

TBM施工におけるディスクカッタの 摩耗と岩石の鉱物組成

小泉 悠^{1*}・津坂 仁和²・谷本 親伯³・中川 茂男⁴・藤田 直也⁴

¹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)

²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字北進432-2)

³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, CA94104)

⁴京都府道路公社 建設事務所 (〒626-0003 宮津市字漁師1775-26)

*E-mail: yu-koizumi@civil.eng.osaka-u.ac.jp

TBM施工におけるディスクカッタの摩耗は、岩盤掘削に伴う一次破碎摩耗と切羽とカッタヘッドとの間にたまった岩片が再破碎される二次破碎現象に伴う二次破碎摩耗の二つに大別される。本研究では、堆積岩および花崗岩地山の二つの事例について、ディスクカッタの一次破碎摩耗量を新たに定義し、岩石の強度特性とその鉱物の粒子径を考慮した含有率の積で表される修正摩耗能指数との関係性を考察した。その結果、既往の室内試験結果と同様に、一次破碎摩耗と修正摩耗能指数との間には有意な相関関係が得られた。その一方で、両事例を比較すると、同程度の修正摩耗能指数を示す場合においても、一次破碎摩耗量は著しく異なる結果となり、両者においてカッタの摩耗に与える鉱物組成の影響が異なることが示された。

Key Words : TBM, Disc cutter wear, Abrasive minerals, Grain size, F-value, Point load index

1. 緒言

TBM (Tunnel Boring Machine) による山岳トンネルの施工において、ディスクカッタの過剰摩耗の発生は、カッタ費用の増大のみならず、その交換に伴う時間損失を引き起こし、工費および工程に多大な影響を与える。そのため、掘削対象となる地山の事前調査において、カッタ消費量に大きな影響を及ぼす岩石および岩盤の物性を得ることにより、その適切な予測を行うことが重要とされている。

わが国において、カッタの摩耗と相関性を示す岩石物性として、主に一軸圧縮強さや点載荷強さ、石英含有率が挙げられている^{1,2)}。また、大久保ら³⁾は、岩石の摩耗能に関して、多数の室内摩耗試験を実施し、詳細な検討を行っている。さらに、室内試験結果より得られる岩石の硬度や強度、特定の鉱物の含有率を組み合わせることで、カッタ消費量と高い相関性を示す指標の確立が進められてきた。代表的なものとして、BWI (Bit Wear Index)⁴⁾やCAI (Cerchar Abrasiveness Index)⁵⁾、Total Hardness⁶⁾が挙げられる。これらの指標のうち、BWI⁴⁾は丹生屋ら⁷⁾によって現場適用が試みられている。また、谷本ら⁸⁾は、中生代白亜紀の砂岩・頁岩地山の施工事例について、その岩石物性および鉱物組成を分析した結果、

石英含有率および点載荷強さが、ディスクカッタの摩耗と高い相関性を有したことを示している。

一般的に、岩石の鉱物組成に関し、カッタの摩耗を増大させる指標として、岩石中に存在する各鉱物の含有率が挙げられる。一方、それら鉱物の粒子径や形状もカッタの摩耗に影響を及ぼすことが以前から指摘されているが、通常、ポイントカウンター式⁹⁾により算出される鉱物含有率では、それらを考慮することが困難である。これに関して、Shimazek & Natz¹⁰⁾は、鉱物の粒子径が異なる砂岩を用いて室内摩耗試験を行い、摩耗量の計測値と、等価石英含有率および石英粒子径、圧裂による岩石の引張り強さの積である摩耗能指数 F 値との間に有意な相関関係があることを示している。さらに、Ewendt¹¹⁾は、供試体の岩種を増やし、Shimazek & Natz¹⁰⁾の式を再検討することで修正式を提案している。しかし、これらの評価式が実際のTBM施工におけるディスクカッタの摩耗量との間で比較された事例は見られない。

また、TBM施工におけるカッタの摩耗に関連する重要な問題として、二次破碎現象が挙げられる。二次破碎とは、隣接破碎により掘削された岩片、および岩盤不連続面の影響によって切羽から剥離した岩塊を、切羽とカッタヘッドの間で再破碎する現象である。この現象が顕

