飛驒トンネル本坑における TBM のディスクカッタの摩耗*

福井 勝則¹ 大久保 誠介² 森山 守³
青木 智幸⁴ 小塚 孝⁵ 松原 誠⁶

Disc-Cutter Wear of TBM at Hida Tunnel

by Katsunori FUKUI^{a*}, Seisuke OKUBO^a, Mamoru MORIYAMA^b,
Tomoyuki AOKI^c, Takashi KOZUKA^d and Makoto MATSUBARA^e

- a. Department of Geosystem Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656
(*Corresponding author E-mail: fukui@geosys.t.u-tokyo.ac.jp)
- b. Kiyomi Construction Office, Central Nippon Expressway Company
- c. Technology Center, Taisei Corporation
- d. Joint Venture of Taisei, Nishimatsu and Sato, Hida Tunnel Project
- e. Geoscience Research Laboratory

The main drive of Hida Tunnel for Tokai-Hokuriku Highway was excavated by a world-largest-class TBM with the diameter of 12.84 m. The TBM have bored over 3.0 km of the tunnel through Nohi Rhyolite, Granite Porphyry and Hida Gneiss. The uniaxial compressive strength of these rocks was found to be extremely high. Such high strength accompanied by high content of silicon dioxide resulted in significantly high wear rate of the disc cutters mounted on the TBM.

In this study, cutter wear was carefully measured together with the operation conditions such as thrust force, penetration rate, cutter-head rotation rate and the rock properties such as uniaxial compressive strength, rock strength estimated from TBM cutting force, abrasivity obtained from turning operation test, chemical composition determined by X-ray analytical microscope.

It was found that the extent of cutter wear largely depends on position of the disc cutter; cutter wear per unit rolling distance near the fringe of cutter head was extremely larger than that near the center of cutter head. A combination of rock strength estimated by TBM cutting force and length of wear flat in turning-operation test was found to be an excellent index to predict cutter wear rate.

KEY WORDS: TBM, Cutter, Rock Strength, Wear, Abrasivity, Turning Operation Test

1. はじめに

東海北陸自動車道飛驒トンネル本坑では、世界最大級の掘削径を有する全断面トンネル掘進機 (TBM) により濃飛流紋岩類、花崗斑岩および飛驒片麻岩類で構成された岩盤を掘削しているが、掘削機に取り付けられたディスクカッタの摩耗が激しく、カッタ経費の増加や、カッタ交換による時間的損失などの問題が生じている。このように、TBM で硬岩を掘削すると、岩種によってはディスクカッタの摩耗が顕著となる場合があり、その際には施工上重大な問題をもたらすこととなるため、カッタの摩耗を定量的に評価することは重要な研究課題である^{1,2)}。

カッタなどの刃物の摩耗は TBM だけに限らず、ブームヘッダやさく岩機などの様々な掘削機械でも見られ、岩盤を掘削する際

の刃物の摩耗に関して過去に多くの研究³⁾がなされているが、刃物の摩耗はカッタの材質、岩石の特性、掘削条件など多岐にわたる影響を受けるため、統一的な見解はいまだ得られていないのが現状である。

TBM のカッタ摩耗を推定する方法としていくつかの指標が提案されているが、1) 岩石の力学的特性あるいは刃物の岩石への貫入特性、2) 岩盤の亀裂状況、3) 岩石の摩耗能 (岩石が刃物を摩耗させる程度)、を組み合わせているものがほとんどである。例えば、Total Hardness⁴⁾ではシュミットハンマー反発値と Taber 摩耗試験機から得られる摩耗硬度の組み合わせを指標としている。このうち、シュミットハンマー反発値は 1) と 2) を組み合わせた指標であり、摩耗硬度は 3) を表す指標である。Cutter Life Index⁵⁾も 1) ~ 3) の事項を考慮した指標である。これらの指標を用いた事例は多く報告されている⁶⁾ものの、岩種ごとにカッタ摩耗量との関係を調べている程度で、岩盤特性や TBM の運転状況によるカッタ摩耗の変化に関する知見や室内試験との関連などはほとんど知られていないのが現状である。

福井・大久保⁷⁾は TBM の掘削抵抗から岩盤強度を求める手法を提案し、得られた岩盤強度を岩盤観察やシュミットハンマー打撃試験などと比較し、岩盤強度は岩石の力学的特性 (一軸圧縮強度)

*2007 年 4 月 12 日受付 8 月 23 日受理

1. 普通会员 工博 東京大学准教授 工学系研究科地球システム工学専攻

2. 普通会员 工博 東京大学教授 工学系研究科地球システム工学専攻

3. 中日本高速道路 (株) 清見工務事務所

4. Ph.D 大成建設 (株) 技術センター

5. 大成・西松・佐藤 JV 東海北陸道飛驒トンネル工事

6. 地層科学研究所

[著者連絡先] FAX: 03-5841-7035 (東大 地球システム)

E-mail: fukui@geosys.t.u-tokyo.ac.jp

キーワード: TBM, カッタ, 岩盤強度, 摩耗, 摩耗能, 旋削試験

Fig.1 Geological section of Hida tunnel.

