、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とに区別し、推力やトルク、切込量などのTBM機械データを考察してきた。その中で、TBMの施工管理の基準となる新たな指標としてTBM掘削指数 (TEI) とそれに基づく二次破碎率を提案した。そして、これまでに6つのTBM施工事例にTEIを適用し、掘削に伴う二次破碎と地山性状の関係を考察してきた^{2), 3)}。また、二次破碎に関しては、筆者らの他にも、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することによって、二次破碎に伴う掘削エネルギーの損傷を低減させた事例⁴⁾や掘削ずりの形状と二次破碎の関係を概念的に示した報告⁵⁾などが見られる。

TBM施工の掘削ずりの形状は、その地山性状や掘削状態を表す指標の一つとして認識されている。ディスクカッタによる地山の隣接破碎によって生じた掘削ずりの形状は、扁平なものとなり、その幅はディスクカッタの間隔と概ね等しくなる。一方、き裂の発達した地山を掘

削し、二次破碎が著しく生じる場合は不均一な多面体となる。現場技術者は、TBM施工において切羽全体を直接観察できない代わりに、このようなずりの形状を観察することにより、地山性状の把握を行っている。

そこで、本研究では、花崗岩地山を掘削径5.0mのTBMにより掘削した事例を対象として、TBM掘削総延長約3,700mのうち約1,000mにわたって、約20m毎に掘削ずり採取するとともに、地山状況の異なる三つの地点において、それぞれ100から200kgの掘削ずりを採取し、詳細な形状の観察を行った。そして、掘削ずりの形状とTEIから算出される二次破碎率の関係を考察した。

2. TBM施工における掘削ずりに関する既往の研究

これまでにTBM施工における地山性状や掘削状況と掘削ずりの関係に関する知見は、掘削ずりの形状、粒径、重量に着目したものに大別できる。

はじめに、掘削ずりの形状に着目した知見として、地山性状との関係を考察した研究⁹⁾があり、硬質な地山において薄く扁平な掘削ずりが、軟質およびき裂の多い地山において厚いブロック状の掘削ずりが観察される傾向にあることが示されている。さらに、より詳細な考察として、福井ら^{5), 7)}は、掘削ずりの長径と厚さを両対数軸にとった関係図上において、地山性状と二次破碎の概念図を提案し、TBMが理想的に掘削された場合の掘削ずりの厚さと長径の比を統計的に求めている。一方、谷

本ら⁸⁾は掘削ずりの形状を表す指標として扁平率を用い、扁平率および地山物性値とディスクカッタの摩耗量の関係を考察している。扁平率と点載荷強度指数および石英含有率の関係から、対象とした事例において、ディスクカッタの摩耗量が増大すると、扁平率が大きくなることを確認するとともに、掘削ずりの形状と摩耗量の関係についても示している。

次に、掘削ずりの粒径に関する知見として、渡辺ら⁹⁾は30, 20, 10mmのふるいを用いて、掘削ずりの簡便なふるい分けを行い、提案した岩盤分類ごとの残留百分率を求めている。また、橋詰・井上¹⁰⁾および久慈ら¹¹⁾は掘削ずりの粒径と状態から、ずり評価点を提案し、その評価点と地山性状の関係を考察している。そして、崩落が生じた地点では、ずり評価点がある一定の点数を超えるなどの知見を得ている。

そして、掘削ずりの重量に着目した知見として、稲生ら¹²⁾は単位時間当たりの掘削ずりの重量変化から地山性状についての評価を試みている。その結果、地山不良部では、単位時間当りの掘削ずりの重量の差がある一定の値を超えることを指摘している。

以上に述べたTBM施工における地山性状および掘削状況と掘削ずりに関するこれまでの研究について、対象となったTBMの掘削径と岩種、着目した物理量、得られた知見を表-1に示す。二次破碎現象と掘削ずりの形状の関係については、福井ら⁵⁾の概念的な指摘以外は見られない。