著となることで、外周部に配置されたカッタやカッタヘッドで著しい摩耗が生じることが報告されている¹²⁾。したがって、TBM施工におけるディスクカッタの総摩耗量を、一次破碎に起因する摩耗と二次破碎に起因する摩耗とに区別して論じることが重要であると考えられる。

以上を踏まえ、本研究では、堆積岩および花崗岩地山における二つのTBM施工（AおよびBトンネル）を対象として、一次破碎に起因するディスクカッタの摩耗量と、採取した岩石試料から算出される修正摩耗能指数の関係を求めた。そして、堆積岩地山と花崗岩地山におけるディスクカッタの摩耗と岩石の鉱物組成の関係の差異について考察した。

2. 対象トンネルおよびTBMの概要とディスクカッタの摩耗量

AトンネルにおけるTBMの掘進延長は2,590mであり、掘削には約8ヶ月が要された。地質は主に中生代白亜紀の砂岩および頁岩からなる。一方、BトンネルにおけるTBMの掘進延長は3,457mであり、掘削には約19ヶ月が要された。地質は古第三紀前期の花崗岩からなる。両トンネルで使用されたTBMの諸元を表-1に示す。

次に、両トンネルで生じたカッタの摩耗量であるが、これまでにTBM施工において生じるカッタ摩耗量は、単位掘削体積当りのカッタ費用⁹⁾や、単位掘削長当りの摩耗量¹³⁾により評価されてきた。これらはカッタヘッドに取り付けられた全ディスクカッタの消費コストおよび摩耗量の総和に基づく値で、それらすべてが岩盤の掘削、

すなわち一次破碎に費やされるものとして考えられてきた。これに対し、筆者らは、TBM施工におけるカッタの摩耗を論じる上で、二次破碎に起因する摩耗を考慮する必要があり、室内摩耗試験に基づく岩石の摩耗硬度や摩耗能は、一次破碎に起因する摩耗との間で相関性を示すものとする。このような観点から、本研究では、次式により単位掘削体積当りのディスクカッタの一次破碎摩耗量を定義する。

$$a_p = \sum_{i=m}^n a_i \cdot \frac{1}{L \cdot A} \quad (1)$$

ここで、 a_p ：単位掘削体積当りのディスクカッタの一次破碎摩耗量 (mm^3/m^3)、 a_i ： i 番目のディスクカッタの摩耗量 (mm)、 m, n ：対象とするディスクカッタ番号、 L ：前回の交換からの掘進距離 (m)、 A ： m から n 番カッタによる掘削断面積 (m^2)である。以下、単位掘削体積当りのディスクカッタの一次破碎摩耗量を一次破碎摩耗量と称する。対象とするディスクカッタ番号として、本研究では、Aトンネルで用いられたTBMの9から18番カッタ、Bトンネルで用いられたTBMの9から21番カッタ

表-1 AおよびBトンネルで用いられたTBMの諸元

項目	Aトンネル	Bトンネル
機種	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
最大推力(kN)	8,036	9,800
カッタヘッドトルク(kN・m)	1,372 - 1,470	1,274 - 2,430
総出力(kW)	1,110	1,420
推進ストローク(mm)	1,500	1,500
カッタ回転速度(rpm)	1.25 - 10.0	0.8 - 10.0
カッタ数	32	35
カッタ材質	SNCM	SNCM, ダイス, HD
カッタ径(mm)	432	432