に加えて断層や亀裂、風化などの劣化要因を反映したものであることを報告した。すなわち、TBMの掘削抵抗から求めた岩盤強度は、シュミットハンマー反発値と同様に1)と2)の事項を組み合わせた指標であることを示した。TBMの掘削抵抗から求めた岩盤強度は、トンネル掘削において連続的に得られるため、施工管理に有用な指標とされ、支保分類の判断などにも利用されている⁷⁾。

岩石の摩耗能を調べる試験方法に関する研究は多く見られるが、手間のかかる試験が多い。大久保ら⁸⁾は比較的硬質な岩石を用い、削孔試験、Taber摩耗試験および旋削試験の3種類の試験を実施し、試験片の作製および試験方法の面で、旋削試験が最も簡便な試験であるとして、50種類の旋削試験結果を示した。

本研究では飛騨トンネル本坑を対象として、室内での力学試験、薄片観察および旋削試験を実施し、岩種ごとの力学的・鉱物的特性および摩耗能を調べた結果についてまず述べる。ついで、TBMの運転状況を考慮し、飛騨トンネル本坑でのカット摩耗のデータについて述べ、掘削抵抗から求めた岩盤強度や掘進長1mあたりのカットヘッド回転数との比較検討を行う。最後に、カット摩耗量を表す指標として、旋削試験と岩盤強度の有効性を述べる。

本研究の特徴は次の通りである。

- 1) 3,000mにもおよぶTBMによる掘削中、掘進距離20mごとにすべてのディスクカッタの摩耗量を測定したこと。
- 2) TBMの機械データとして、推力、トルク、カットヘッド回転数、切り込み深さなど豊富なデータがあり、岩盤特性およびTBMの運転操作などと、ディスクカッタ摩耗との比較が可能であったこと。
- 3) 旋削試験、力学試験、薄片観察などを実施し、岩石の摩耗能を評価した上で、ディスクカッタ摩耗と比較したこと。

2. 飛騨トンネルの概要と、室内試験による岩盤特性の把握

2・1 トンネルの概要

飛騨トンネルは、東海北陸自動車道の飛騨清見ジャンクションと白川郷インタチェンジの間に位置し、標高1,744mの初榊山を東西に貫く、10.7kmの長大道路トンネルである。トンネルは本坑と避難坑からなり、本坑施工時の地質の把握や水抜き効果を目的として、本坑に先行して平成8年10月から避難坑の掘削が開始され、平成18年3月に貫通した。

Fig.1に飛騨トンネル本坑の地質断面図を示す。白川側坑口は庄川本流の右岸に位置し、河合側坑口は神通川水系小鳥川の支流栗ヶ谷川の下流部に位置する。トンネルの標高は520m～730mで、最大土被りは初榊山山頂付近で約1,050mである。山頂付近はなだらかであるが、山腹斜面は急峻であり、崩壊箇所も各所に見られる。

平成18年5月までにFig.1に示すように、濃飛流紋岩類、花崗斑岩および飛騨片麻岩類で構成された3,043mを白川側から河合側に向かって、掘削径12.84mのTBMで掘削した。以下ではTBMを発進させた地点(白川側)を原点とし、河合側に向かって掘削した距離を距離程として示す。

飛騨トンネルは日本でも有数の断層系である跡津川断層系と御母衣断層系の近傍に位置し、坑内においても小断層や板状節理が発達した地山が観察された。コア強度は非常に大きい、不連続面の発達している点や大断面である点から、切羽の自立性は一般に不良であった⁹⁾。特にTBM掘削当初に現れた濃飛流紋岩類は板状節理が発達し、切羽中央部がドーム状に崩落することが度々あり、TBMの中心付近に位置するディスクカッタは岩盤と接触

Table 1 Results of the laboratory experiments.

Rock	Sample No.	Sampling location (m)	Specific gravity	Color	Uniaxial compressive strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Indirect tensile strength (MPa)	Shore hardness	Length of wear flat in turning operation test (mm)
Nouhi rhyolite	1	80	2.62	White	357	69.8	0.24	20.3	108	0.56
	2	1,580	2.70	Light Gray	479	79.4	0.24	19.7	103	0.91
	3	1,700	2.66	Gray	181	83.6	0.20	19.0	95	0.72
	Average	-	2.66	-	339	77.6	0.23	19.7	102	0.73
Granite porphyry	4	1,740	2.66	Light Gray	308	70.9	0.24	17.6	98	0.40
	5	-	2.64	Light Gray	262	70.2	0.26	24.2	103	0.51
	Average	-	2.65	-	285	70.6	0.25	20.9	101	0.46
Hida gneiss	6	-	2.67	White	238	70.8	0.21	21.7	96	0.66
	7	-	2.66	Gray	241	68.0	0.23	21.5	97	0.64
	8	-	2.77	Black	169	63.8	0.20	22.5	90	0.46
	Average	-	2.70	-	216	67.5	0.21	21.9	94	0.59

Table 2 Chemical composition determined by X-ray analytical microscope (wt %).

