

飛驒トンネル本坑における TBMのディスクカッタの摩耗に関する研究

福井勝則^{1*}・大久保誠介¹・森山 守²・青木智幸³・小塚 孝⁴・松原 誠⁵

¹東京大学 工学系研究科 地球システム工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²中日本高速道路 清見工事事務所 (〒506-0101 岐阜県高山市清見町牧ヶ洞2447)

³大成建設 技術センター 土木技術研究所 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

⁴大成・西松・佐藤JV 東海北陸道飛驒トンネル工事 (〒501-5627 岐阜県大野郡白川村荻町字寺田3296)

⁵地層科学研究所 (〒501-5627 岐阜県大野郡白川村荻町字寺田3296)

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

東海北陸自動車道飛驒トンネル本坑では、国内最大の掘削径12.84 mのTBMによって、濃飛流紋岩、花崗斑岩および飛驒片麻岩で構成された硬岩地帯を掘削した。このような硬岩を掘削した際には、ディスクカッタの摩耗が問題となる。本研究では、TBMのカッタヘッド回転数などの運転操作状況や岩盤強度と、カッタ摩耗量との関係について検討し、同一岩種におけるカッタ摩耗量は、岩盤強度やカッタヘッド回転数（掘進長1 mあたり）にほぼ比例することを示した。さらに、岩石の摩耗能を測定するために旋削試験を実施し、岩盤強度やカッタヘッド回転数に、旋削試験におけるチップ摩耗長を乗じることでカッタ摩耗量が推定できることを示した。

Key Words : tunnel boring machine, wear, abrasive, hard rock, uniaxial compressive strength

1. はじめに

全断面トンネル掘進機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、その際にはカッタの経費増加だけでなく、カッタ交換による時間的損失が生じるなどの施工上重大な問題をもたらす。しかしながら、ディスクカッタの摩耗に関する報告¹⁾³⁾は少なく、岩種ごとにカッタ摩耗量を求めている程度で、岩盤特性や運転状況によるカッタ摩耗の変化に関する知見はほとんど知られていないのが現状である。

東海北陸自動車道飛驒トンネル本坑は、国内最大の掘削径のTBMで掘削しており、濃飛流紋岩および花崗斑岩を掘削した際のディスクカッタの摩耗状況を途中経過として既報⁴⁾で報告した。既報⁴⁾では、二次破碎に起因して外周部のカッタ摩耗が激しくなっている点や、岩種が同じであれば岩盤強度とカッタ摩耗量との間には相関が見られることを示した。

本研究では、室内での岩石力学試験、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上で、飛驒トンネル本坑でのカッタ摩耗量と室内試験結果との比較検討を行った結果について述べる。その際、TBMの運転状況を考慮し、カッタヘッド回転数や掘削抵抗から求めた岩盤強度との比較検討を行う。既報⁴⁾で対象としたのは2岩種（濃飛流紋岩および花崗斑岩）であ

ったが、本研究では飛驒片麻岩の追加検討を加えた。

2. トンネルおよびTBMの概要⁴⁾

飛驒トンネル本坑の地質縦断図を図-1に示す。平成18年5月までに濃飛流紋岩、花崗斑岩および飛驒片麻岩で構成された3.0 km強を白川側から河合側に向かって、掘削径12.84 mのTBMで掘削した。以下ではTBMを発進させた地点を原点とし、河合側に掘削した距離を距離程として表す。トンネルおよびTBMの概要については、既報⁴⁾を参照いただきたいが、以下に簡単に述べる。

飛驒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⁵⁾。

カッタヘッドにはゲージカッタ3個、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6,420 mmで同一軌跡を描く。ディスクカッタの軌道間隔はセンタカッタで101 mm、内側のカッタ番号15～77は80 mm間隔で配列されて