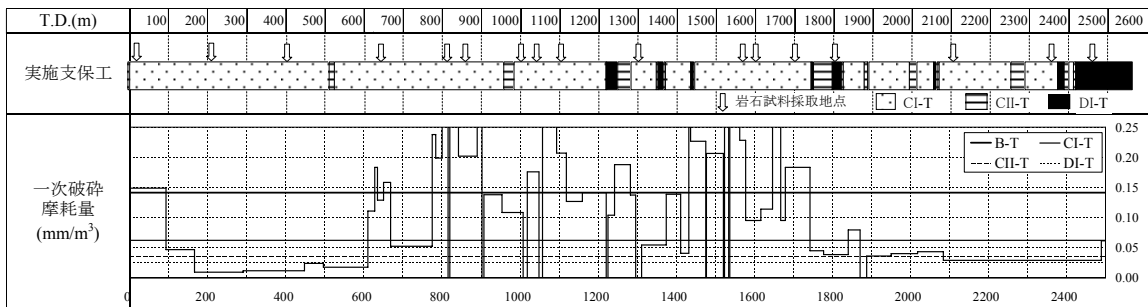


図-1 Aトンネルにおける実施支保工と一次破碎摩耗量

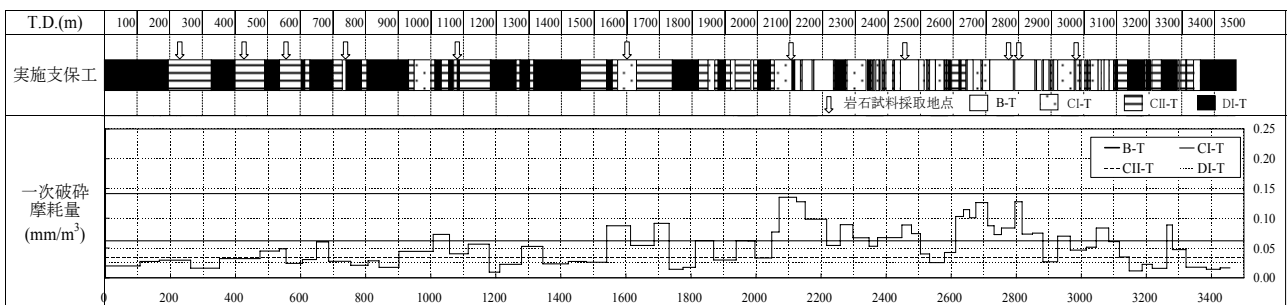


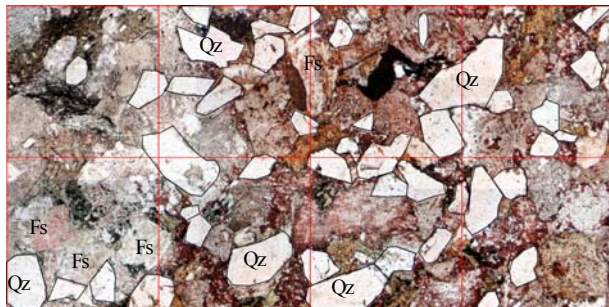
図-2 Bトンネルにおける実施支保工と一次破碎摩耗量

タの摩耗量に着目した。これらのディスクカッタは、スクレーパによるずりの取り込み範囲よりも内側に位置することから、二次破碎に伴うディスクカッタの摩耗が生じにくく、生じる摩耗はおよそすべて一次破碎に起因するものと考えられる。また、カッタヘッドの中心部に位置し、回転半径が小さいセンターカッタ（カッタ番号1～8）には、大きなねじりモーメントが作用し¹⁴、偏摩耗や割れ等の突発的で激しい摩耗が生じやすいことから、本研究では対象としなかった。そして、これらのカッタによる掘削断面積Aは、Aトンネルで7.02m²、Bトンネルで9.87m²であった。

以上より、AおよびBトンネルの実施支保工と一次破碎摩耗量を図-1および図-2に示す。同図には、岩石試料を採取した地点および日本道路公団の積算資料¹⁵に基づくディスクカッタ積算摩耗量を併記した。なお、岩石試料を採取した地点において、実施支保区分が主としてB-TまたはCI-T級であることと、既往の研究¹⁶より、TEIに基づく二次破碎率が0～30%と比較的低い範囲内にあることから、それらの地点では隣接破碎による適切な掘削が行われていたと考えられる。

3. 偏光顕微鏡観察に基づく岩石の微細構造

両トンネルの坑内より採取した岩石コアならびに掘削



ずりより、薄片を作成し、その鉱物組成を偏光顕微鏡により観察した。図-3および図-4に、観察に用いた薄片写真を例示する。ただし、図中において、石英粒子を黒線で囲んだ。Aトンネルの岩石の鉱物組成は、石英、斜長石、カリ長石、少量の黒雲母から成り、火山岩類、泥岩、花崗岩類、少量の変成岩類およびチャート等の岩片を含んでいる。鉱物片や岩片の間隙を充填する基質部は、膠結作用を受けよく固結していることが認められた。一方、Bトンネルの岩石のそれは、石英、カリ長石、斜長石および少量の有色鉱物として黒雲母、角閃石から成る。

