

TBM施工における二次破砕を考慮した ディスクカッタの交換寿命の評価

Estimation of Disc Cutter Life
in Consideration of Secondary Fragmentation through TBM Tunneling

津坂仁和¹・小泉悠²・谷本親伯³・亀山克裕⁴・宮嶋保幸⁵
Kimikazu Tsusaka, Yu Koizumi, Chikaosa Tanimoto,
Katsuhiro Kameyama and Yasuyuki Miyajima

¹正会員 博士(工学) (独) 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター
(〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432番2)

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

²正会員 工修 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)
(現 鹿島建設株式会社 技術研究所 土質基礎・岩盤構造グループ)

³正会員 工博 大阪大学サンフランシスコ教育研究センター
(120 Montgomery St., Suite 1270 San Francisco, CA 94104, U.S.A.)

⁴正会員 工修 西松建設株式会社 海外事業部(〒105-8401 東京都港区虎ノ門1丁目20-10)

⁵正会員 工修 鹿島建設株式会社 関西支店(〒540-0001 大阪市中央区城見2丁目2-22)

In TBM tunneling, secondary fragmentation is considered as a phenomenon that rock pieces between a cutter head and face are fragmented through the excavation process. It should cause damage and excessive wear to the disc cutters which pass through the dome-shaped portions where scrapers scoop up muck. In the four TBM applications through the sedimentary and granitic rocks, the authors investigated the difference in the rolling distance per unit disc diameter loss between the inner cutters and the outer ones. As a result, it was clarified that the cutter life at the outer portions were shorter than that at the inner portions by more than 20 % due to the secondary fragmentation.

Key Words : *tunnel boring machine, disc cutter, cutter wear, rolling distance, secondary fragmentation*

1. 序論

TBM (Tunnel Boring Machine) は、カッタヘッドに装備されたディスクカッタ(以下、カッタという)を岩盤に押しつけながら回転させ、隣接破砕を連続的に生じさせて岩盤を掘削する。発破工法に対するTBM工法の優位性は、坑道周辺岩盤のゆるみの抑制^{1), 2)}、月進1,000m以上の高速掘進性³⁾、そして、切羽周辺での掘削作業の安全性である。1990年代初めまでは、主として発電所建設に伴う水路の施工に使用され、それ以降では、大断面トンネルの先進導坑の掘削を中心に用いられてきた。さらに、

今後は、高レベル放射性廃棄物の処分事業においても、処分坑道の掘削に期待される掘削技術の一つとして考えられる⁴⁾。

TBMによる岩盤の破砕現象は、一次破砕と二次破砕に区別することができる。すなわち、切羽から隣接破砕により岩片を掘削することが一次破砕であり、切羽とカッタヘッドの間にたまった岩片が再破砕されることが二次破砕である。これまでに、Nelsonら⁵⁾は、掘削径5.8mの水路トンネルを堆積岩中に掘削した事例において、カッタヘッドの外周部に取り付けられたカッタの平均転動距離が著しく短くなった原因として、二次破砕に伴うカッタ

の摩耗を挙げている。また、森本・小松⁶⁾は、掘削径2.6mの導水路トンネルを片麻岩中に掘削した事例において、スクレーパによるずりの取り込み能力不足のために、カッタが取り残されたずりを再破碎し、その摩耗が増加したと報告している。そして、最近では、森山ら⁷⁾が東海北陸自動車道の飛驒トンネル本坑を掘削径12.8mで掘削した事例においても同様の現象を報告している。このように、TBM施工では、二次破碎現象によって、カッタに著しい摩耗や損傷が生じたことが報告されてきた。

カッタによる岩石切削に関する理論⁸⁾や室内試験結果⁹⁾によって、切削に伴ってカッタに作用する力と切込量や掘削効率、岩石物性などの関係について多くの研究成果が得られてきた。そして、それらの成果とともに、TBMによる岩盤掘削におけるカッタの消費量の予測に関する指標として、フランス国立石炭研究所¹⁰⁾による摩耗能指数、Schimazek & Knatz¹¹⁾による摩耗能指数、Tarkoy¹²⁾によるTotal Hardness、ノルウェー技術研究所¹³⁾によるカッターライフ指数、そして、Ewendt¹⁴⁾による修正摩耗能指数などが提案されてきた。これらの指標は、岩石試料を用いて測定した反発、押込み、摩耗、引掻きの各硬度値や引張強度、そして、石英などの高い摩耗能を有する鉱物の含有率などを組み合わせた関数として表される。そして、カッタの消費個数や単位カッタ個数当たりの掘進距離などとの関係が示され、これまでに、カッタの消費量を予測する指標として多くの施工事例で用いられてきた。しかしながら、それらは、掘削に伴うカッタの摩耗原因として一次破碎にのみ着目した知見である。

一方、二次破碎は、岩盤中の不連続面の性状が主要な発生原因であり、また、TBMの運転方法やカッタヘッドの構造、スクレーパの大きさや形状なども考慮する必要がある。このため、室内試験や数値計算によって評価することは難しい。上述した事例報告からも理解されたとおり、カッタの摩耗に対する二次破碎の影響は、カッタヘッドの外周部に取り付けられたカッタの摩耗量に顕著に現れる。一般的に、カッタヘッドの外周部に取り付け

