

第 部門 TBM 施工における掘削ずりの表面形状と二次破碎

大阪大学工学部	学生員	○上野	宇顕
大阪大学大学院	正会員	谷本	親伯
大阪大学大学院	学生員	津坂	仁和
大阪大学大学院	学生員	小泉	悠

1. はじめに

TBM の掘削効率は一次破碎および二次破碎の観点から論じることができる．一次破碎とは地山を直接掘削することであり，二次破碎とは主として地山とカッタヘッドの間で掘削ずりを再破碎することである．二次破碎が多く生じると，TBM の掘削効率は低いと考えられる．また，一次破碎は不連続面の少ない地点において，二次破碎は不連続面の多い地点において生じることが多い．

TBM 施工に伴う掘削ずりの表面は，隣接破碎により生じる引張破壊面と地山の不連続面（以下，せん断破壊面とする）により構成される．掘削ずりのせん断破壊面の数は，切羽における不連続面の頻度に関係し，掘削ずりに多数のせん断破壊面が認められる場合，地山に多くの不連続面が存在していると考えられる．そのような場合，掘削中に切羽から岩塊が抜け落ち，二次破碎が多く生じていると考えられる．

このように，掘削ずりのせん断破壊面は地山性状および二次破碎現象に対して有意な指標でありながら，これまで着目されてこなかった．そこで，本研究では，花崗岩地山を掘削径 5.0m の TBM により施工した事例を対象として，掘削ずりの表面形状と二次破碎の関係について考察する．

2. 掘削ずりのせん断破壊面の頻度の提案

掘削ずりのせん断破壊面を評価する指標として，掘削ずりのせん断破壊面の頻度 n_s を掘削ずりの体積当りのせん断破壊面の面積の総和として，次式により定義した．

$$n_s = \frac{\sum_{i=1}^k A_i}{V} \dots (\text{式})$$

ここで， n_s はせん断破壊面の頻度(1/m)， A_i は掘削ずりのせん断破壊面の面積(m^2)， V は掘削ずりの体積(m^3)である．

掘削ずりのせん断破壊面は，表面の凹凸が引張破壊面のそれより小さいことが特徴であることから，採取した 40 個の掘削ずりを対象として，目視によりせん断破壊面と引張破壊面に分類した．それらを谷本ら¹⁾が提案した表面粗さを表す指標である M_s 値により定量化し，トンネル坑内の 22 箇所採取したボーリングコアの不連続面（計 65 面）のそれと比較した．掘削ずりのせん断破壊面とボーリングコアの不連続面の M_s 値は同様な頻度分布を示し，その範囲は 0.001～0.04 であり，最頻値は 0.01 であった．これに対し，掘削ずりの引張破壊面の M_s 値は，0.01～0.15 で分布し，最頻値は 0.03 とせん断破壊面のそれより低い値を示した．また，せん断破壊面の面積はデジタルカメラ（Canon 製，解像度：180pixel/inch）を用いて，各面を撮影し，パソコンソフト（空間情報システム SIS v6.0）により算出した．

3. 掘削ずりのせん断破壊面の頻度と二次破碎の関係

谷本ら²⁾は，TBM 施工において一次破碎仕事量を高めて地山を掘削することが重要であると考え，TEI（TBM 掘削指数）を提案している．今回は，それに基づく二次破碎率と提案したせん断破壊面の頻度 n_s との関係を考察する．ただし，二次破碎率はばらつきを考慮するため，トンネル距離程におけるその 10m 平均を用いた．その際，支保区分が 2 区分変化する場合（例えば，B から CH，D から CI など），その区間において地山状況の変化が大きかったと考え，その区間は除いた．対象とした掘削ずりはトンネル距離程（以下，T.D.とする）2400～

Takaaki UENO, Chikaosa TANIMOTO, Kimikazu TSUSAKA and Yu KOIZUMI

3500m で採取した計 33 個である．せん断破壊面の頻度 n_s と二次破砕率の推移を図 1 に示す．図中の四角印はせん断破壊面の頻度 n_s を，実線は二次破砕率を示す．せん断破壊面の頻度 n_s は，0，0.3～0.8，1.0～1.4 の範囲で分布した．二次破砕率はおよそ 20～50% で変動している．ここで，谷本ら²⁾が行った複数の TBM 施工における掘削効率に関する考察において，二次破砕率が 20～30% の場合，高い掘削効率であると判断されている．そこで，その値を図中に太い破線で示した．今回もそれに習うと，T.D.2530～2580m，2880～2930m，2975～3030m，および 3130～3160m において，二次破砕率が 30% 以下で推移することが認められる．この区間およびその近傍において，せん断破壊面の頻度 n_s が 0 となる掘削ずりが採取されている．一方，T.D.2410～2460m ではせん断破壊面の頻度 n_s が 0.3～1.4 で，T.D.2680～2770m でのそれは 1.0～1.4 で，T.D.3050～3120m および 3280～3500m でのそれは 0.3～0.8 で分布しており，それらの区間における二次破砕率は 30% 以上で推移している．これらより，せん断破壊面の頻度 n_s と二次破砕率に相関関係があることが考えられる．