表-1 TBM施工における掘削ずりに関する既往の研究

研究者	TBM径 (m)	岩種	着目した物理量	得られた知見
University of Trondheim, The Norwegian Institute of Technology ⁶⁾	不明	片麻岩, 千枚岩, アルコース砂岩, ソーシュライト, トロニエム岩	SieverのJ値 (SJ値) 岩の割れやすさの指数S ₂₀	・SJおよびS₂₀と典型的な掘削ずりの形状の関係を提案。 ・軟質な地山および高スラストになると、厚い掘削ずりの発生。 ・硬質な地山では、薄い掘削ずりの発生。 ・き裂の多い岩盤では、掘削ずりの表面にき裂や節理面を持ち、立方体の形状の掘削ずりの発生。
渡辺ら ⁹⁾	3.3	片岩	粒径 (ふるい分けによる)	・提案した岩盤分類ごとの残留百分率の関係。 ・良好な地山においてはずりの粒径が20～30mm。
橋詰ら ¹⁰⁾ ・久慈ら ¹¹⁾	2.6, 5.0	結晶片岩, 花崗岩, 砂岩, 泥岩	粒径 (ふるい分けによる)	・ずり評価点の提案 (評価項目は形状, 粒径, 湧水の有無, 粘土の有無, そして, ずりの出方)。 ・ずり評価点がある点数を超えると、崩落の発生。
稲生ら ¹²⁾	不明	不明	全体の重量	・地質不良部では、1時間当りの掘削ずりの量がある一定の重量を超過。
福井ら ^{5), 7)}	8.3	砂岩	寸法 (長径, 短径, 厚さ), 粒径 (ふるい分けによる)	・掘削ずりの形状による地山性状と二次破碎の概念図の提案。 ・厚さは長径の約0.2倍。 ・掘削ずりの粒度分布の予測式を提案 ($CDF = 1 - \exp \{ -(1.87D/L)^{0.88} \}$), ここで, CDF: 粒度分布の予測式, D: 粒径, L: 刃物間隔と切込深さの幾何的平均)。
谷本ら ⁸⁾	4.5	砂岩, 頁岩	寸法 (長辺s, 短辺t, 厚さd)	・扁平率fの提案 ($f = ((s+t)/2-d)/(s+t)/2$)。 ・ディスクカッタ摩耗量が著しい硬質な地山において、掘削ずりの扁平率fが大。

3. 対象トンネルの概要

対象トンネルは、総延長3,692m、TBM掘削径5.0mの自動車専用道付設の避難用トンネルである。使用されたTBMの諸元を表-2に示す。地質は、飛騨外縁帯に属する古第三紀前期の花崗岩であり、最大被り厚は約280mである。トンネル縦断方向の詳細な岩石の分布を調べるために、約100m毎22地点において、トンネル底盤より高さ約1mの側壁面の法線方向に、径76mm、深度1.5から2.0mのボーリングを行った。それらのコアを用いた岩石試験結果に基づく各物性の平均値は、一軸圧縮強さは約130MPa、脆性度は約17、弾性波速度（P波）は約5.5km/sであり、石英含有率は約28.4%であった。これより、花崗岩としては、一般的な岩石物性を有すると判断される。

4. TBM施工における掘削ずりの形状

(1) 典型的な掘削ずりの形状

本検討では、採取した掘削ずりの中で、JIS規格に準ずるふるい分け試験を実施し、粒径37.5mm以上の計865個を対象とした。これまでの知見^{10), 13)}に基づいて、採取した全ての掘削ずりを、その形状に着目して5種類（形状ⅠからⅤ）に分類した。代表的なずりを図-1に示す。

同図において、形状Ⅰは、一般的にTBM施工において扁平な掘削ずりと判断され、隣接破砕が適切に生じた際に採取される掘削ずりと考えられる。形状Ⅱは、形状Ⅰの掘削ずりに潜在的な弱面が存在し、それに沿って破砕した結果生じたと考えられる。形状Ⅰの長径を半分程度にした形状と同型である。形状Ⅲは、切込量が2mm/rev以下と非常に小さい場合に生じた掘削ずりであり、その厚さが非常に薄く、隣接破砕は生じているものの切込量が不足したために生じたものと考えられる。形状Ⅳは、切羽に分布する不連続面に沿って抜け落ちた掘削ずりであり、そのいくつかの表面にせん断破壊面が見られる。形状Ⅴは、著しく不連続面が発達した地山を掘削した際に生じたずりであり、歪んだ角柱状である。