られるカッタほど、カッタヘッド一回転当たりの転動距離が大きくなり、それゆえ、一次破碎に伴う単位掘削距離当たりの消費量は中心部に近いカッタよりも大きくなる。そして、これらのカッタの消費量が二次破碎によって助長されることを考えると、それらのカッタに生じる摩耗の原因を適切に把握することは、施工全体のカッタの消費量を評価する上で重要といえる。また、カッタの摩耗の原因において、一次破碎の割合が高いほどカッタの消費効率は良好であると考えられることができるが、これまでに、岩盤の破碎現象を一次破碎と二次破碎に区別して、摩耗量の計測データを分析し、カッタの消費量を評価した例はみられない。

そこで、本報告では、スクレーパによるずりの取込範囲よりも中心側のカッタの摩耗は主として一次破碎によって生じ、一方、その取込範囲にあるカッタの摩耗は一次破碎に加え二次破碎によって生じるものと考え、掘削径が4.5mと5.0mのTBMにより堆積岩と火成岩を掘削した4つの事例を対象に、それぞれの範囲にあるカッタの交換寿命を考察した。ここで、カッタヘッド上の取付半径が異なるカッタの交換寿命を考察するために、カッタが交換されるまでの累積転動距離をその間に生じた摩耗量で除した単位摩耗量当たりの転動距離を算出し、それらの交換寿命を示す指標として用いた。そして、二つの範囲に取り付けられたカッタの転動距離の比をとることによって、カッタの交換寿命に対する二次破碎の規模を示した。

2. 対象事例の概要

本報告においては、以下の4つの事例を対象とした。事例AおよびBは、掘削径4.5mの自動車専用道路付設の避難用トンネルである。事例Aは白亜紀の砂岩と頁岩を約2,600m掘削した事例であり、一方、事例Bは白亜紀から古第三紀における流紋岩と花崗斑岩を約2,800m掘削した事

表-1 対象事例の概要

事 例	A	B	C	D
掘削径 (m)	4.5	4.5	5.0	5.0
TBM掘進延長 (m)	2,590	2,786	3,457	3,641
掘進期間 (月)	9	21	18	10
カッタ消費個数	354	157	323	110
岩 種	砂岩・頁岩 (白亜紀)	流紋岩 (白亜紀～古第三紀) 花崗斑岩 (白亜紀～古第三紀)	花崗岩 (古第三紀)	花崗岩 (白亜紀) 砂岩・泥岩 (新第三紀)
岩石の 一軸圧縮強さ(MPa)	80~260	40~200 (流紋岩) 80~120 (花崗斑岩)	120~180	80~120 (花崗岩) 10~60 (砂岩・泥岩)

例である。事例CとDは、掘削径5.0mの自動車専用道路付設の避難用トンネルと大断面トンネルの施工に伴う先進導坑である。事例Cは古第三紀の花崗岩を約3,400m掘削した事例であり、事例Dは白亜紀の花崗岩と新第三紀の砂岩と泥岩を約3,600m掘削した事例である。4つの事例の掘削総延長は約13kmであり、各事例の概要を表-1に示す。また、事例AおよびBと事例CおよびDでは、同一のTBMが使用され、その型式は、事例AおよびBでは改良オープン型、事例CおよびDではオープン型であった。各機体の諸元を表-2に示す。カッタの取り付け個数は、事例AおよびBの機体で32個、事例CおよびDの機体で35個である。さらに、事例AおよびBで使用されたTBMを例としてカッタヘッド断面におけるカッタの取り付け半径を図-1に示す。本報告では、最も中心部に取り付けられたカッタを1番カッタとし、中心部から外周部にかけて番号を付け、最外周部に取り付けられたカッタを事例AとBでは32番カッタと表す。事例CとDでは35番カッタとなる。図-1より、カッタヘッドはドーム形状であり、1つの軸に2つのカッタハブが取り付けられたセンター部のカッタをセンターカッタ（両機体とも1-8番カッタ）、9番カッタから18番カッタが取り付けられたフェース部のカッタをフェースカッタ、そして、19番カッタから32番カッタが取り付けられたドーム部のカッタをドームカッタと称することとす

表-2 TBMの諸元

事例	A, B	C, D
型式	改良オープン型	オープン型
掘削径 (m)	4.5	5.0
総重量 (kN)	2,734	3,106
総出力 (kW)	1,110	1,420
最大推力 (kN)	8,036	9,800
ストローク (mm)	1,500	1,500
カッタヘッドトルク (kN・m)	1,372~1,470	1,274~2,430
カッタヘッド回転速度 (rpm)	1.25~10.0	0.8~10.0
装備カッタ数	32	35
カッタ径 (mm)	432	432

表-3 実施支保区分に基づくカッタの積算個数

事例	項目	支保区分				計
		B-T	CI-T	CII-T	DI-T	
A	延長 (m)	0	2098	238	254	2590
	積算 (個)	0	107	7	5	119
B	延長 (m)	63	515	1268	940	2786
	積算 (個)	8	27	37	20	92
C	延長 (m)	450	572	1076	1359	3457
	積算 (個)	65	36	39	35	175
D	延長 (m)	318	1334	952	1037	3641
	積算 (個)	46	84	34	27	191

