

シールド掘進機におけるディスクカッタ摩耗量の 推定方法に関する研究

秩父顕美¹・吉野広司²・佐藤一彦³

¹正会員 工修 株式会社フジタ 技術研究所 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

²正会員 工修 株式会社フジタ 技術研究所 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

³工博 室蘭工業大学 情報工学科 (〒050-0071 室蘭市水元町27番1号)

シールド掘進機に装備されたディスクカッタの摩耗量を定量的に把握するために、掘削中に計測される機械量データを利用して推定する経験式を提案し、4件のシールド工事における計測データを用いて検証した。この方法はカッタヘッドの回転により掘削地盤に対して行った回転掘削仕事量がディスクカッタの摩耗に密接な関係があることに着目し、機械量データの一つであるカッタトルクから導いた掘削係数 K_r を変数として摩耗量を推定するものである。検証の結果、摩耗率はシールド工事の掘削条件とは独立に K_r の2乗と比例関係にあり、比例係数は逆に地盤の強度特性を除いた掘削条件の影響を受けて変化することが判明した。この関係式から掘削中の摩耗量は K_r^2 の積算値に比例係数を乗じて算定することが可能である。

Key Words: shield tunnel, tunnel boring machine, wear of cutting tool

1. まえがき

下水道施設を中心とした社会資本の整備が都市の中心部から周辺へ、さらに大都市から河川の流域沿いに発達している地方都市へと普及するに伴い、軟弱で均質な地盤におけるシールド工事よりも転石や岩盤を含む複雑な地盤での工事が増加する傾向にある。このような要求に対応するため、従来から岩盤用のトンネル掘進機（以下TBMと称す）で用いられてきたディスクカッタの技術を適用し、巨礫や岩盤を破碎しながら掘削するシールド掘進機が開発されこれまで多くの工事において使用されてきた。そして、シールド工事の最近の動向である長距離、大口径、高速施工に対応するために耐摩耗性と耐久損性を兼ね備えたカッタなどの技術改良を重ねた結果、現在では軟弱層から巨礫層まで複雑多岐に亘る地盤において掘進距離2000mを越える長距離のシールドトンネルがカッタ交換なしで掘削された例も報告されるようになってきている¹⁾。

このような機械面での目覚ましい進歩に対して、工事を安全かつ経済的に施工するための運転管理手法の開発も各方面で積極的に進められている。例えば、切羽地質の探査方法^{2), 3), 4)}、ディスクカッタの摩耗検知システムを装備した複合地盤対応の自動運転システム⁵⁾などがある。しかし、これら

の地盤におけるシールド工事では急激な地盤の変化や巨大転石等の障害物の出現などが頻繁に発生するため、軟弱で均質な地盤での工事に比べより高度な施工管理が要求されている。

ディスクカッタの摩耗管理も工事の施工管理を難しくする要因の一つである。特にシールド工事では地下水が豊富でしかも切羽が自立していない場合が多く、バルクヘッドを開放するのに薬液注入などの補助工法が必要となるため、掘削中の摩耗状況をリアルタイムに把握してカッタ交換を実施する地点を適切に予測することが重要な課題となっている。このため、標準型のディスクカッタについては多くの場合、TBM工法で用いられてきたカッタ摩耗の推定方法をシールド機用に修正して工事の計画や管理が行われている。しかし、現状では地盤の変化を定量的に把握することが困難なためその変化が著しいほど推定誤差が大きくなり、適切なディスクカッタの摩耗管理は難しい課題の一つとなっている。

このような背景から、筆者らはシールド掘進機が対象地盤に対して行った仕事量がカッタの摩耗に密接な関連があることに着目し、機械量データから摩耗量を定量的に推定することを目的とした一連の研究を行ってきた^{6), 7), 8)}。本論文ではこれらの研究成果を取りまとめ、ディスクカッタの摩耗量推定式を提案し、実際の工事における計測データにもとづいて