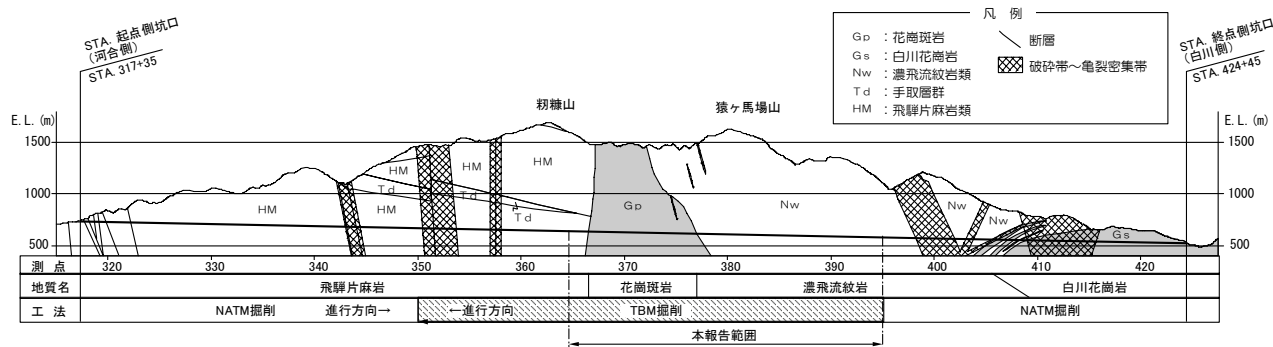


図-1 地質縦断面図

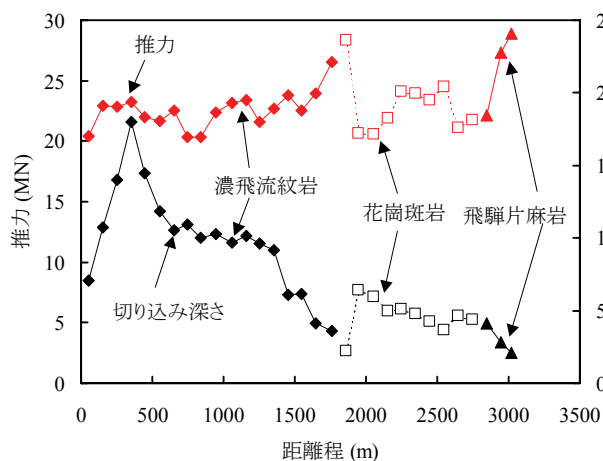


図-2 推力および切り込み深さの距離程による変化

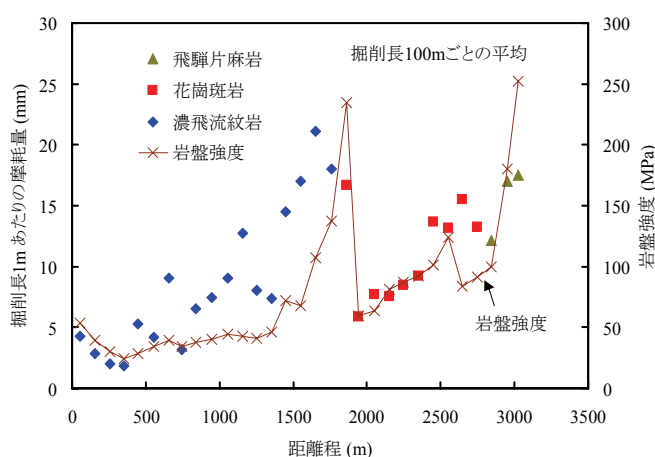


図-3 岩盤強度およびカット摩耗量の距離程による変化

いる。これらはカットヘッド面盤が平面状の部分に装着されている。外周部のカット番号1～14のシングルカットは、75 mm～8 mmと外周に行くほど軌道間隔を狭く配置している。ディスクカットのカット径はすべて483 mm (19 inch) であり、ハブの耐力は320 kNである。