以上から、対象としたTBM施工において典型的に採取される掘削ずりの形状は、主として隣接破砕により生じた扁平な掘削ずりとして形状ⅠからⅢと、主として地山に分布する不連続面の影響により生じたブロック状の掘削ずりとして形状ⅣおよびⅤの5種類に分類できる。

(2) 掘削ずりの扁平度

掘削ずりの寸法の計測にあたっては、福井ら⁹⁾が示す模式図に倣い、その長径 s 、短径 t 、厚さ d を測定し、その重量を計測した。ここで、短径 t はTBMに装備されるディスクカッタの間隔に、厚さ d は切込量に依存してい

ると考えられる。そして、今回対象としたTBMのカッタ間隔は50から70mmであった。また、これまでの施工実績から、厚さ d が薄く、長径 s が大きいものが扁平な

表-2 対象トンネルのTBM諸元

諸 元	値
TBM型式	改良オープン型
掘削径 (m)	5.0
重量 (kN)	2,087
総推力 (kN)	9,800
カッタトルク (kN・m)	2,430
総出力 (kW)	1,420
掘進ストローク(mm)	1,500
カッタヘッド回転速度 (rpm)	0.8 - 10.0
カッタ個数	35
カッタ材質	SNCM, HD
カッタ径(mm)	432