各鉱物の含有率の測定は、通常、ポイントカウンター式⁹)によって行われる。これに対し、本研究では、粒子径を考慮した鉱物の含有率を算出するために、デジタルカメラにより撮影した薄片画像を用いて、パソコン上（空間情報システムSIS ver. 6.0を使用）で、各鉱物の粒子径および面積を測定した。ただし、粒子径は鉱物粒子の等価な面積を有する円の直径とした。薄片の計測対象範囲は、Aトンネルの薄片で横4mm×縦2mmの8mm²、Bトンネルの薄片では、Aトンネルの砂岩の石英粒子径がおおよそ0.2mm程度であるのに対し、Bトンネルのそれが約2mmと10倍程度あることから、横25mm×縦15mm×薄片2枚の750mm²とした。

AおよびBトンネルの岩石試料における各鉱物の粒子径の分布について、それらの特徴を代表するものを図-5(a)～(d)に示す。図-5(a)は、Aトンネルにおいて細粒

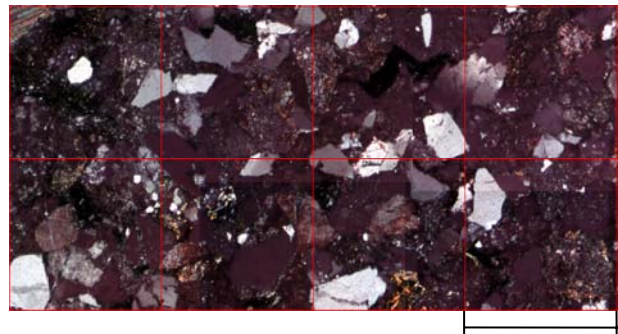


図-3 AトンネルのTD.1,600mにおける岩石の微細構造（左：単ニコル，右：直交ニコル，Qz：石英，Fs：長石）

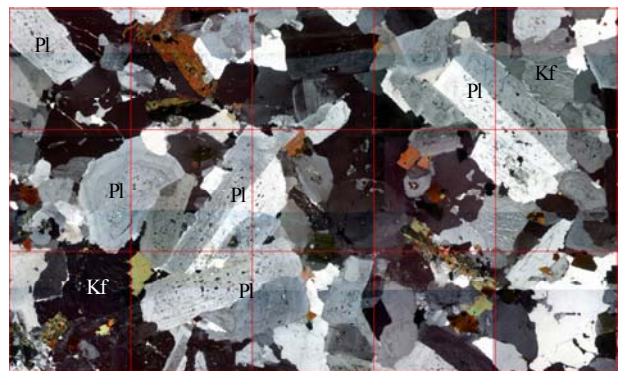
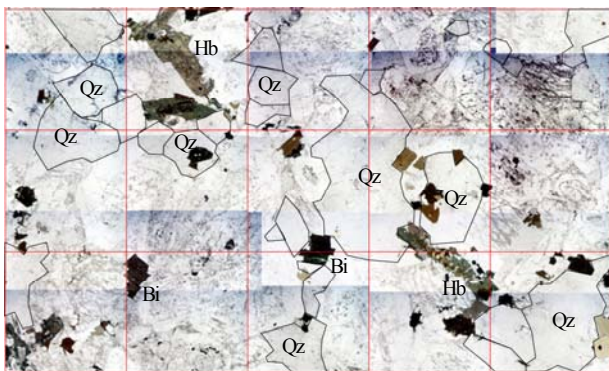


図-4 BトンネルのTD.2,800mにおける岩石の微細構造（左：単ニコル，右：直交ニコル，Qz：石英，Kf：カリ長石，Pl：斜長石，Bi：黒雲母，Hb：角閃石）