る。なお、ドーム部の23番カッタから外周側は、スクレーパによるずりの取込範囲（以下、ずり取込範囲という）である。一方、事例CおよびDで使用されたTBMのカッタヘッドも同様にドーム形状であり、22番カッタ（回転半径は1,987mm）からドーム部に、25番カッタ（同半径は2,210mm）からずり取込範囲に配置される。

各事例のカッタの消費個数（以下、実績個数という）については、事例Aは354個、事例Bは157個、事例Cは323個、そして、事例Dは110個であった。ここで、日本道路公団の積算基準¹⁵⁾による掘削径5.0mのTBM施工における支保区分ごとの単位掘削体積当たりのカッタの消費個数は、B-Tが0.0073個/m³、CI-Tが0.0032個/m³、CII-Tが0.0018個/m³、D-Tが0.0013個/m³である。各事例の実施支保区分は、日本道路公団の指針¹⁵⁾に準拠したことから、上述した積算基準値に、掘削断面積と各実施支保区分の総延長の積をとり、各事例の積算基準に基づく消費個数（以下、積算個数という）を求めた。その結果を表-3に示す。同表より、事例Aでは、積算個数が119個に対して実績個数が354個と約3倍上回り、同様に、事例BとCにおいても、積算個数に対して実績個数は1.7倍と1.8倍であった。一方、事例Dでは、実績個数は積算個数の0.6倍であった。さらに、センター部、フェース部、そして、ドーム部の3つの取付位置ごとのカッタの消費個数を表-4に示す。同表よ

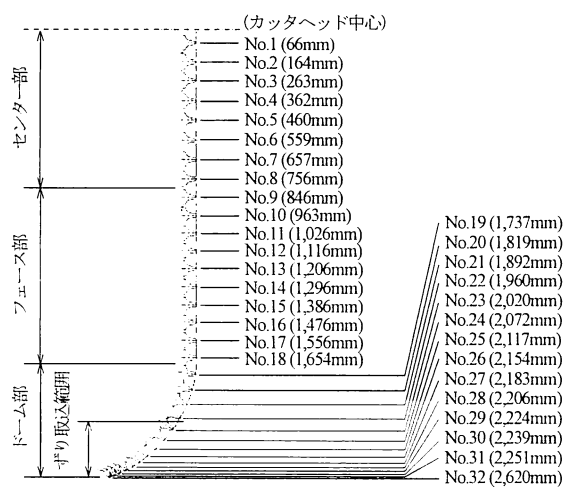


図-1 カッタ取り付け位置 (事例 A および B)

表-4 取付位置ごとのカッタ消費個数

事例	センター部	フェース部	ドーム部	全体
	A	94 (0.27)	96 (0.27)	
B	36 (0.23)	37 (0.24)	84 (0.53)	157 (1.00)
C	46 (0.14)	87 (0.27)	190 (0.59)	323 (1.00)
D	10 (0.09)	40 (0.36)	60 (0.55)	110 (1.00)

上段は消費個数を、下段は全消費個数に対する比率を示す。

り、全体に対するドーム部の消費個数は、事例Aでは354個中164個、事例Bでは157個中84個、事例Cでは323個中190個、事例Dでは110個中60個であった。したがって、対象事例においては、ドーム部のカッタの消費個数は全体の45~60%であった。

3. ディスクカッタの単位摩耗量当たりの転動距離と二次破砕

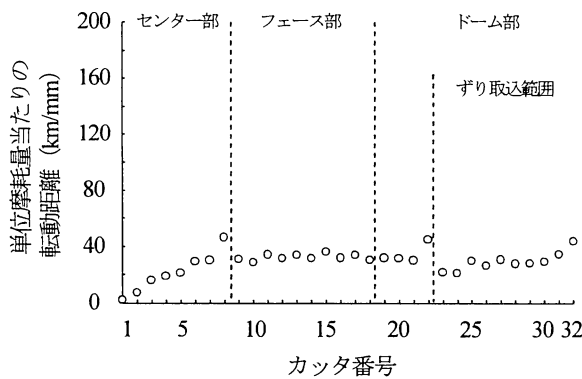
(1) 単位摩耗量当たりの転動距離

一般的に、カッタヘッドの外周部に取り付けられるカ

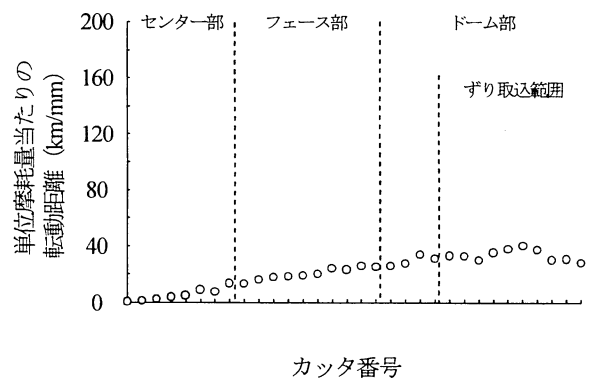
ッタほど、カッタヘッド一回転当たりの転動距離が大きくなり、単位掘削距離当たりの摩耗量は中心部に近いカッタよりも大きくなる。このような回転半径の異なるカッタの交換寿命を表す指標として、各カッタの単位摩耗量当たりの転動距離（以下、転動距離という）を用いた。これは、任意の掘削区間のカッタの累積転動距離をその区間で生じた摩耗量で除した値であり、以下の式で表される。

$$RD_i = \frac{1}{1000} \times \frac{2\pi \times r_i \times m}{\sum a_i} \quad (1)$$