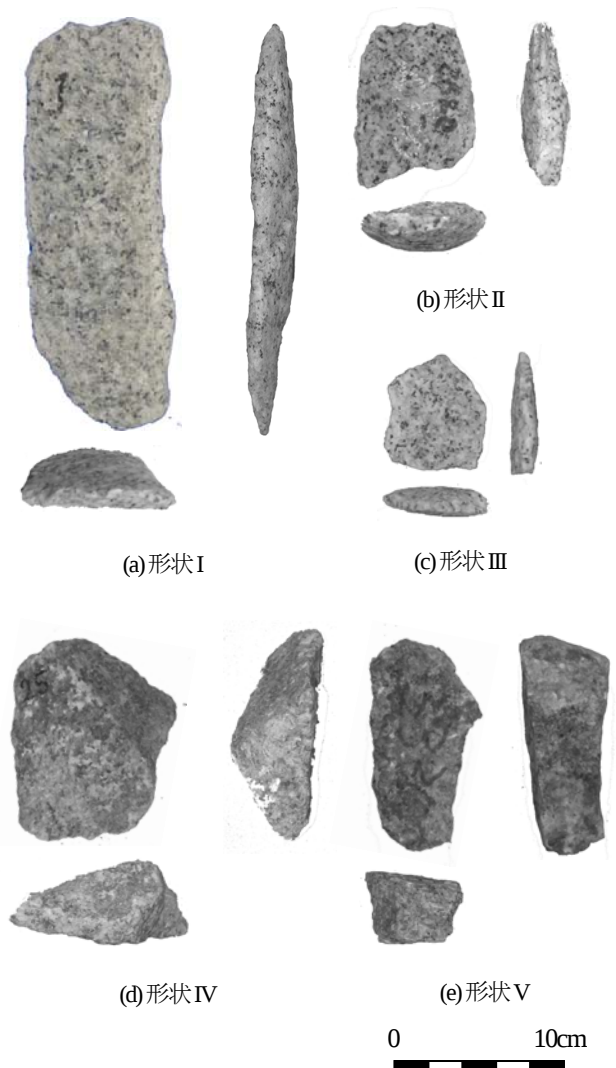


図-1 掘削ずりの形状

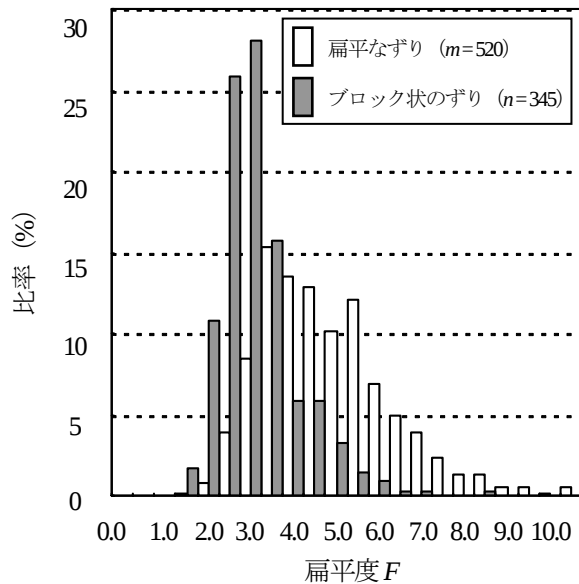


図-2 扁平な掘削ずりとブロック状の掘削ずりの扁平度 F の比較

形状と判断されている。したがって、福井ら⁹⁾と同様に長径 s と厚さ d の関係に着目し、掘削ずりの形状を表す指標として長径 s を厚さ d により除した値を扁平度 F とする。

$$F = \frac{s}{d} \quad (1)$$

対象トンネルで採取した扁平なずり（形状Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ）とブロック状のずり（形状Ⅳ，Ⅴ）の扁平度 F を算出し、階級幅0.5について、その頻度分布を求めた結果を図-2に示す。同図より、扁平と判断された掘削ずりの扁平度 F は2から15に分布し最頻値は3.5，中央値は4.0である。ただし、扁平度 F が10より大きいものは10に含めて示した。一方、ブロック状と判断された掘削ずりの扁平度 F は1から8に分布し最頻値は3.0，中央値は2.5であった。ここで、扁平度 F は、扁平と判断された掘削ずりの81%が3.5以上であり、ブロック状と判断された掘削ずりの84%が3.5未満であった。したがって、扁平度 F が3.5以上の掘削ずりは、扁平な掘削ずりと分類され、主として隣接破砕により生じたものと判断できる。

(3) 掘削ずりの表面形状

掘削ずりの表面形状（ラフネス）はその形状とともに、切羽の不連続面の頻度の程度を知る重要な指標である。切羽にき裂が多く分布する場合、掘削ずりの形状は形状ⅣやⅤといったブロック状となり、その多面体のいくつかの面に切羽に分布していた不連続面が存在することとなる。特に、せん断破壊に伴って表面が磨かれることにより生じる結晶面の筋である条線や摩耗痕による鏡肌は、それを判断するための有力な手がかりとなる。

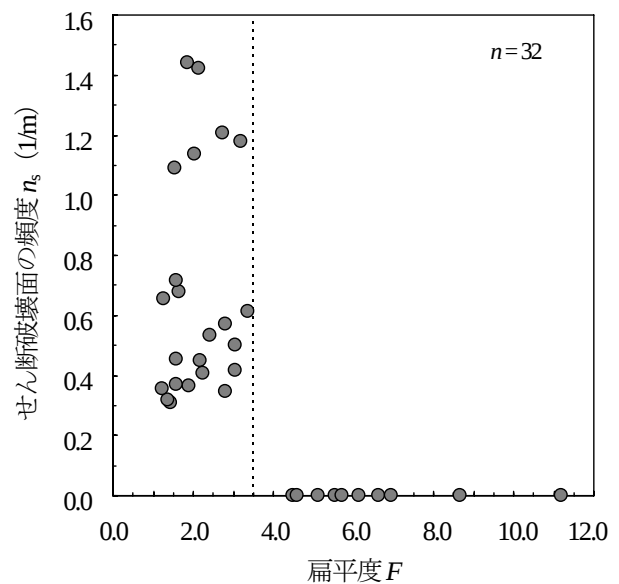


図-3 扁平度 F とせん断破壊面の頻度 n_s の関係

そこで、岩盤の単位体積当りの不連続面の面積によって表されるき裂頻度の概念¹⁴⁾に基づいて、掘削ずりのせん断破壊面の頻度 n_s (1/m) を定義する。すなわち、掘削ずりに存在するせん断破壊面の総面積 A_t (m²) をその体積 V (m³) で除した値として、次式で表す。