Rock	Sample No.	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	MnO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
Nouhi rhyolite	1	0.0	92.1	5.5	0.8	0.2	0.1	1.4
	2	6.3	82.1	2.7	3.1	0.4	0.1	4.7
	3	6.5	83.6	4.8	1.7	0.4	0.1	2.3
	Average	4.3	85.9	4.3	1.8	0.3	0.1	2.8
Granite porphyry	4	0.0	90.5	3.8	2.3	0.3	0.1	2.9
	5	4.6	89.3	2.4	1.9	0.3	0.0	1.0
	Average	2.3	89.9	3.1	2.1	0.3	0.1	2.0
Hida gneiss	6	5.1	85.9	2.4	5.0	0.2	0.0	1.4
	7	0.0	95.6	0.5	2.4	0.1	0.1	1.2
	8	9.1	84.5	0.4	2.9	0.5	0.1	2.4
	Average	4.7	88.7	1.1	3.4	0.3	0.1	1.7

Table 3 Identification table for minerals in thin section (wt %).

Rock	Sample No.	Quartz (%)	Matrix* (%)	Feldspar (%)	Plagioclase (%)	Potassium feldspar (%)	Chlorite (%)	Vitric volcanic mineral (%)
Nouhi rhyolite	1	0.3	90.9	0.2	2.2	1.8	0.0	0.0
	2	8.0	56.7	0.0	29.3	0.5	1.0	2.1
	3	2.6	88.1	1.5	0.0	0.0	0.3	0.0
	Average	3.6	78.6	0.6	10.5	0.8	0.4	0.7
Rock	Sample No.	Quartz (%)	Plagioclase (%)	Potassium feldspar (%)	Chlorite (%)	Epidote (%)	Titanite (%)	Carbonate mineral (%)
Granite porphyry	4	17.9	41.0	30.0	5.3	2.7	0.1	0.0
	5	20.5	48.5	23.6	4.0	1.8	0.0	0.0
	Average	19.2	44.8	26.8	4.7	2.3	0.1	0.0
Hida gneiss	6	40.2	29.0	4.4	5.3	17.9	0.6	2.3
	7	49.3	31.3	6.0	4.1	2.6	0.4	0.3
	8	0.1	61.4	3.0	15.6	12.7	1.2	0.1
	Average	29.9	40.6	4.5	8.3	11.1	0.7	0.9

* Grain size < 0.03 mm

Fig.2 Microphotographs of thin section (crossed nicols).

しないことも多く見られた。

2・2 化学試験および薄片観察結果

試料岩石は Table 1 に示すように飛驒トンネルの 8 地点から採取した。濃飛流紋岩類は、TBM 掘削当初に現れた白灰色 (試料番号 1)、褐暗灰色を呈した最も強固なもの (試料番号 2)、花崗斑岩との境界部 (試料番号 3) の 3 種類を採取した。花崗斑岩は見た目ではさほど変化がなかったため、2 地点から採取した。飛驒片麻岩類は白色 (試料番号 6)、黒色 (試料番号 8) および両者の混在した灰色 (試料番号 7) を呈したものを採取した。試料番号 1～4 までは本坑と平行に敷設された作業坑、試料番号 5～8 は掘削ずりの盛土場からそれぞれ採取した。

室内力学試験として、一軸圧縮試験、圧裂引張試験およびショア硬度測定を実施した。各番号の試料で 5 本ずつの試験を行い、その平均値を Table 1 に示す。比重は 2.6～2.7 と比較的大きいことから、緻密な構造であることがわかる。一軸圧縮強度は各試料でばらつきはみられるものの強度はかなり大きく、特に試料番号 2 は 479MPa と強固であった。ヤング率は 64GPa～84GPa、圧裂引張強度は 17.6MPa～24.2MPa とかなり高い値を示し、ショア硬度も 100 前後の高い値となった。

X 線分析には、蛍光 X 線像、透過 X 線像、可視像などを同時にマッピング表示する X 線分析顕微鏡 (堀場製作所製 XGT-5000) を用い、分解能 100 μ m のマイクロ X 線ビームを試料に

照射し、発生する二次 X 線のエネルギーレベルから組成を定量的に二次元表示する面分析を行った。試料としては、直径 2.5cm、高さ 1cm に整形した試験片を用いた。Table 2 に酸化物に換算した質量濃度の分析結果を示す。表では SiO₂ の占める割合は 82.1%～95.6% で、ほとんど SiO₂ から形成されている。その他は Al₂O₃、K₂O、CaO、Fe₂O₃ などが混在した組成である。