砂岩～泥岩の試料における鉱物粒子径の分布を示している。観察される石英および長石の粒子径は極めて小さく、その68%が0.04～0.08mmの範囲に分布した。図-5(b)は、Aトンネルの砂岩における鉱物粒子径の代表的な分布を示している。石英および長石の粒子径は、0.1～0.3mmの範囲にその63%が分布する。砂岩における石英粒子径の最大値は概ね0.6～0.7mmであった。一方、Bトンネルの岩石試料では、図-5(c)に示されるように、石英、カリ長石および斜長石の粒子径は、1.0～3.0mmの範囲にその73%が分布した。図-5(d)に示される分布状況からは、石英、カリ長石、斜長石の粒子径が、図-5(c)に比較して全体的に大きいことが分かる。平均石英粒子径は図-5(c)で1.88mmであるのに対し、このとき2.57mmであり、石英粒子径の最大値は9.2mmであった。Bトンネルの岩石試料では、黒雲母もよく観察されたが、その粒子径は最大でも1.5mm程度であった。

次に、各鉱物の含有率であるが、Aトンネルの岩石試料については石英、長石を、Bトンネルの岩石試料については、石英、斜長石、カリ長石、黒雲母、角閃石の面積を測定し、計測対象領域の面積で除すことで算出した。さらに、本研究では、石英以外にも長石等の比較的硬度の高い鉱物が摩耗に及ぼす影響を考慮し、次式により定義される等価石英含有率^{10,11)}を求めた。

$$EQC = \sum_{i=1}^n S_i \cdot R_i \quad (2)$$

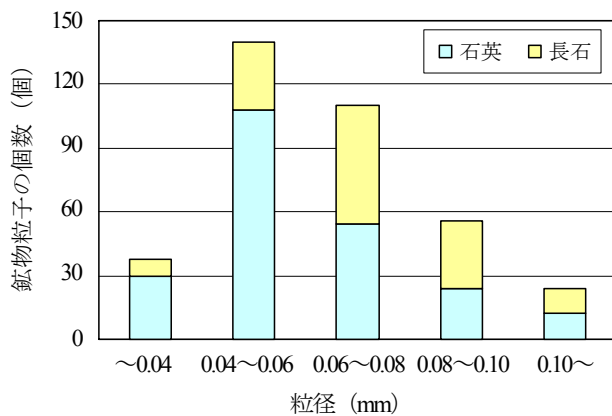
ここで、 EQC ：等価石英含有率（%）， S_i ：各鉱物の含有率（%）， R_i ：各鉱物のロシワル相対硬度， n ：鉱物数である。ロシワル相対硬度とは、石英の硬度を1.0としたときの他の鉱物の硬度の相対値である。本研究ではEwendt¹¹⁾が用いた値に準じ、各鉱物のロシワル相対硬度を、石英は1.0、長石類は0.3、黒雲母は0.03、角閃石は0.3、その他の基質部は0とした。

4. 修正摩耗能指数と一次破碎摩耗量の関係

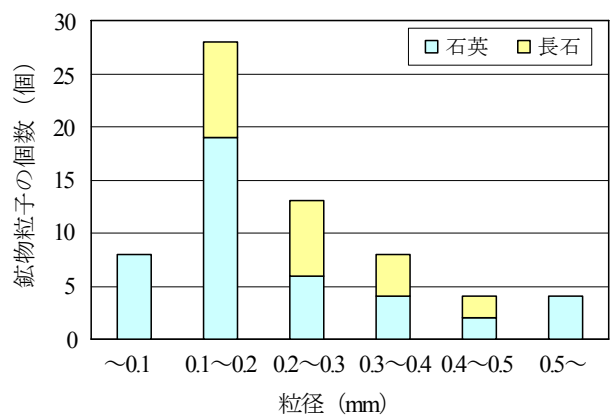
Shimazek & Natz¹⁰⁾は、石英の粒子径が異なる砂岩を用い、室内での摩耗能測定試験を行った。その結果、鋼製ピンの摩耗量と、次式により表される摩耗能指数 F 値との間に有意な相関関係があることを示した。

$$F = \frac{1}{100} \times EQC \times dQ_z \times S_t \quad (3)$$

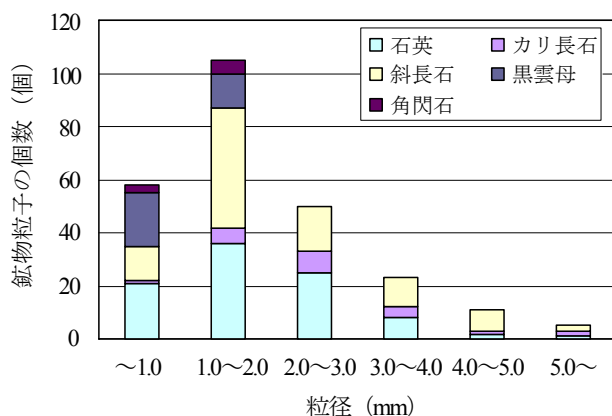
ここで、 F ：摩耗能指数（N/mm）， EQC ：等価石英含有率（%）， dQ_z ：平均石英粒子径（mm）， S_t ：圧裂による岩石の引張り強さ（MPa）である。同式においては、前の2項の積により岩石の鉱物組成に基づく硬度特性を、