$$n_s = \frac{\sum_{i=1}^k A_i}{V} \quad (2)$$

ただし、掘削ずりのせん断破壊面の面積は、対象となる面をデジタルカメラによって撮影した写真を用いて算出した。

T.D.（トンネル距離程）2,400m以降で連続的に採取した32個の掘削ずりを対象として、扁平度 F とせん断破壊面の頻度 n_s の関係を図-3に示す。同図より、扁平度 F が3.5以上の掘削ずりは、せん断破壊面の頻度 n_s は0となる。すなわち、切羽に分布するせん断破壊による不連続面の存在が掘削ずりの形状に大きく影響を与え、扁平度 F が3.5以上であれば、その影響をほとんど受けずに生じた掘削ずりと考えられる。

5. 掘削ずりの形状と二次破砕率

対象トンネルの縦断方向における実施支保区分、地山弾性波速度、TEI、二次破砕率、そして、TEIの標準偏差のそれぞれの分布および推移を図-4に示す。ここで、実施支保の4つの区分（B-T，CI-T，CII-TおよびD-T）は旧日本道路公団の設計支保パターン¹⁵⁾に準拠している。また、二次破砕率の推移は10mの移動平均を用いた。二次

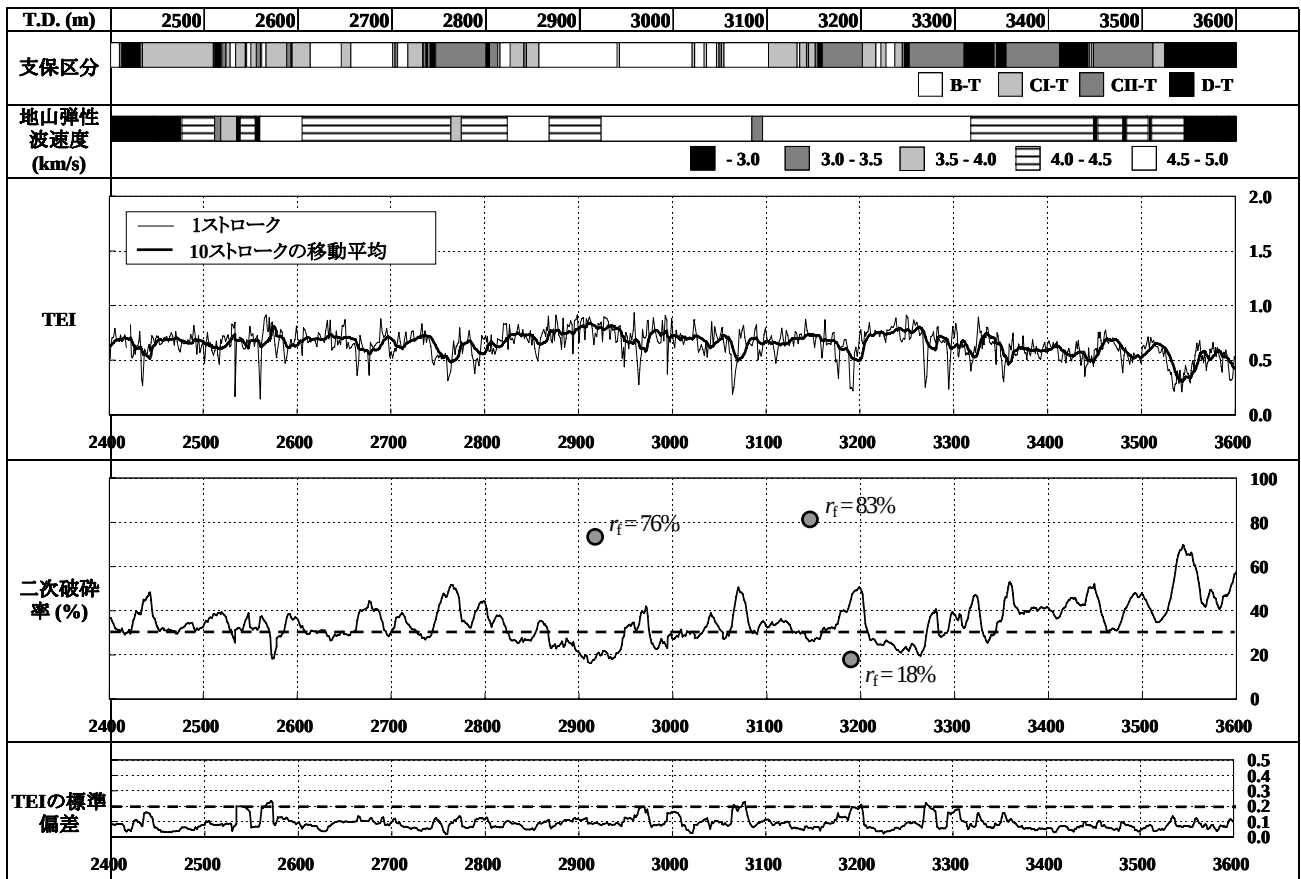


図-4 対象トンネルにおける二次破砕率と扁平重量百分率 r_f の関係

破砕率に関する既往の研究^{2), 3)}から、その値が20から30%の範囲で推移している場合、ディスクカッタにより適切に隣接破砕が生じ、掘進に対する二次破砕現象の影響は小さく、順調な掘削が行われていると評価できる。対象トンネルにおいては、全体を通して20から70%の範囲で変動し、特に、T.D. 2,630から2,660m, T.D. 2,825から2,853m, T.D. 2,880から2,930m, T.D. 2,975から3,030m, T.D. 3,130から3,160m, そして、T.D. 3,210から3,270mにおいては、掘削径の4倍 (20m) 以上の距離を二次破砕率が30%以下で推移する。