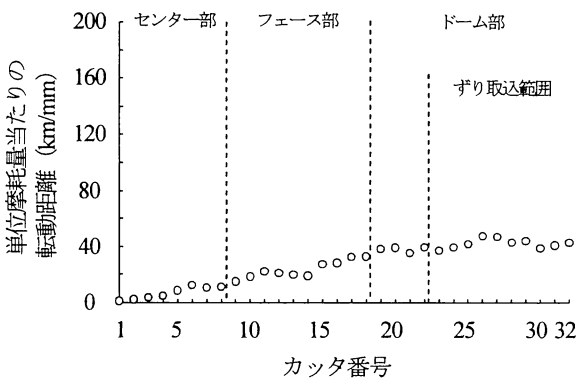
ここで、 RD_i (km/mm) は i 番カッタの単位摩耗量当たり



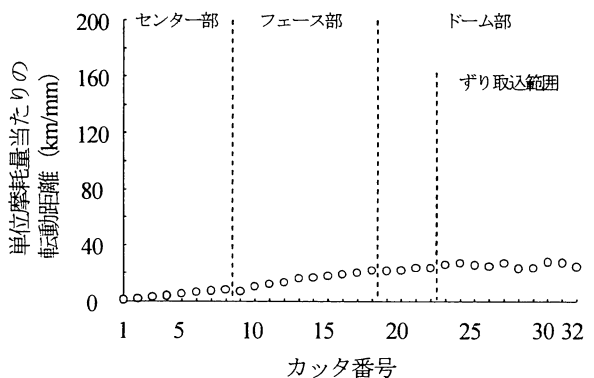
(a) A-1 区間 (T.D.0~448m)



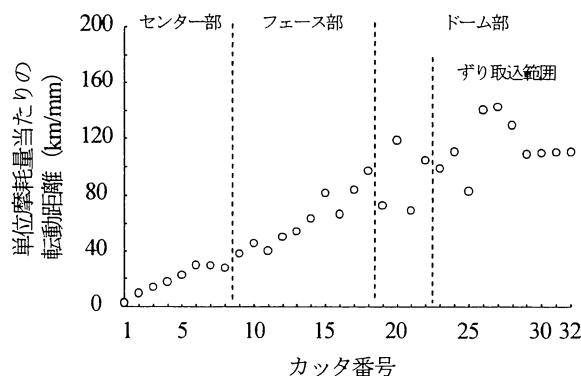
(b) A-2 区間 (T.D.448~1,008m)



(c) A-3 区間 (T.D.1,008~1,524m)

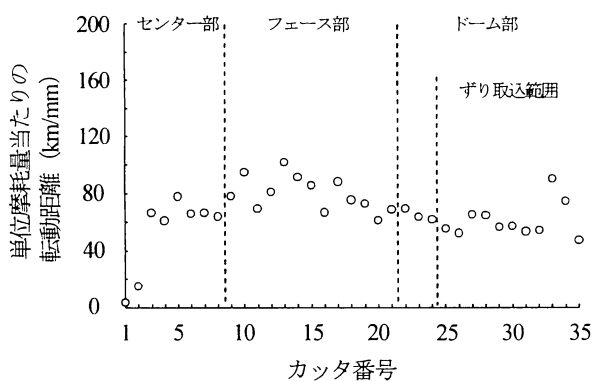


(d) A-4 区間 (T.D.1,524~2,019m)

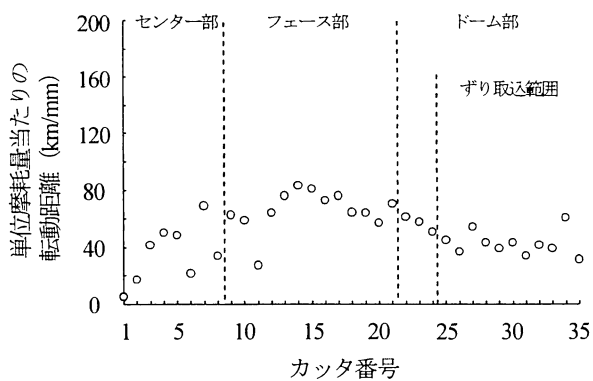


(e) A-5 区間 (T.D.2,019~2,536m)