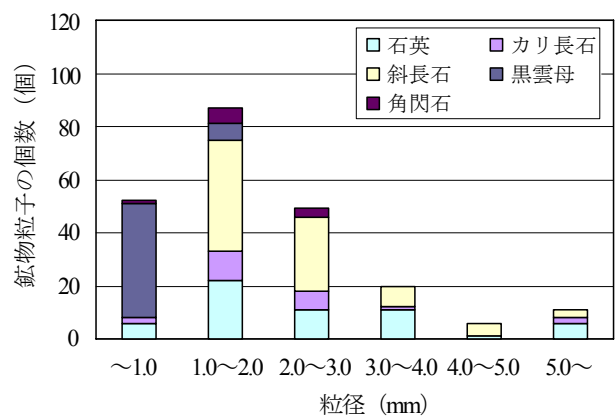
(a) T.D.640m (細粒砂岩～泥岩, Aトンネル)



(b) T.D.1,040m (砂岩, Aトンネル)



(c) T.D.1,600m (花崗岩, Bトンネル)



(d) T.D.2,800m (花崗岩, Bトンネル)

図-5 AおよびBトンネルの岩石の含有鉱物の粒子径の頻度分布

圧裂による岩石の引張り強さ S_t により主として基質部の固結度や鉱物粒子間の結合度に基づく強度特性を反映させており、それらの積として岩石の摩耗能を表していると考えられる。

さらに、Ewendt¹¹⁾は、火成岩および堆積岩の計6種の岩石供試体を用いて、シングルカッタによる直線切削試験を行い、カッタの摩耗量を測定した。それら試験結果に対して摩耗能指数 F の適用性を検討した結果、火成岩における完晶質の岩と微晶質の岩および堆積岩との間で鉱物の粒子径の差異が F 値に大きく影響を及ぼすこと、硬度の高い鉱物でも粒子径が1mm以下である場合、粒子径が摩耗に及ぼす影響は小さいこと、圧裂による岩石の引張り強さ S_t が点載荷強さ I_{50} により代替できることを指摘し、次式による修正摩耗能指数 F_{mod} 値を提案した。

$$F_{mod} = \frac{1}{100} \times EQC \times \sqrt{dQ_{Z(\phi > 1mm)}} \times I_{50} \quad (4)$$

ここで、 F_{mod} : 修正摩耗能指数 ($N/mm^{1.5}$)、 $dQ_{Z(\phi > 1mm)}$: 1mm以上の平均石英粒子径 (mm)、 I_{50} : 点載荷強さ