試料から薄片を作製し、各試料の偏光顕微鏡による薄片写真を Fig. 2 に示す。Fig. 2 の薄片からポイントカウント法 (1000 点) によって、鉱物の同定を行った結果を Table 3 に示す。なお、粒径 0.03mm 以下の粒子は鉱物の同定が困難であったため、基質と分類した。Table 3 に示すように試料番号 1 および 3 の濃飛流紋岩類の粒子は微細な構造をしており、基質が 90% 近くを占めている。野沢ら¹⁰⁾ は濃飛流紋岩類の基質は主に石英で、カリ長石や斜長石が混在した構成であると述べている。他方、試料番号 2 は 1 および 3 と異なり、Fig. 2 に示すように粒径 0.5mm 程度の斜長石や石英を含有している。花崗斑岩の 2 試料は比較的似た鉱物組成であり、石英 19%、斜長石 45%、カリ長石 27% 程度である。飛驒片麻岩類の試料番号 6 と 7 は似ており、石英 45%、斜長石 30%、カリ長石 5% 程度であるが、試料番号 6 では緑れん石が多く存在していた。試料番号 8 は試料番号 6 および 7 と異なり、石英がほとんどみられず、代わりに斜長石や緑泥石が多く見られる。

2・3 旋削試験結果

岩石がカッタを摩耗させる程度は摩耗能と呼ばれるが、岩石の摩耗能に関する従来の研究は多く行われており、いくつかの試験方法が提案されている³⁾。本研究では、比較的簡便で多くの岩石の測定結果が知られている大久保ら⁸⁾の提案した旋削試験を実

Fig.3 Effect of uniaxial compressive strength on length of wear flat in turning operation test⁸⁾. Three new data (■) are plotted in the figure.

施した。旋削試験方法を簡単に記すが、その条件など詳細は大久保⁸⁾を参照していただきたい。旋盤のチャックで直径40mmのボーリングコアを把持し、超硬チップ付きのバイトで試験片の右端面を外周から順次中心に向かって切削する方式である。1回あたりの切り込み深さを1mmとし、10回(10mm)切削したときの超硬チップの摩耗長を測定する方法である。

各試料に対して、同一条件で3回以上の旋削試験を行ったが、ほとんどばらつきはみられなかった。各試料のチップ摩耗長をTable 1に示す。Table 1には岩種ごとのチップ摩耗長の平均値も示したが、濃飛流紋岩類は0.73mm、花崗斑岩は0.46mm、飛騨片麻岩類では0.59mmであった。濃飛流紋岩類では試料番号1<3<2の順にチップ摩耗長が大きくなった。一般的に石英成分の濃度が高く、粒径が大きい場合に摩耗能が高いといわれている³⁾。Fig. 2に示したように、試料番号2は試料番号1、3に比べ粒径の大きな斜長石や石英を含んでいるため、チップ摩耗長が大きくなったものと考えられる。花崗斑岩では試料番号4に比べ試料番号5のチップ摩耗長が大きかった。石英は17.9%と20.5%の違いであるが、斜長石が多く見られることも関係している可能性が考えられる。飛騨片麻岩類では試料番号8の黒色に比べて、試料番号6の白色および7の灰色の方がチップ摩耗長が大きくなった。Table 3をみると試料番号6および7の石英成分が多いことから妥当な結果であろう。

大久保⁸⁾は比較的硬質な50種類の岩石を用いた旋削試験を行い、各種の試験結果との相関を調べた。Fig. 3は大久保⁸⁾の旋削試験におけるチップ摩耗長と一軸圧縮強度との関係である。多少のばらつきはみられるものの、花崗岩では傾き5/1000(mm/MPa)、石英斑岩では傾き3/1000(mm/MPa)、安山岩や砂岩は傾き2/1000(mm/MPa)、凝灰岩は傾き1/1000(mm/MPa)の直線上に位置する傾向がみられた。飛騨トンネルの結果をFig. 3に■で示したが、濃飛流紋岩類および花崗斑岩はおおむね傾き2/1000(mm/MPa)の直線付近にあり、安山岩や砂岩の摩耗状況に近いことがわかる。濃飛流紋岩類では多くのSiO₂が含まれるが、基質に多く含まれる石英の粒径が小さい(0.03mm以下)ことから、また花崗斑岩では粒径は2mm～5mm程度であるが、含有率が20%と比較的少ないことから、Fig. 3のような結果となったものと考えられる。飛騨片麻岩類では傾き3/1000(mm/MPa)の直線付近に位

Table 4 Specifications of TBM.

Type of TBM	Improved open type
Tunnel diameter	12.84 m
Length of TBM	160 m
Weight of TBM	28.9 MN
Type of cutter head	Dome type
Cutter-head rotation rate	0 – 4 rpm
Number of cutters	88
Cutter diameter	483 mm (19 inch)
Cutter shape	Flat type
Maximum applicable thrust	55.4 MN
Maximum applicable torque	31.8 MNm

Fig.4 Cutter-head with 88 disc cutters.