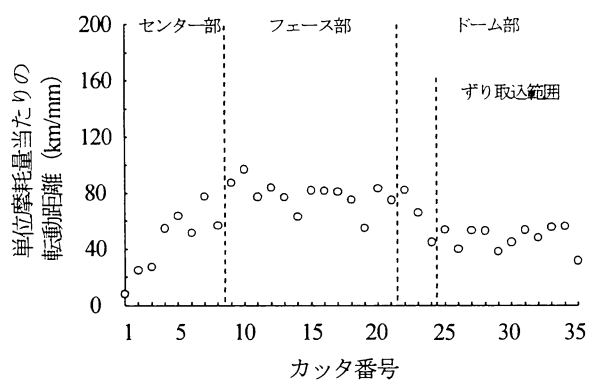
図-2 事例 A における単位摩耗量当たりの転動距離



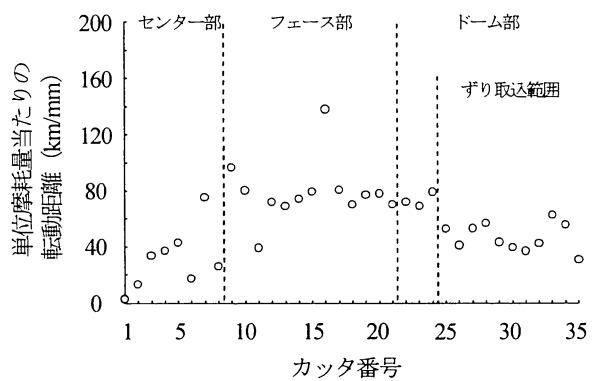
(a) C-1 区間 (T.D.0~475m)



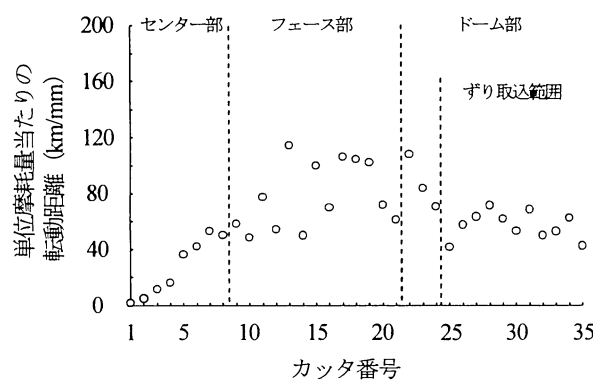
(b) C-2 区間 (T.D.475~1,007m)



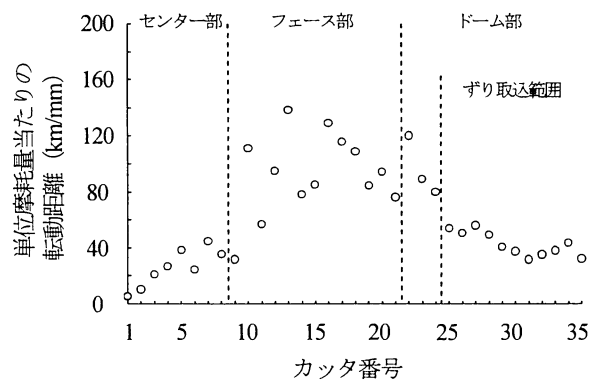
(c) C-3 区間 (T.D.1,007~1,541m)



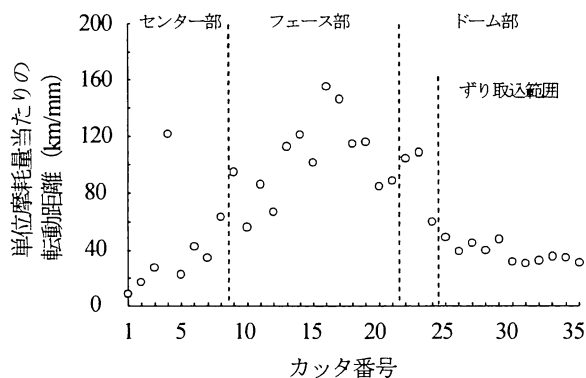
(d) C-4 区間 (T.D.1,541~1,997m)



(e) C-5 区間 (T.D.1,997~2,506m)



(f) C-6 区間 (T.D.2,506~3,015m)



(g) C-7 区間 (T.D.3,015~3,457m)

図-3 事例Cにおける単位摩耗量当たりの転動距離

の転動距離, r_i (m) は i 番カッタのカッタヘッド上の回転半径, m は交換されるまでのカッタヘッドの累積回転数, a_i (mm) は i 番カッタの摩耗量である. 式 (1) に基づいて転動距離を求める際には, カッタの摩耗量および消費個数を管理するために作成されたカッタ交換実績表を使用した. 同表には, カッタの摩耗量を計測した日付, TBM掘進距離, カッタヘッド累積回転数, 各カッタの摩耗量, 交換されたカッタ, 新たに装備されたカッタの材質, 交換原因などが記録される. 摩耗量が交換基準量に達する前に刃先の偏摩耗や損傷等のために, カッタの交換が行われた場合は, カッタの交換基準量を摩耗量とした. その基準摩耗量は, 事例AとBでは1~30番カッタが20mm, 31および32番カッタが10mm, 事例Cでは1~33番カッタが20mm, 34および35番カッタが10mm, 事例Dでは1~34番カッタが20mm, 35番カッタが10mmであった. また, カッタの材質はニッケルクロムモリブデン鋼材(以下, SNCM材とする)と, これより耐摩耗性に優れた合金工具鋼材(以下, SKD材とする)が使用された.