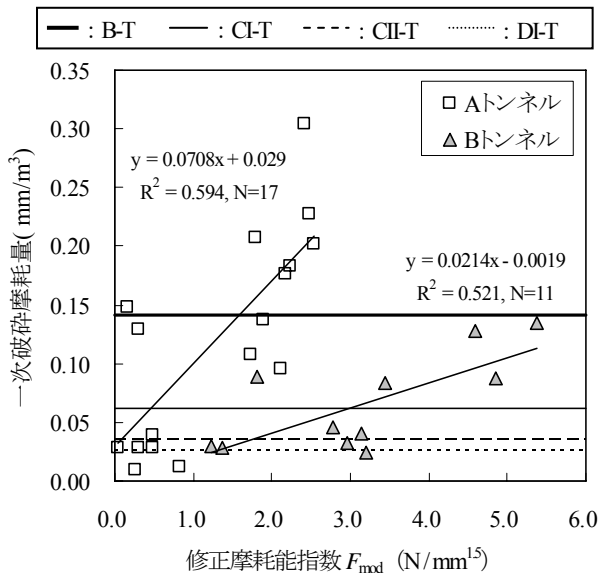


図-6 修正摩耗能指数と一次破砕摩耗量の関係

(MPa) である。平均石英粒子径については1mm以上の場合その値を代入し、1mm以下の場合には1を代入する。

これらの知見に基づいて、二つの対象トンネルにおける偏光顕微鏡観察の結果およびISRM指針¹⁷⁾に準ずる掘削ずりの点載荷強さ I_{50} から算出した修正摩耗能指数 F_{mod} と一次破砕摩耗量 a_p との関係を図-6に示す。同図より、両トンネルにおいて、修正摩耗能指数 F_{mod} と一次破砕摩耗量 a_p との間に、有意な相関関係が認められた。一方で、両者の回帰直線の傾きは大きく異なり、それぞれの岩種で同一の F_{mod} 値に対する一次破砕摩耗量 a_p は、花崗岩よりも堆積岩の方が大きいことが示された。

このような堆積岩と花崗岩の差異について、さらに修正摩耗能指数 F_{mod} を上述した硬度の高い鉱物の含有量と点載荷強さ I_{50} とに分割して、その両者および一次破砕摩耗量 a_p の三者の関係を図-7に示した。同図より、Aトンネルにおいては、高い硬度を示す鉱物の含有量と点載荷強さ I_{50} の間に正の相関が認められ、両値の増加に伴って一次破砕摩耗量 a_p が増大している。この理由として、堆積岩においては、点載荷試験において生じる引張りき裂の進展が、硬度の高い鉱物によって阻害されるためと推察され、硬度の高い鉱物の含有量と点載荷強さ I_{50} とは相関関係にあり、両者が一次破砕摩耗量 a_p に影響を及ぼすことが認められる。一方、Bトンネルにおいては、TD225mを除くと、硬度値の高い鉱物の含有量はいずれも $0.7mm^{0.5}$ 前後で概ね等しいのに対し、点載荷強さ I_{50} は2.0から7.5MPaの範囲で変動しており、鉱物の含有量と点載荷強さ I_{50} は概ね独立した関係にある。そして、一次破砕摩耗量 a_p は点載荷強さ I_{50} 、すなわち鉱物粒子間の結合度に強く依存したものと考えられる。

5. 結言

本研究では、堆積岩および花崗岩地山におけるTBM

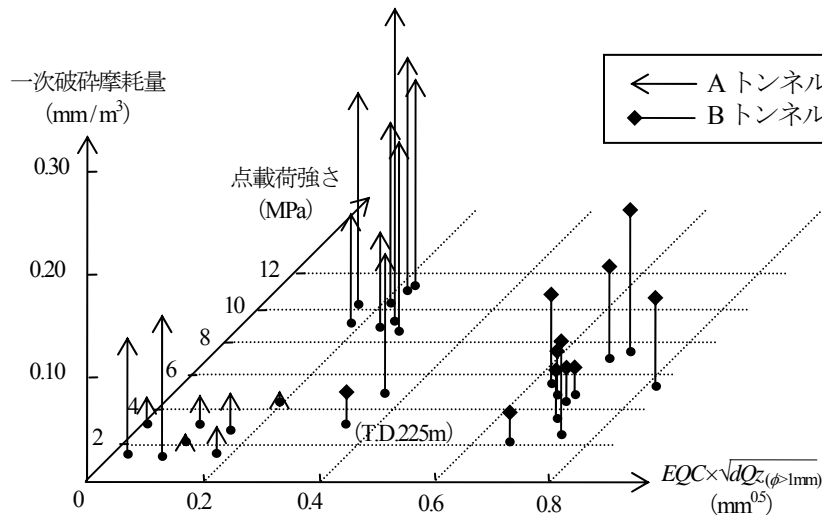


図-7 硬度の高い鉱物の含有量、点載荷強さおよび一次破砕摩耗量の関係

の施工事例に対し、ディスクカッタの摩耗と岩石の鉱物組成の関係について考察した。カッタの摩耗に関しては、TBM施工に伴う二次破碎現象を踏まえ、一次破碎に起因する摩耗量に着目した。一方、岩石の鉱物組成については、既往の研究に基づいて、鉱物の含有率、その平均粒子径、点載荷強さ I_{50} の積で表される修正摩耗能指数 F_{mod} に着目した。得られた知見を以下に示す。