置している。これは花崗斑岩と比較すると、Fig. 2に示すように石英などの粒径は同程度であるが、Table 3に示すように石英含有率が大きくなっているためと考えられる。

3. TBM の概要とカット摩耗

3・1 TBM の概要

飛騨トンネル本坑のTBMの諸元をTable 4に示す。本TBMはシールド型TBMで採用されている、支保用RCライナー(Reinforced Concrete Liner)をシールドジャッキで推進する機構を有したオープン型TBM(改良オープン型⁵⁾)である。なお、本研究で対象とする距離程3,043mまでは、ほぼ全区間をRCライナーとシールドジャッキを使用した推進によって掘削を行った。

ディスクカッタ配置をFig. 4に示す。カッタヘッドにはカッタ番号G1, G2, G3のゲージカッタ3個、カッタ番号1～77までのシングルカッタ77個、およびツインハブタイプのセンタカッタ8個の計88個が装着されている。ゲージカッタの旋回半径は3個とも6,420mmで同一軌跡を描く。カッタ間隔はセンタカッタで101mm、内側のカッタ番号15～77は80mm間隔で配列されており、これらはカッタヘッド面盤が平面状の部分に装着されている。外周部のカッタ番号1～14のシングルカッタは、カッタヘッド面盤がドーム状を呈した個所に装着されているため、カッタがトンネル軸方向に対し斜めに切り込む形となり掘削効率

Fig.5 Variations of thrust and cutting-depth with tunnel distance.

Fig.6 Variations of cutter wear, rock strength and cutter-head rotations with tunnel distance.

が低下する点や、外周部ほど転走距離が長くなる点を考慮して、カッタ間隔は 75mm ～ 8mm と外周に行くほどカッタ間隔が狭くなるように配置されている。

ディスクカッタのカッタ径はすべて 483mm (19inch) で、ディスクカッタの刃先は平型と呼ばれる扁平状の形状⁵⁾をしたものを用いた。ディスクカッタに作用する荷重はカッタハブのベアリングで支えることからその荷重には限界があり、今回使用した 483mm のディスクカッタでは 320kN とされている¹¹⁾。カッタは合計 88 個装着されているので、本 TBM のカッタを押す推力としては 28.2MN が限界となる。

3・2 TBM の運転操作状況と岩盤強度

飛騨トンネル本坑での TBM の運転操作状況を明らかにするため、Fig. 5 に推力および切り込み深さ (カッタヘッド 1 回転あたりの掘進長) の距離程に対する変化を示す。なお、図は掘進長 100m あたりの平均値で示した。図中で推力はほぼ 20MN ～ 25MN の間であるが、切り込み深さが小さくなった区間で 25 MN を超えるところもみられる。本 TBM ではカッタハブのベアリングを破損させないように推力の上限を 28.2MN と設定しているため、ほぼ推力が上限に近い値となるように運転操作が行われていることが図からわかる。

TBM の推力 F 、切り込み深さ P 、あるいは P の逆数である掘進長 1m あたりのカッタヘッド回転数 R (以降、カッタヘッド回転数と略す) を用い、次式¹²⁾により岩盤強度 σ_C を求めた結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 は Fig. 5 と同様に、掘進長 100m あたりの平均値で示した。

Fig.7 Photo of a worn cutter.

Fig.8 Increase of cutter wear with tunnel distance.

$$\sigma_C = \frac{F}{aP} = \frac{FR}{a} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし a は定数であり、福井ら¹²⁾の推定式から $a = 54m$ とした。なお、式 (1) で表される岩盤強度とは、岩石の一軸圧縮強度に断層や亀裂、風化などの劣化要因が加わったものである⁷⁾。図では距離 1,300m 付近までの濃飛流紋岩類の岩盤強度はほぼ 40MPa 付近であるが、1,300m 以降で急激に増加し、1,800m 付近では 230MPa となった。その後、花崗斑岩に入ると岩盤強度は急激に低下した後に再度徐々に増加し、2,300m 付近では 120MPa であった。飛騨片麻岩類に入ると岩盤強度は急激に増大し、250MPa に達した。

Fig. 5 の説明で述べたように、推力がほぼ一定で TBM の運転操作がなされているため、(1) 式から予測できるように、岩盤強度とカッタヘッド回転数とはほぼ比例する。Fig. 6 にはカッタヘッド回転数の変化も示したが、岩盤強度の変化の傾向とよく一致している。

3・3 カッタ摩耗の測定結果

ディスクカッタの損摩は、掘削に伴いカッタ外縁が均等に徐々に摩耗していく通常摩耗の他に、部分的に摩耗して使用不能となる偏摩耗、割れや欠けによる破損およびハブの損傷などがあり、飛騨トンネル本坑ではどの様式も見られたが、本研究では岩盤特性や TBM の運転操作状況と密接に関係を持つと考えられる通常摩耗を対象とすることにする。

掘進長約 20m ごとに、Fig. 7 に示す摩耗量測定ゲージにより

Fig.9 Cutter wear as functions of cutter position.

Fig.10 Increase of cutter wear with rock strength.