各事例において, 掘削対象となった岩盤と使用されたカッタの材質, 摩耗量の計測を実施したトンネル距離程(以下, T.D. (Tunnel Distance) という), そして, Nelsonら⁵⁾の考察が約1,000mであったことを考慮して, 400~600mごとに区間を設定し, 各区間における各カッタの転動距離を求めた. ここでは, 対象とした4つの事例のうち, ドーム部のカッタの消費個数が全体に対して約46%と最も低い事例Aと約59%と最も高い事例Cの結果を図-2と3に示す. これらの図には, 図-1に基づいて, センター部, フェース部, ドーム部を, さらに, ドーム部は, ずり取込範囲に分割し, 4つのカッタの取付範囲を示した.

はじめに, 事例Aでは, T.D.0~448m (A-1区間), T.D.448~1,008m (A-2区間), T.D.1,008~1,524m (A-3区間), T.D.1,524~2,019m (A-4区間), そして, T.D.2,019~2,536m (A-5区間)の5つの区間を設定した. 使用されたカッタの材質はSNCM材であり, 岩盤は, A-1区間が頁岩優勢砂岩, A-2およびA-3区間が砂岩, A-4区間が砂岩優勢頁岩, A-5区間が頁岩である. 図-2より, 転動距離は, 全ての区間において, カッタヘッドの中心から外周部のカッタにかけて徐々に増加する. 西岳¹⁶⁾の知見に基づくと, カッタヘッドの中心部周辺のセンターカッタでは, その回転半径が小さいために力学的負荷が大きくなり, 摩耗が顕著に進行するだけでなく, 偏摩耗や損傷などが生じやすくなるためと考えられる. 一方, ずり取込範囲にあるカッタの転動距離は, それよりも中心側にあるカッタの転動距離と比較して, 著しく低下する傾向は認められない. すなわち, A-1~A-4区間では30~40km/mm, A-5区間では110~140km/mmの範囲で一定もしくは増加する. したがって, 事例Aでは, 外周部のカッタの摩耗に対して, 二次破

碎の影響はほとんど生じていないと考えられる.

次に, 事例Cでは, T.D.0~475m (C-1区間), T.D.475~1,007m (C-2区間), T.D.1,007~1,541m (C-3区間), T.D.1,541~1,997m (C-4区間), T.D.1,997~2,506m (C-5区間), T.D.2,506~3,015m (C-6区間), そして, T.D.3,015~3,457m (C-7区間)の7つの区間を設定した. 使用されたカッタの材質は, C-1~C-4区間ではSNCM材, C-5区間ではSNCM材とSKD材, C-6とC-7区間ではSKD材である. また, 全区間を通して掘削対象となった岩盤は花崗岩である. 図-3より, 各区間において, 1番カッタから10~15番カッタまでの転動距離は事例Aと同様に増加する. ただし, C-2~C-4区間およびC-6区間の4つの区間では, 6および8番カッタのように, 隣接するカッタに比べて低い転動距離を示すカッタがある. これは, これらのカッタの主たる交換原因が偏摩耗であり, その転動距離の算出における摩耗量を交換基準量である20mmとしたためと考えられる. 続いて, ずり取込範囲にある25番以降のカッタの転動距離はそれより中心側のカッタに比べて低くなっている. すなわち, カッタの材質がSNCM材であるC-1~C-4区間では, ずり取込範囲より中心側にあるカッタの転動距離が概ね60~80km/mmであるのに対して, その範囲にあるカッタの転動距離は約60km/mm以下である. また, 同様に, カッタの材質がSKD材であるC-5~C-7区間では, ずり取込範囲より中心側にあるカッタの転動距離が概ね80~120km/mmであるのに対して, その範囲にあるカッタの転動距離は約60km/mm以下である. したがって, 事例Cでは, 外周部のカッタの転動距離が二次破碎の影響により著しく低下したと考えられる.

(2) 二次破碎と転動距離比

事例AおよびCにおける取付半径の異なるカッタの転動距離を比較した結果を踏まえ, 事例BおよびDにおいても同様に, 掘削対象となった岩盤や使用されたカッタの材質などを考慮して区間を設定し, 各カッタの転動距離を求めた. そして, カッタヘッドのフェース部のカッタ(以下, 内周カッタという)の転動距離とずり取込範囲にあるカッタ(以下, 外周カッタという)の転動距離の比(以下, 転動距離比とする)を算出した. 今回, 内周カッタとして事例AおよびBでは14~18番カッタに, 事例CおよびDでは17~21番カッタに着目し, 一方, 外周カッタとして事例AおよびBでは26~30番カッタに, 事例CおよびDでは28~32番カッタに着目した. そして, 転動距離比を算出するにあたっては, これらの転動距離の平均値を用いた. この転動距離比は, カッタヘッドの取付位置に着目して, ずりの再破碎の影響をほとんど受けないと考えられる内周カッタの転動距離を基準にして, 外周カッタの転動距離を評価する指標である. 転動距離比が1以下の

範囲で小さい値となるほど、外周カッタの摩耗に対する二次破碎の影響は大きいと考えられる。各事例で設定した区間の区間長、岩盤の種類、カッタの材質、実施支保区分比率、内周および外周カッタの転動距離、そして、転動距離比を表-5に示す。同表における実施支保区分比率は、区間長に対する各支保区分（B-T-D-T）を構築した掘削延長の比率である。ただし、DI-Tよりも支保工規模の大きな支保区分はD-Tに含めて示した。