また、TEIの標準偏差に関する既往の研究^{2), 3)}に基づく、その値が0.2を上回る地点において、著しい地山性状の変化が認められることが示されている。対象トンネルにおいては、いくつかの地点においてその値が0.2程度を示すが、TBMの掘進が停止されるような特に大きな施工上の問題は生じていない。

二次破砕率と掘削ずりの形状の関係を考察するために、任意の地点において無作為に採取した掘削ずりの総重量 M (kg) に対する扁平度 F が3.5以上の掘削ずりの重量 m (kg) の割合を示す指標として、式(3)で表される扁平重量百分率 r_f (%) を定義した。

$$r_f = \frac{m}{M} \times 100 \quad (3)$$

そして、T.D. 2,930m, T.D. 3,150m, および、T.D. 3,190mにおいて、この扁平重量百分率 r_f を算出し、二次破砕率との関係を考察した。これら三つの地点における掘削ずりの採取量は、それぞれ114.9kg, 109.2kg, 235.4kgであった。その結果、二次破砕率が低く推移している区間 (T.D. 2,930m, T.D. 3,150m) において、扁平重量百分率 r_f はそれぞれ76%, 83%であった。一方、T.D. 3,190mにおける扁平重量百分率 r_f は18%であり、この近傍の二次破砕率は40から50%と、その前後に比べて大きな値で推移している。このことから、二次破砕率の推移と掘削ずりの形状との間には良好な相関関係が認められ、扁平重量百分率 r_f が80%程度となる地山においては、二次破砕率が30%以下で推移し、二次破砕現象の観点において、TBMは順調に掘進していると評価できるものと考えられる。

6. 結言

本研究においては、掘削径5.0mのTBMにより花崗岩地山を掘削した事例を対象として、掘削ずりを連続的に採取し、それらの掘削ずりの形状と二次破砕率の関係を考察した。その結果として、以下の知見を得た。