カッター摩耗量の測定を行った。この際、カッター摩耗量の測定ではカッターの偏摩耗や、割れおよび欠けは含まないようにした。

カッター取り付け位置ごとの累積カッター摩耗量の距離程による変化を Fig. 8 に示す。図には一例として 9 個所の取り付け位置による結果を示した。カッター番号が小さくなる（カッター取り付け位置が外側になる）に従い、累積カッター摩耗量が增大していることがわかる。距離程 1,500m ～ 1,900m および 2,500m 以降でカッター摩耗量が大きくなる傾向は、取り付け位置にかかわらず、すべてのカッターでみられた。ただし、距離程 500m までカッター番号 21 以降でほとんどカッター摩耗が生じていないが、これは 2・1 で述べたように距離程 500m までの濃飛流紋岩類の掘削において、ドーム状の切羽崩落によって内側のカッターが岩盤を切削していなかったためである。

Fig. 9 (a) に、距離程 3,043m までの掘削体積 1m³ あたりの各カッターの平均摩耗量を示す。図の横軸のカッター位置は、TBM の中心からカッター位置までの距離を表す。図ではカッター位置 5,500mm までは単位体積あたりの摩耗量はほぼ線形に近い関係で増加しているが、5,500mm より外周に取り付けられたカッターでは急激に増加している傾向がみられ、外縁に近いカッター番号 2 ～ 8 では摩耗量が約 0.0035mm/m³ と非常に多かった。また、ゲージカッターの結果を□で示したが、カッター番号 2 ～ 8 の 80% 程度の摩耗量であった。これは 3・1 で述べたように、3 個のゲージカッターが同一軌跡を描くためであり、3 個の摩耗量を合計すると 0.008mm/

m³ となり、この値は外周部のシングルカッター 1 個あたりの摩耗量より大きい。

Fig. 9 (b) に、転走距離 (TBM のカッターヘッドの旋回によってカッターが岩盤を切削した距離) 1km あたりの各カッターの平均摩耗量を示す。カッター位置 2,000mm まで摩耗量は 0.01mm/km とほぼ一定であるが、2,000mm を超えると徐々に摩耗量が増え始め、5,500mm では 0.02mm/km となっている。それより外側では急激に摩耗量が大きくなり、0.07mm/km に達している。このように単位転送距離あたりにしても、外周部から 1m 以内に取り付けられた摩耗量は大きくなった。図にはカッターヘッドがドーム構造となり始めるカッター番号 14 を示したが、その前のカッター番号 17 と比較してカッター摩耗が顕著に大きくなる傾向が見られた。ドーム構造部に取り付けられたカッターは進行方向に対して、斜めに切り込むことになるため、当然カッター摩耗量が増大することとなる。しかし、カッター番号 15 ～ 17 でも摩耗量が大きいことから、TBM 下方に堆積した掘削ずりの二次破碎による摩耗が加算されている可能性が高いと考えられる。

これまではカッター取り付け位置によるカッター摩耗の変化をみてきたが、岩盤の特性によって摩耗量が増減する傾向はほぼ同じであることが確認できたため、すべてのディスクカッター摩耗量の合計を用いて検討を進めることにする。

掘進長 100m ごとのディスクカッター摩耗量から掘進長 1m あたりの平均摩耗量を求めた結果を Fig. 6 に示す。図では最初 3mm/m ～ 5mm/m 程度であった摩耗量が徐々に増加し、距離程 1,800m 付近では 20mm/m であった。濃飛流紋岩類から花崗斑岩に入ると、2,000m 付近で摩耗量は急激に低下し、2,000m を過ぎると再度、摩耗量の増加がみられた。2,800m 付近では摩耗量は 15mm/m であり、飛騨片麻岩類に入ってもほぼ同様であった。Fig. 6 では 1,200m ～ 1,800m (濃飛流紋岩類) および 2,000m ～ 2,700m (花崗斑岩) で岩盤強度やカッターヘッド回転数の増加に従い、カッター摩耗量が増加している傾向がみられる。

岩盤強度は、岩石の一軸圧縮強度に風化や亀裂などを考慮した岩盤強度を表す指標であるため、岩盤強度が大きくなる（岩石の一軸圧縮強度が大きい、亀裂や風化度合いが少ない）と、カッター摩耗量は増大することが考えられる。Morimoto and Hori¹³⁾ は早戸導水路トンネルにおいて TBM 掘削時の岩盤等級が高いほど、カッター摩耗量が大きかったと報告している。他方、福井ら⁷⁾ は岩盤強度をいくつかに分割することによって岩盤分類を行うことができることを報告しており、これらからも岩盤強度が大きいほ

Fig.11 Increase of cutter wear with the number of cutter-head rotations.

Fig.12 Increase of cutter wear with (rock strength) × (length of wear flat).