3. 飛驒トンネル本坑での施工結果

飛驒トンネル本坑での TBM の運転操作状況を明らかにするため、図-2 に推力および切り込み深さ（掘進長 100 m あたりの平均値）の距離程に対する変化を示す。図中の推力はほぼ 20 MN～25 MN 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 ではハブの耐力から推力の上限を 30 MN 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 および切り込み深さ P を用い、次式⁶⁾により岩盤強度 σ_c を求めた結果を図-3 に示す。

$$\sigma_c = aF / P = aFR \quad (1)$$

ただし a は定数であり、福井ら⁷⁾ の推定式から $a = 54$ m とした。なお、(1) 式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。図では距離程 1,300 m 付近まで岩盤強度はほぼ 40 MPa 付近であるが、1,300 m 以降で急激に増加し、1,800 m 付近では 230 MPa となった。その後、岩盤強度は急激に低下した後に再度徐々に増加し、2,300 m 付近では 120 MPa であった。飛驒片麻岩に入ると岩盤強度は急激に増大し、250 MPa に達した。

ディスクカットの損摩は、カット外縁が掘削に伴い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、飛驒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した。

掘削長約 20 m ごとに、摩耗量測定ゲージによりカット摩耗量の測定を行った。この際、カット摩耗量の測定ではカットの偏摩耗や、割れおよび欠けは含まないようにした。

掘削長 100 m ごとのディスクカット摩耗量から掘削長 1 m あたりの平均摩耗量を求めた結果を図-3 に示す。図では最初 3 mm～5 mm 程度であった摩耗量が徐々に増加し、距離程 1,800 m 付近では 20 mm であった。濃飛流紋岩から花崗斑岩になると、2,000 m 付近で摩耗量は急激に低下し、2,000 m を過ぎると再度、摩耗量の増加がみられた。2,800 m 付近では摩耗量は 15 mm であり、飛驒片麻岩に入ってもほぼ同様であった。

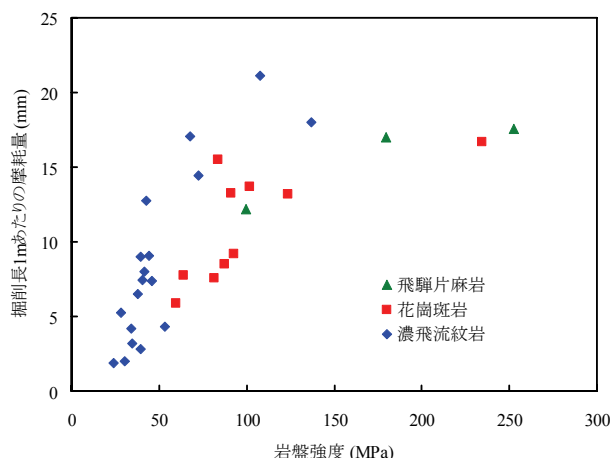


図-4 岩盤強度およびカッタ摩耗量の関係

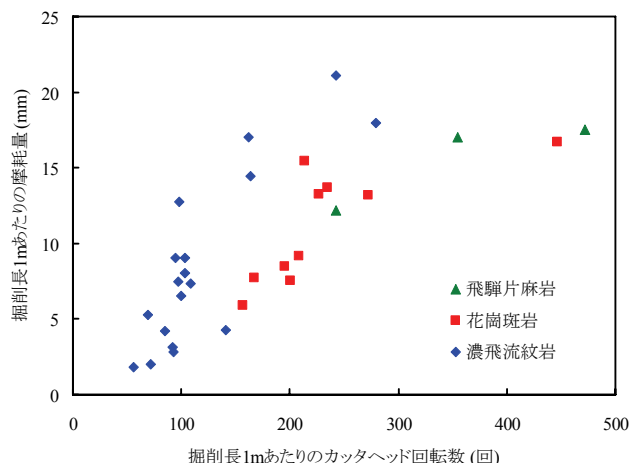


図-5 カッタヘッド回転数とカッタ摩耗量の関係

図-3の岩盤強度とカッタ摩耗量を比較すると、1,200 m ~ 1,800 m（濃飛流紋岩）および2,000 m ~ 2,700 m（花崗斑岩）で岩盤強度が大きくなると、カッタ摩耗量も増加している傾向がみられた。図-4には、掘削長100 m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た。また花崗岩と飛騨片麻岩はほぼ同じような傾向がみられるが、濃飛流紋岩では岩盤強度の割にカッタ摩耗量が多いことがわかる。