表-5より、事例AおよびDではほとんどの区間において、転動距離比が1.0以上となり、外周カッタの摩耗に対して二次破碎の影響はほとんど生じていなかったと考えられ、一方、事例Bでは半数の区間、事例Cでは全ての区間において、転動距離比が0.8を下回り、外周カッタの転動距離は二次破碎により20%以上低下したと考えられる。また、実施支保区分比率と転動距離比の間には有意な関係は認められない。すなわち、実施支保区分比率において、主にB-TおよびCI-TであるC-5およびC-6区間とCII-TおよびD-TであるC-7区間の両者において、転動距離比は0.8以下の値を示す。一方、その主要な比率が共にCII-TおよびD-TであるB-5区間とB-6区間の転動距離比は1.0と0.7である。このように、支保区分の主要な選定根拠である掘削面の自立性の良否にかかわらず、二次破碎によってカッタの交換寿命が低下すると考えられる。

また、SNCM材とSKD材の両方のカッタを使用した事例Cにおいて、各材質の交換寿命を考察した場合、主要な

実施支保区分比率の80%以上がCII-TおよびD-Tと概ね同様の地山状況と考えられるC-1~C-4区間とC-7区間の内周カッタの転動距離を比較すると、SNCM材が使用されたC-1~C-4区間では平均72km/mmであるのに対して、SKD材が使用されたC-7区間では110km/mmであった。したがって、SNCM材に比べてSKD材は、約1.5倍の交換寿命を有したと考えられる。

4. 結論

本報告では、掘削径4.5mと5.0mの2台のTBMにより堆積岩と火成岩を掘削した4つの事例を対象として、カッタの単位摩耗量当たりの転動距離とそれに及ぼす二次破碎の影響を考察した。カッタヘッドの外周部に取り付けられたカッタのうち、特に、ずり取込範囲にあるカッタの摩耗は、岩盤掘削に伴う一次破碎に加えて、切羽とカッタヘッドの間にたまった岩片を再破碎する二次破碎によって生じると考えられる。そこで、任意の掘削区間にて、カッタヘッド一回転当たりの転動距離の異なるカッタの交換寿命を比較するために、その累積転動距離を対象とした区間で生じた摩耗量で除した単位摩耗量当たりの転動距離に着目した。そして、その外周部のカッタの転動距離を、概ね一次破碎のみの摩耗が生じる内周部のカッタの転動距離と比較し、それらのカッタの転動距離の比

表-5 各区間の実施支保区分比率と転動距離

区 間	区間長 (m)	岩 種	カッタの 材質	実施支保区分比率 (%)				転動距離 (km/mm)		
				B-T	CI-T	CII-T	D-T	内周	外周	比
A-1	448	頁岩・砂岩	SNCM	0	99	1	0	33	29	0.9
A-2	560	砂岩	SNCM	0	95	5	0	24	36	1.5
A-3	516	砂岩	SNCM	0	81	9	10	28	44	1.6
A-4	495	砂岩・頁岩	SNCM	0	80	14	6	19	26	1.4
A-5	518	頁岩	SNCM	0	63	15	22	79	126	1.6
B-1	525	流紋岩	SNCM	0	30	52	18	97	85	0.9
B-2	477	流紋岩	SNCM	1	42	47	10	49	54	1.1
B-3	468	花崗斑岩	SNCM	0	8	50	42	81	51	0.6
B-4	451	花崗斑岩	SNCM	12	23	56	9	98	70	0.7
B-5	570	花崗斑岩	SNCM	0	4	34	62	105	74	0.7
B-6	295	花崗斑岩	SNCM	0	0	30	70	47	48	1.0
C-1	475	花崗岩	SNCM	0	0	44	56	73	57	0.8
C-2	532	花崗岩	SNCM	0	11	37	52	66	40	0.6
C-3	534	花崗岩	SNCM	0	0	43	57	74	47	0.6
C-4	456	花崗岩	SNCM	0	20	50	30	75	44	0.6
C-5	509	花崗岩	SNCM & SKD	37	40	9	14	89	61	0.7
C-6	509	花崗岩	SKD	44	33	14	9	96	39	0.4
C-7	442	花崗岩	SKD	6	8	10	76	110	36	0.3
D-1	412	花崗岩	SKD	13	82	5	0	42	52	1.2
D-2	586	花崗岩	SKD	30	58	12	0	51	61	1.2
D-3	494	花崗岩	SKD	0	18	63	19	63	62	1.0
D-4	437	花崗岩	SKD	0	0	8	92	83	91	1.1
D-5	580	砂岩・泥岩	SKD	0	43	38	19	97	154	1.6
D-6	539	砂岩・泥岩	SKD	0	59	32	9	342	408	1.2
D-7	418	砂岩・泥岩	SKD	0	0	30	70	239	119	0.5