- (1) TBM施工に伴うディスクカッタの摩耗を一次破碎摩耗と二次破碎摩耗に分けて考え、このうち一次破碎摩耗は、岩石を用いた室内試験結果から求まる修正摩耗能指数と有意な相関性があることが示された。
- (2) 堆積岩の事例においては、石英や長石など硬度の高い鉱物の含有量と点載荷強さ I_{50} の間に正の相関があり、両値の増大に伴って一次破碎摩耗量 a_p が大きくなる。この理由として、堆積岩では、引張りき裂の進展が、硬度の高い鉱物によって抑制されるためと推察される。
- (3) 一方、花崗岩の事例においては、高い硬度を示す鉱物の含有量と点載荷強さ I_{50} に明確な相関関係は認められず、一次破碎摩耗量 a_p と点載荷強さ I_{50} の間で有意な相関関係が得られた。

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と旭地研の岩田修一氏に深く感謝する。

参考文献

- 1) 三沢清扶, 桜井孝, 高橋昭教 : RTMに関する岩石・岩ばん調査法, 鉄道技術研究資料, Vol.29, pp.17-21, 1972.
- 2) 土木学会岩盤力学委員会編 : わが国におけるトンネル掘進機の実績と展望, pp.191-192, 1976.
- 3) 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的研究, 資源と素材, Vol.113, pp.325-332, 1997.
- 4) Bruland, A. : *Project report 13A-98 Hard rock tunnel boring Drillability Test methods*, pp.1-22, 1998.
- 5) West, G. : Technical Note, Rock Abrasiveness Testing for

- Tunnelling, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.26, No.2, pp.151-160, 1989.
- 6) Tarkoy, P.J. : A study of rock properties and tunnel boring machine advance rates in two mica schist formations, *Applications of Rock Mechanics (ed. By E.R.Hoskins), Proceedings, Fifteenth Symposium on Rock Mechanics, American Society of Civil Engineers*, pp.415-447, 1975.
 - 7) 丹生屋純夫, 鈴木健一郎, 丸山誠, 藤原紀夫, 平間邦興 : TBMの掘削性と岩盤特性との相関性, 第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.66-70, 1996.
 - 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) 井上勤監修 : 鉱物の顕微鏡観察, pp.91-96, 地人書館, 1983.
 - 10) Schimazek & Natz : Der Einfluß des Gesteinaufbaus auf die Schnittgeschwindigkeit und den Meißelverschleiß von Streckenvortriebsmaschinen, *Glückauf*, Vol.106, No.6, pp.274-278, 1970.
 - 11) Ewendt, G. : Erfassung der Gesteinsabrasivität und Prognose des Werkzeugverschleißes beim maschinellen Tunnelvortrieb mit Diskenmeißeln, *Bochumer geologische und geotechnische Arbeiten*, Vol.33, 88 p, 1989.
 - 12) 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, Vol.16, pp.215-220, 2006.
 - 13) 福井勝則, 大久保誠介, 森山守, 青木智幸, 小塚孝, 松原誠 : 飛騨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, 第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.129-134, 2007.
 - 14) 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, 土木学会論文集, No.554 / III-37, pp.211-220, 1996.
 - 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, 2003.
 - 16) 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.
 - 17) ISRM Commission on Testing Methods, Working Group on Revision of the Point Load Test Method : Suggested method for determining point load strength, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.22, No.2, pp.51-60, 1985.

DISC CUTTER WEAR AND ROCK TEXTURE IN HARD ROCK TBM TUNNELING

Yu KOIZUMI, Kimikazu TSUSAKA, Chikaosa TANIMOTO,
Shigeo NAKAGAWA and Naoya FUJITA

Disc cutter wear in TBM tunneling is caused by initial fragmentation of a solid rock face (the primary fragmentation) and fragmentation of residual rock pieces between a cutterhead and the face (the secondary fragmentation). In two projects through sedimentary and granitic rocks, the authors investigated the relationships between the rate of cutter wear caused by the primary fragmentation, point load index and the grain size and contents of abrasive minerals. As a result, it was found that the tensile strength and the mineral contents of rocks significantly influenced the cutter wear in both projects and thus it is necessary to take into account of rock type.