図-5には図-4の岩盤強度のかわりに掘削長1 mあたりのカッタヘッド回転数を示した。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している傾向がみられた。図-2で示したようにTBMの運転操作として推力はほぼ一定としたことから、(1)式でわかるように岩盤強度とカッタヘッド回転数 R は比例に近い関係があるためである。

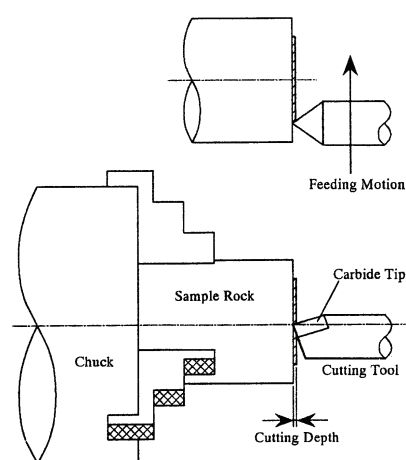


図-6 旋削試験の概念図⁹⁾

4. 力学試験および薄片観察結果

試料岩石は飛騨トンネルの8地点から採取した。濃飛流紋岩は、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種類とした。花崗斑岩は見た目ではさほど変化がないため、2地点から採取した。飛騨片麻岩は白色(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は盛土場からそれぞれ試料を採取した。

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試験を実施した。各試料とも5本ずつ試験を行い、平均値を表-1に示す。比重は2.6 ~ 2.7で大きいことから、緻密な構造であることがわかる。一軸圧縮強度はばらつきがあるものの、試料番号2は479 MPaとかなり強固である。ヤング率は64 GPa ~ 84 GPa、圧裂引張強度は17.6 MPa ~ 24.2

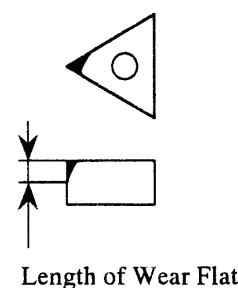


図-7 摩耗長の測定方法の概念図⁹⁾

MPaとかなり高い値を示した。

各試料から薄片を作製し、偏光顕微鏡による薄片観察にて鉱物の同定を行った。その結果を表-2に示す。(a)に示した濃飛流紋岩では0.03 mm以下の粒子がほとんどで基質と判定した。ただし、試料番号2は他の濃飛流紋岩に比べ粒径が大きく、斜長石と判定されたものが他より多かった。(b)に示した花崗斑岩は2試料とも比較的似た結果となり、石英20 %、斜長石45 %、カリ長石25 %程度であった。飛騨片麻岩は試料番号6と7は似ており、石英45 %、斜長石30 %、カリ長石5 %程度であったが、緑れん石だけ

試料番号6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の含有量が多く見られた。

5. 旋削試験結果とカット摩耗に関する考察

岩石がカットを摩耗させる程度は摩耗能⁸⁾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。本研究では、大久保ら⁹⁾の提案した旋削試験を実施した結果について述べる。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ら⁹⁾を参照していただきたい。図-6に旋削試験の概念図を示すが、旋盤のチャックで直径40 mm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1 mmとし、10回(10 mm)