どカッタ摩耗量が多いことが類推できる。Fig. 10 には、掘進長 100m ごとの平均カッタ摩耗量と岩盤強度の関係を示した。岩盤強度の増加に従い、カッタ摩耗量が増加している傾向がみられる。花崗斑岩と飛驒片麻岩類はほぼ同じような傾向がみられるが、濃飛流紋岩類では他の 2 岩種に比べ岩盤強度に対するカッタ摩耗量が多いことがわかる。

カッタの転走距離はカッタヘッド回転数に比例するため、単位掘進長あたりのカッタヘッド回転数が多くなれば、カッタ摩耗量が増大することが考えられる。Fig. 11 には、掘進長 1m あたりのカッタ摩耗量とカッタヘッド回転数の関係を示した。岩盤強度と同様にカッタヘッド回転数の増加に従い、カッタ摩耗量も増加する傾向がみられた。また、花崗斑岩と飛驒片麻岩類はほぼ同じような傾向がみられるが、濃飛流紋岩類ではカッタヘッド回転数に比べカッタ摩耗量が多い点も、Fig. 10 の岩盤強度と同様の結果である。

上記のように、岩盤強度が大きい場合や、単位掘進長あたりのカッタヘッド回転数が大きい場合には、カッタ摩耗量が大きくなることがわかった。しかしながら、飛驒トンネル本坑では推力をほぼ一定に近い状態で掘削を行ったため、Fig. 6 の説明で述べたように、岩盤特性を表す岩盤強度と、TBM の運転操作で決まるカッタヘッド回転数とはほぼ比例した。そのため、岩盤強度あるいはカッタヘッド回転数がカッタ摩耗に及ぼす影響を分離して検討することができなかった。この点の解明には推力を変化させた

Fig.13 Increase of cutter wear with (cutter head rotations) × (length of wear flat).

際のデータの取得が必要で、この点は今後の課題である。

4. カッタ摩耗の指標

旋削試験の結果、摩耗能は濃飛流紋岩類＞飛驒片麻岩類＞花崗斑岩の順であった。他方、Fig. 10 および Fig. 11 に示したカッタ摩耗量と、岩盤強度やカッタヘッド回転数の関係では、カッタ摩耗量は濃飛流紋岩類＞飛驒片麻岩類＝花崗斑岩という結果であり、定性的に同じ傾向がみられた。このように、カッタ摩耗量には摩耗能の影響が現れていることがわかる。

岩石の掘削能率やカッタ摩耗の指標として、岩石強度および摩耗能を組み合わせたものを用いることが多い^{3,4)}。例えば、Tarkoy³⁾ はシュミットハンマーの反発値と摩耗硬度を組み合わせた Total Hardness を TBM の掘進速度やカッタ摩耗の指標として提案した。本研究では岩石強度として TBM の掘削抵抗から得られた岩盤強度を、摩耗能としては旋削試験のチップ摩耗長を用いて、カッタ摩耗の指標を検討することにする。

原位置の岩盤を対象とした場合には、断層や亀裂、風化などの劣化要因も考慮する必要がある。TBM の掘削抵抗から得られた岩盤強度は、岩石の一軸圧縮強度だけでなく、断層や亀裂、風化などの劣化要因も加味されているため、原位置の岩盤を対象とした場合には、有用な指標であると考えられる。

まず単純に岩盤強度と旋削試験のチップ摩耗長を掛け合わせたものを指標として検討する。Fig. 10 と Fig. 11 の横軸を、この指標とした図をそれぞれ Fig. 12 と Fig. 13 に示す。Fig. 12 および Fig. 13 において、破線で囲んだ 4 点以外は図中の最小二乗法より求めた回帰直線の近傍に存在しており、岩種の影響がほとんどみられない。

Fig. 13 の回帰直線はほぼ原点を通るが、Fig. 12 の回帰直線の横軸切片は 20MPa・mm 程度であった。この理由として岩盤強度の推定の際、(1) 式の推力はカッタを押す力であるが、実際にはカッタヘッドを押すシリンダ推力を用いたため、摩擦損失を含んでしまいこれがオフセットになったと考えられる⁷⁾。そこで、次式に示すトルク T から求めた岩盤強度を用いてみることにした。

$$\sigma_c = \frac{T}{bP^{1.5}} \quad \text{..... (2)}$$

ただし b は定数であり、 $b = 120\text{m}^{1.5}$ とした。Fig. 14 に示すように、回帰直線はほぼ原点を通る関係となった。

破線で囲んだ 4 点は岩盤が硬質でカッタの偏摩耗や、割れ・欠けが多発した区間である。本研究ではカッタの偏摩耗や、割れ・

Fig.14 Increase of cutter wear with (rock strength estimated by torque)×(length of wear flat).