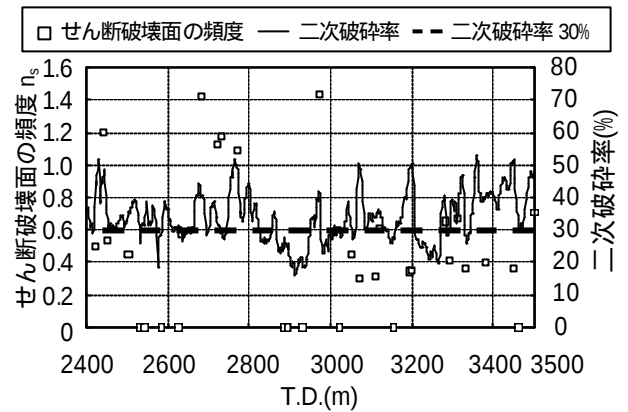
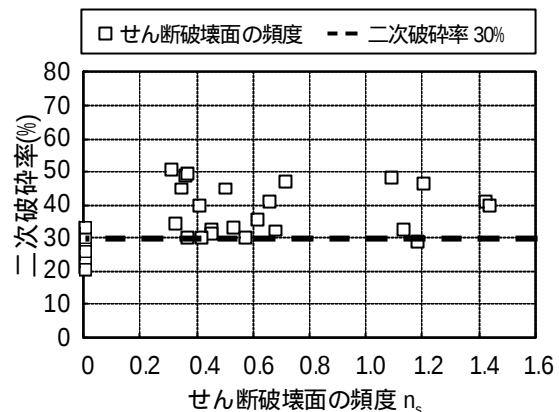
図1 せん断破壊面の頻度 n_s と二次破砕率の推移図2 せん断破壊面の頻度 n_s と二次破砕率の関係

図 2 にせん断破壊面の頻度 n_s と二次破砕率の関係を示

す．図中の太い破線は二次破砕率 30% である．せん断破壊面の頻度 n_s が 0 であると 10 地点中 7 地点が二次破砕率 30% 以下であり，せん断破壊面の頻度 n_s が 0 より大きくなると，23 地点中 19 地点が二次破砕率 30% を超えている．また，せん断破壊面の頻度 n_s が 0 である地山における二次破砕率の平均値は 28% であり，せん断破壊面の頻度 n_s が 0 より大きい地山におけるそれは 39% であった．これらのことから，せん断破壊面の頻度 n_s が 0 となる掘削ずりが採取される地山においては，おおむね二次破砕率が 30% 以下で，TBM の掘進が順調に行われていると考えられる．一方，せん断破壊面の頻度 n_s が 0 より大きくなる地山において，その値と二次破砕率の間に明確な相関関係は得られていない．この原因の一つとして，切羽における不連続面の頻度だけでなく，その方向も関係しているためと考えられる．

4. まとめ

本研究では，花崗岩地山を掘削径 5.0m で掘削した事例を対象として，掘削ずりの表面形状と二次破砕の関係を考察した．掘削ずりのせん断破壊面の規模を定量的に表すせん断破壊面の頻度 n_s を提案し，1100m の施工中に採取された 33 個の掘削ずりより算出したその頻度と，二次破砕を定量的に表した TEI に基づく二次破砕率との関係を示した．その結果，掘削ずりのせん断破壊面の頻度 n_s が 0 より大きい地点では，せん断破壊面の頻度 n_s が 0 である地点に比べ，二次破砕率は上昇することが明らかとなった．ただし，せん断破壊面の頻度 n_s の規模と二次破砕率との間に有意な相関関係は得られなかった．そこで，この点に関して今後も考察を進めていく必要がある．

参考文献

- 1) 谷本親伯・岸田潔：3 次元非接触式プロファイラーと最大エントロピー法を用いた岩盤不連続面ラフネスの定量化，土木学会論文集，No.511 / III-30，pp.57～67，1995．
- 2) 谷本親伯・中根達人・津坂仁和・山仲俊一朗・平野寛：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.1，pp.29～36，2006．