表-1 力学試験および旋削試験結果

岩石名	試料番号	比重	一軸圧縮強度(MPa)	ヤング率(GPa)	ポアソン比	圧裂引張強度(MPa)	ショア硬度	チップ摩耗長(mm)
濃飛流紋岩	1	2.62	357	69.8	0.24	20.3	108	0.56
	2	2.70	479	79.4	0.24	19.7	103	0.91
	3	2.66	181	83.6	0.20	19.0	95	0.72
	平均	2.66	339	77.6	0.23	19.7	102	0.73
花崗斑岩	4	2.66	308	70.9	0.24	17.6	98	0.40
	5	2.64	262	70.2	0.26	24.2	103	0.51
	平均	2.65	285	70.6	0.25	20.9	101	0.46
飛驒片麻岩	6	2.67	238	70.8	0.21	21.7	96	0.66
	7	2.66	241	68.0	0.23	21.5	97	0.64
	8	2.77	169	63.8	0.20	22.5	90	0.46
	平均	2.70	216	67.5	0.21	21.9	94	0.59

表-2 薄片による鉱物同定結果

(a) 濃飛流紋岩

岩石名	試料番号	石英* (%)	基質 (%)	長石 (%)	斜長石 (%)	カリ長石 (%)	不透明鉱物 (%)	緑泥石 (%)	ガラス質火山岩 (%)
濃飛流紋岩	1	0.3	90.9	0.2	2.2	1.8	0.0	0.0	0.0
	2	8.0	56.7	0.0	29.3	0.5	1.8	1.0	2.1
	3	2.6	88.1	1.5	0.0	0.0	6.6	0.3	0.0

(b) 花崗斑岩・飛驒片麻岩

岩石名	試料番号	石英* (%)	斜長石 (%)	カリ長石 (%)	不透明鉱物 (%)	緑泥石 (%)	緑れん石 (%)	チタン石 (%)	炭酸塩鉱物 (%)
花崗斑岩	4	17.9	41.0	30.0	0.9	5.3	2.7	0.1	0.0
	5	20.5	48.5	23.6	1.5	4.0	1.8	0.0	0.0
飛驒片麻岩	6	40.2	29.0	4.4	0.2	5.3	17.9	0.6	2.3
	7	49.3	31.3	6.0	1.2	4.1	2.6	0.4	0.3
	8	0.1	61.4	3.0	2.1	15.6	12.7	1.2	0.1

* 0.03 mm 以上のもの

切削したときの超硬チップの摩耗長を図-7のように測定する方法である。

上記の試験を8試料に対して、同一条件で3回以上の試験を行ったが、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表-1に示す。濃飛流紋岩では試料番号1<3<2の順にチップ摩耗長が大きくなった。薄片による観察では、試料番号2の粒径が他に比べて大きいことから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ことも関係している可能性が考えられる。飛騨片麻岩では試料番号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は大きくなった。表-2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。表-1に平均値を示したが、濃飛流紋岩は0.73 mm、花崗斑岩は0.46 mm、飛騨片麻岩では0.59 mmとなった。

大久保ら⁹⁾では比較的硬質な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ている。図-8は大久保ら⁹⁾の旋削試験でのチップ摩耗長と一軸圧縮強度との関係を示したものである。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図-8に■で示したが、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。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が、濃飛流紋岩類には多くのSiが含まれるが、そのうち結晶化している石英の粒径は小さく(0.03 mm以下)、非晶質のSiも多く含まれていたため、図-8のような結果となったものと考えられる。

旋削試験の結果、摩耗能は濃飛流紋岩>飛騨片麻岩>花崗斑岩の順であった。他方、図-4および図-5に示したカット摩耗量と、岩盤強度やカットヘッド回転数の関係では、カット摩耗量は濃飛流紋岩>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。図-4および図-5の横軸に旋削試験で得られたチップ摩耗長をかけたものを図-9および図-10に示す。図-9および図-10の破線で囲んだ4点以外はほぼ同じ直線上に近いところに存在しており、岩種の影響がほとんどみられなかった。図-10の関係はほぼ原点を通る直線のようにみえるが、図-9では原点から右にずれている。この理由として岩盤強度の推定の際、(1)式の推力はカットを押す力であるが、カットヘッドを押すシリンダ推力を用いたため、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。トルクから求めた岩盤強度を用いた場合には、ほぼ原点を通る直線に近い関係となった。