欠けは別現象であるとの考えから通常摩耗を対象とし、摩耗量の測定では通常摩耗以外の摩耗は測定結果から除外するように心がけた。しかしながら、破線で囲んだ4地点では偏摩耗や、割れ・欠けが多発し、図をみる限り、摩耗量の測定において偏摩耗や、割れ・欠けだけでなく、通常摩耗をも除外してしまった可能性があると考えられる。この4点を除いた本研究の結果からは、掘進長1mあたりのカッタ摩耗量は、旋削試験結果と岩盤強度、あるいはカッタヘッド回転数によりある程度予想できることがわかる。

指標として岩盤強度とチップ摩耗長を単純に掛け合わせるだけでなく、Total Hardness⁴⁾のように平方根をとった場合を検討したが、直線性はよいものの原点を通らない直線となり、扱いが複雑になることがわかった。この他、様々な試行錯誤を試みたが、今回の結果に限っては、単純に岩盤強度とチップ摩耗長を掛け合わせた指標が最も実用性が高いものと判断した。

西澤・三谷¹⁴⁾は、花崗岩（一軸圧縮強度50MPa～230MPa）からなるトンネルを、掘削径2.6mのTBMで掘削した際の転走距離1kmあたりの各カッタの平均摩耗量を求め、最外周部で0.1mm/km、外周から600mmで0.025mm/kmと報告している。Fig.9(b)に示した本研究の結果と近い値である。Fig.3において、傾き5/1000(mm/MPa)に相当する花崗岩で一軸圧縮強度を平均値の140MPaとすると、チップ摩耗長は0.7mmに相当する。これは飛騨片麻岩類や花崗斑岩より大きく、濃飛流紋岩類より若干小さい値となり、飛騨トンネル本坑の平均に近い値である。このことから、西澤・三谷¹⁴⁾の事例も今回の指標が適用できる可能性があると考えられる。

5. ま と め

TBMによるトンネル掘削ではカッタの摩耗が激しい場合がある。その際には、カッタ費用の増加やカッタ交換による時間的損失など施工上重要な問題が生じる。そのため、カッタ摩耗に関する指標の構築が重要な研究課題であると考え、本研究では飛騨トンネルを対象としてカッタの摩耗に関する検討を行った。

まず、室内での岩石力学試験および旋削試験を実施し、岩種ごとの力学的特性および摩耗能を調べた上で、飛騨トンネル本坑でのカッタ摩耗量と室内試験結果の比較検討を行った。その結果、岩盤強度(×掘進長1mあたりのカッタヘッド回転数)に、単純に旋削試験におけるチップ摩耗長を掛けるだけである程度、カッタ摩耗量が推定できることを示した。すなわち、(岩盤強度)×(旋削試験のチップ摩耗長)は、カッタ摩耗の指標となりうる可能性があることを示した。

TBMのディスクカッタの摩耗現象は岩種だけでなく、他の要因(切羽の状況、カッタの形状など)にも影響されるため、今回の結果は一例にすぎず、今後データの蓄積を行い、旋削試験からビット摩耗を類推できるようにすることが今後の課題である。また、今回は通常摩耗だけを扱った結果を述べたが、飛騨トンネルでは偏摩耗やカッタ外縁の破損、ハブの摩耗が多くみられ、これらがカッタ費用の大部分を占めた。しかしながら、これらの破損などは硬質な岩石が衝撃的に作用した結果であるため、確率的な影響が大きく作用しているものと考え、今回の検討から除外した。この点も今後検討していく必要がある。

References

- 1) P. P. Nelson, T. D. O'Rourke and F. H. Kulhawy: Design and performance of underground excavations, ISRM/BGS, (1984), pp.239-246.
- 2) T. Tanimoto, S. Yamanaka, K. Tsusaka, T. Nakane, M. Hirano, H. Kanzaki, S. Abe and S. Iwata: Zairyo, **55** (2006), 29-36.
- 3) U. Yamaguchi and Y. Nishimatsu: *Gansekai-Rikigaku-Nyuumon*, (University of Tokyo Press, Tokyo, 1991), pp.169-177.
- 4) P. J. Tarkoy: Proc. 15th Symposium On Rock mechanics, (1973), pp.415-447.
- 5) Nihon-Tonnneru-Gijyutsu-Kyoukai: *TBM-Hando-Bukku*, (Nihon-Tonnneru-Gijyutsu-Kyoukai, Tokyo, 2000), p.14, 26-30, 214-225.
- 6) P. P. Nelson, A. R. Ingrassia and T. D. O'Rourke: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., **22** (1985), 189-192.
- 7) K. Fukui and S. Okubo: Tonneru-to-Chika, **28** (1997), 123-131.
- 8) S. Okubo, A. Ota, M. Akiyama, K. Fukui and Y. Nishimatsu: Journal of MMIJ, **113** (1997), 325-332.
- 9) M. Kawakita, I. Otsuka, M. Iwano, S. Shimano and M. Matsubara: Proc. 15th of Tunnel Engineering, (2005), pp.69-76.
- 10) T. Nozawa, K. Kawada and M. Kawai: Quadrangle series, Kanazawa(10), No.43 (1979), 60-63.
- 11) Y. Minami and K. Morioka: Kensetsu-No-Kikaika, March (1999), 57-63.
- 12) K. Fukui, S. Okubo and K. Oda: Journal of MMIJ, **118** (2002), 392-398.
- 13) T. Morimoto and M. Hori: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., **23** (1986), 55-66.
- 14) I. Nishizawa and N. Mitani: Journal of MMIJ, **112** (1996), 505-510.