を、外周部のカッタの交換寿命に対する二次破碎の規模を表す指標として提案した。この転動距離比が1.0より小さい範囲で、低い値となるほど、外周部のカッタの摩耗に対する二次破碎の影響が大きいと判断できる。対象とした4つの事例において、掘削対象の岩盤とカッタの材質などを考慮して400~600mの区間を設定し、この転動距離比を求めた結果、事例AおよびDでは、1つの区間以外は転動距離比が1.0を上回り、一方、事例Bでは6区間中の3区間において、事例Cでは全ての区間において、転動距離比が0.8を下回った。したがって、事例AおよびDでは、外周部のカッタの交換寿命に対して二次破碎の影響がほとんど生じておらず、事例BおよびCでは、外周部のカッタの交換寿命が二次破碎により20%以上低下したと考えられる。また、各区間の実施支保区分比率と転動距離比の間に、有意な関係は認められなかったことから、掘削面の自立性の良否にかかわらず、二次破碎によって外周部カッタの交換寿命は短くなると考えられる。

最後に、本報告は、カッタの交換寿命に対する二次破碎の規模を表す指標となる転動距離比の提案とその適用結果の報告である。これまでに、二次破碎を抑制するために、スクレーパの形状や個数、配置を改良して、カッタヘッドの単位回転当たりのずりの取込量を大きくしたことが報告されている^{6), 18)}。また、掘削速度を上げるために、スラストを過度に大きくしてカッタヘッドの単位回転当たりの貫入量を増加させた場合、二次破碎が顕著に生じたため、岩盤性状とカッタヘッドの適切な貫入量の関係が考察されている¹⁹⁾。このようにいくつかの既往の事例では、二次破碎への対策が経験的に講じられているが、今後は、ずりの取込に関するカッタヘッドの構造、TBMの操作方法、そして、岩盤性状の観点から、二次破碎現象を低減するためのより体系的な施工技術の確立が望まれる。

参考文献

- 1) 谷本親伯, 吉川太, 北条明: 新愛本発電所建設におけるトンネルの急速施工と岩盤のゆるみ現象, 材料, 第38巻, 第426号, pp. 33-39, 1988.
- 2) C. Bauer & F. Homand: Disturbed zone assessment with permeability measurements in the ZEDEX tunnel. In *Proceedings of the Excavation Disturbed Zone Workshop "Designing the Excavation Disturbed Zone for a Nuclear Repository in Hard Rock"*, Canadian Nuclear Society, pp.87-96, 1996.
- 3) 青木謙治, 西岡和則: 世界記録を達成した米国におけるTBMの施工, トンネルと地下, 第28巻, 11号, pp. 49-48, 1997.
- 4) 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 ―地層処分研究開発第2次取りまとめ― 分冊2 地層処分の工学技術, pp. V-1-V-33, 1999.
- 5) Nelson, P.P., O'Rourke, T.D. and Kulhawy, F.H.: Cutter wear and its

- influence on tunnel boring machine performance, *Proceedings of ISRM symposium on Design and Performance of Underground Excavations*, pp. 239-246, 1984.
- 6) 森本時夫, 小松俊夫: 早木戸発電所導水路トンネルのTBM施工, 電力土木, No.194, pp. 45-56, 1985.
 - 7) 森山守, 福井勝則, 青木智幸, 小塚孝, 松原誠: 大断面TBMのディスクカッタ摩耗, トンネル工学報告集, 第16巻, pp. 215-220, 2006.
 - 8) 例えば, Roxborough, F.F. and Phillips, H.R.: Rock Excavation by Disc Cutter, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.12, pp. 361-366, 1975.
 - 9) 例えば, 西松裕一, 奥野 昇, 平沢幸久: ローラカッタによる岩石掘削に関する研究, 日本鉱業会誌, Vol.91, pp. 653-658, 1975.
 - 10) West, G.: Rock Abrasiveness Testing for Tunnelling, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.26, No.2, pp. 151-160, 1989.
 - 11) Schimazek, J. and Knatz, H.: Der Einfluß des Gesteinaufbaus auf die Schnittgeschwindigkeit und den Meißelverschleiß von Streckenvortriebsmaschinen, *Glückauf*, Vol.106, No.6, pp. 274-278, 1970.
 - 12) Tarkoy, P.J.: A study of rock properties and tunnel boring machine advance rates in two mica schist formations, *Proceedings of the Fifteenth Symposium on Rock Mechanics*, ASCE, pp. 415-447, 1975.
 - 13) NTNU-Anleggsdrift: Project Report 13A-98 DRILLABILITY Test Methods, pp. 1-22, 1998.
 - 14) Ewendt, G.: Erfassung der Gesteinsabrasivität und Prognose des Werkzeugverschleißes beim maschinellen Tunnelvortrieb mit Diskenmeißeln, *Bochumer geologische und geotechnische Arbeiten*, Vol.33, pp. 88, 1989.
 - 15) 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, 37-14, pp. 1-13, 2003.
 - 16) 西岳 茂: 岩盤掘削中におけるディスクカッタへの作用負荷の研究 ディスクカッタと岩盤との力の相互作用, 土木学会論文集, No.554/III-37, pp. 211-220, 1996.
 - 17) 社団法人日本トンネル技術協会: 最新のTBMの実態及び急速施工技術, pp. I-9, 2006.
 - 18) 三谷哲, 岩井孝幸, 飯酒益久夫: 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, 26巻, 4号, pp.7-23, 1985.
 - 19) 三谷哲, 岩井孝幸, 飯酒益久夫, 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, 26巻, 1号, pp.10-21, 1985.