波線で囲んだ4点は硬質なところで偏摩耗が多発した個所である。本研究では偏摩耗は別現象であることからその影響を除去するために、摩耗量の測定で偏摩耗による摩耗はデータに含めなかった。しか

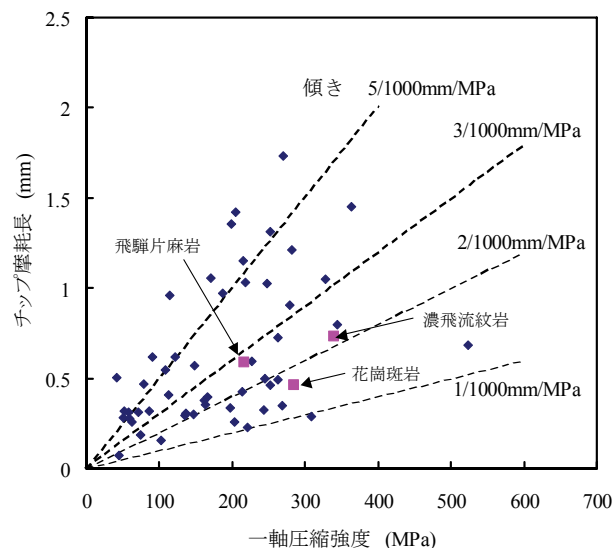


図-8 旋削試験での摩耗長と一軸圧縮強度との関係。大久保ら⁹⁾に、今回のデータを加えた。

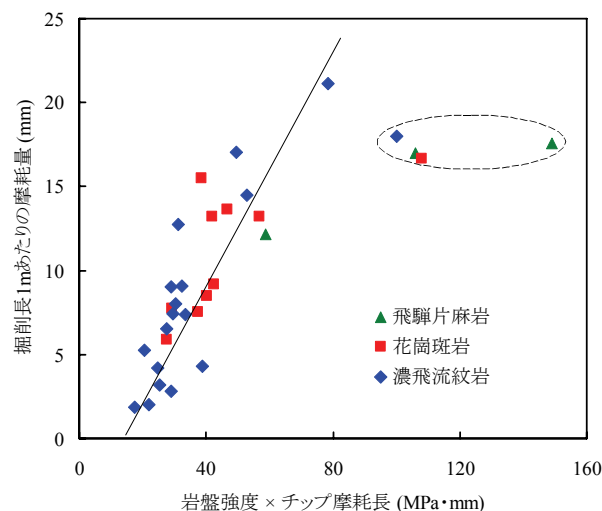


図-9 カット摩耗量と岩盤強度の関係

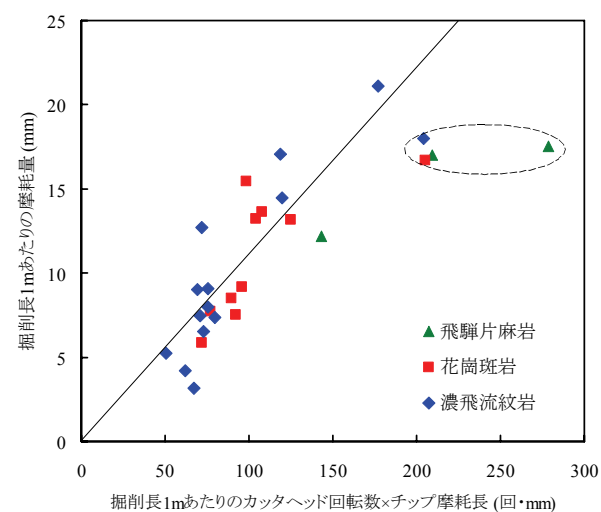


図-10 カット摩耗量とカットヘッド回転数の関係

しながら、図をみる限り偏摩耗だけでなく通常摩耗も含めていなかった可能性が高いと考えられる。この4点を除いた本研究の結果からは、掘削長1 mあたりのカットタ摩耗量は、旋削試験結果と岩盤強度、あるいはカットタヘッド回転数からある程度予想できることがわかる。