(1) TBM施工で得られる掘削ずりの形状は、粒径が

37.5mm以上の掘削ずりに対して、概ね5つに分類することができる。

- (2) 経験的に論じられてきた「扁平な掘削ずり」とは、扁平度 F によって表すと3.5以上のものである。
- (3) 扁平度 F が3.5より小さい掘削ずりの表面にはせん断破壊面が観察され、地山中の不連続面が掘削ずりの形状に大きく影響を与えている。
- (4) 扁平度 F が3.5以上の掘削ずりの重量比を表す扁平重量百分率 r_f が約70から80%の場合、TEIに基づく二次破碎率は20から30%で推移し、二次破碎に着目したTBMの掘削効率は良好と判断できる。

最後に、今回の知見は、花崗岩地山の一事例から得られたものである。今後、堆積岩地山などの施工事例に適用し考察を深め、より普遍的な知見としていく必要がある。そして、今後のTBM施工の施工管理の一助としたい。

謝辞：本研究を実施するにあたり多大な御協力をいただいた、鹿島建設株式会社の福家佳則氏ならびに宮嶋保幸氏に深く感謝する。

参考文献

- 1) 社団法人日本トンネル技術協会編：最新の TBM の実態及び急速施工技术，参考資料 2，2006。
- 2) 谷本親伯，中根達人，津坂仁和，山仲俊一朗，平野實：TBM 掘削指数 (TEI) による掘削効率および地山評価に関する研究，材料，Vol.55, No.8, pp.777-784, 2006。
- 3) 谷本親伯，津坂仁和，山仲俊一朗，中根達人，平野實，亀山克裕：TBM 掘削指数 (TEI) に基づく TBM 施工管理基準の提案，第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.11-16, 2007。
- 4) 三谷哲，岩井孝幸，飯酒孟久夫：TBM 貫入速度の予測について一硬岩地質における小断面 TBM の事例研究一，応用地質，26 巻，4 号，pp.7-23, 1985。
- 5) 福井勝則，大久保誠介，陳文莉，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 1998 年秋季大会講演集，B1-1, pp.1-4, 1998。
- 6) The University of Trondheim, The Norwegian Institute of Technology: *HARD ROCK TUNNEL BORING Project Report 1-88*, pp.143-147, 1988。
- 7) 福井勝則，陳文莉，大久保誠介，皿田滋：トンネル掘削におけるずりの粒度分布，資源と素材，Vol.119, pp.640-646, 2003。
- 8) 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，Vol.55, No.1, pp.29-36, 2006。
- 9) 渡辺邦男，山田秋夫，砂道紀人：TBM (パイロット機) による導坑掘削，トンネルと地下，Vol.21, No.3, pp.211-219, 1990。
- 10) 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。
- 11) 久慈雅栄，井上博之，橋詰茂，南浩輔：TBM 掘進データを用いた地山判定基準の作成その 2，前田技術研究所報，Vol.42, pp.135-142, 2001。
- 12) 稲生道裕，三浦悟，山本拓治，黒沼出，田中秀昭：TBM 掘削ずりによる地山評価手法の開発，土木学会年次学術講演会講演概要集第 3 部 (B)，55 巻，pp.116-117, 2000。
- 13) 社団法人日本トンネル技術協会編：TBM ハンドブック，pp.24-29, 2000。
- 14) 谷本親伯：NATM における情報化施工，土と基礎，Vol.30, No.7, pp.63-70, 1982。
- 15) 日本道路公団技術部：TBM 設計・施工の手引き，pp.39, 1998。

CHIP SHAPE AND SECONDARY FRAGMENTATION THROUGH TBM EXCAVATION

Kimikazu TSUSAKA, Chikaosa TANIMOTO, Tatsuto NAKANE, Takaaki UENO
and Yu KOIZUMI

The chips through TBM tunneling are well-known for one of useful indices to reflect the geological conditions. The flat and elongated chips whose width are equal to the spacing of cutter trace indicate the cutting face with less joints and good practice of TBM excavation with less secondary fragmentation rate. Through a case history in granitic rock, the authors proposed the new index, which is the ratio of length of major axis to thickness. Also the authors studied the relationship between the index and the excavation efficiencies. In conclusion, it was clarified that chips with the new index over 3.5 were generally observed when a TBM drove with less than 30% the secondary fragmentation rate.