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の強度を表すパラメータであるため、岩盤強度が大きくなると、当然カットタ摩耗量は増大する。他方、カットタヘッド回転数はカットタの転走距離に比例するため、当然カットタ摩耗量の増大をもたらす。飛騨トンネルでは推力が一定に近い状態で掘削を行ったため、岩盤強度とカットタヘッド回転数がほぼ比例するという条件下での結果となった。そのため、両者の影響を分離することができず、同じような図となってしまった。この点の解明は今後の課題である。

6. まとめおよび今後の課題

本研究では、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トタ摩耗量と室内試験結果の比較検討を行った。その結果、岩盤強度あるいは掘進長1 mあたりのカットタヘッド回転数に、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、カットタ摩耗量が推定できることを示した。

TBMのディスクカットタの摩耗現象は岩種だけでなく、他の要因（切羽の状況、カットタの形状など）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トタ外縁の破損、ハブ

の摩耗が多くみられ、これらがカット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。

参考文献

- 1) Nelson, P.P., O'Rourke, T. D. and Kulhawy, F.H.: Cutter wear and its influence on tunnel boring machine performance, *ISRM/BGS*, pp.239-246, 1984.
- 2) 西澤泉, 三谷典夫: ディスクカットタの摩耗特性と寿命向上法, 資源と素材, Vol. 112 [No.8], pp.505-510, 1996.
- 3) 谷本親伯, 山仲俊一郎, 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ト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.
- 4) 森山守, 福井勝則, 青木智幸, 小塚孝, 松原誠: 大断面 TBM のディスクカットタ摩耗, 第 16 回トンネル工学研究発表会, 印刷中, 2006.
- 5) 川北真嗣, 大塚勇, 岩野政浩, 島屋進, 松原誠: 大断面 TBM 掘削における岩盤不連続面の定量化に基づく切羽不安定現象の検討, 第 15 回トンネル工学研究発表会, pp.69-76, 2005.
- 6) 福井勝則, 大久保誠介: TBM の掘削抵抗を利用した岩盤物性の把握, トンネルと地下, 28 [No.2], pp.123-131, 1997.
- 7) 福井勝則, 大久保誠介, 小田謙一: TBM の仕様と掘削抵抗の関連について, 資源・素材学会誌, 118 [No.5,6], pp.392-398, 2002.
- 8) 山口梅太郎, 西松裕一: 岩石力学入門(第 3 版), pp.175-176, 東京大学出版会, 1991.
- 9) 大久保誠介, 大田彰則, 秋山政雄, 福井勝則, 西松裕一: 岩石の摩耗能と削岩機のビット摩耗に関する基礎研究, 資源・素材学会誌, Vol.113 [No.5], pp.325-332, 1997.

DISC-CUTTER WEAR OF TBM AT HIDA TUNNEL

Katsunori FUKUI, Seisuke OKUBO, Mamoru MORIYAMA, Tomoyuki AOKI,
Takashi KOZUKA and Makoto MATSUBARA

The main tunnel of Hida Tunnel for Tokai-Hokuriku Highway was excavated by a domestically largest TBM with its diameter of 12.84 m. The TBM have bored over 3.0 km of the tunnel through Nouhi Rhyolite, Granite Porphyry and Hida Gneiss. 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. In this study, cutter wear was examined and discussed considering the cutter-head rotation rate and the rock properties (uniaxial compressive strength, abrasivity etc.). The results indicated that cutter wear can be estimated by strength and abrasivity of rock.