検証した結果について述べる。また、シールド工事におけるカッタの摩耗管理への適用方法についても事例検討にもとづいて説明する。

2. 従来のカッタ摩耗の推定方法

(1) TBMにおける推定方法

堅固な岩盤を連続して掘削するTBM工法では、ディスクカッタの摩耗によって掘削能力が低下するとともにその修理・交換に要するコストが工事費の中で大きな割合を占めるため、各工事におけるカッタの摩耗特性を正確に把握することが重要な課題となっている。これに関して、各国のTBMメーカーや研究機関などからディスクカッタが摩耗限界に達するまでに掘削可能な距離（以下カッタライフと称す）を予測する種々の方法が提案されているが、我国では米国のコロラド大学とロビンス社の共同開発による推定方法が多くで利用されている⁹⁾。この方法はある数学モデルを導き、その係数をベンチテストや原位位置計測の結果にもとづいて定量化したもので次式で示される。

$$L = \frac{1000 \times \lambda \times P_c}{60 \times 2\pi \times r} \quad (1)$$

- L: カッタライフ (m)
- λ : カッタの平均転送距離ライフ (Km)
- r: カッタヘッドの中心からカッタまでの平均距離 (m)
- v: 掘進速度 (m/h)
- ω : カッタヘッド回転数 (r.p.m)
- P_c : カッタ貫入量 (= v/ω , m/rev)

ここで、カッタの平均転送距離ライフはディスクカッタがカッタヘッド中心からいずれも平均距離rに配置されているとしたとき、それらが摩耗限界に達するまでに半径rの円周軌道に沿って転送された距離を意味している。これまでの施工実績から、平均転送距離ライフ λ と掘進速度vはTBMの諸元であるディスクカッタの径や刃先幅、岩石の圧縮強度と鉱物中の石英分の含有量などの関数として与えられているので、各工事の掘削条件を用いてカッタライフを算定することができる。

(2) シールド工事におけるカッタの摩耗管理

シールド工事では堅固な岩盤だけでなく巨礫や砂

表-1 シールド掘進機のカッタライフ推定式

	A 社	B 社
推定式	$L = \frac{10 \times \lambda \times P_c}{2\pi \times r}$	$L = \frac{m' \times \lambda \times P_c}{2\pi \times r}$
備考	$P_c = v/\omega$	$m' = 1/0.9^{(m-1)}$ mはパス数

礫などの掘削にもディスクカッタが使用される。このため、その破碎メカニズムはTBMで言われているような表面せん断破碎だけでなく地盤の特性により種々の破碎パターンがあり、カッタライフの推定はより複雑なものとなっている。これに対して各メーカーからは式(1)をシールド工事での実績値にもとづいて修正した方法が提案され、同時に地盤の地質条件に対する平均転送距離ライフ λ やカッタ貫入量 P_c の推奨値が目安として示されている。表-1にはシールド掘進機で用いられているカッタライフ推定式の例を示しているが、基本的な考え方は式(1)と類似していることがわかる^{10),11)}。なお、表-1でのパス数とはカッタヘッドの中心から同一距離に配置されたディスクカッタの数である。

実際の工事ではカッタ交換時を起点とした累積回転数からディスクカッタの転送距離を求め、上記で算定したカッタライフの推定値と比較することによって摩耗管理が行われている。この方法では掘削途中で地盤の性状が変化した場合、平均転送距離ライフやカッタ貫入量を修正して再計算する必要があるが、実際には複雑に変化する地盤特性を的確に数量化し正確にカッタライフを予測することは困難な場合が多い。また、提示されている平均転送距離ライフは標準型のディスクカッタによる実績値から求めている場合が多いので、その仕様が異なると大きな差を生じることがある。例えば、耐摩耗性が標準型の1.5倍と提示されているディスクカッタを用いた工事において、平均転送距離ライフが約4倍となった例も報告されている¹²⁾。このような理由から、適切なカッタ交換地点の予測は累積回転数による転送距離を参考にし、熟練技術者が経験にもとづいて行なっているのが現状である。

3. 機械量データによる摩耗量の推定方法

(1) 機械量データの解析方法

シールド工事では掘進機を運転管理するために各

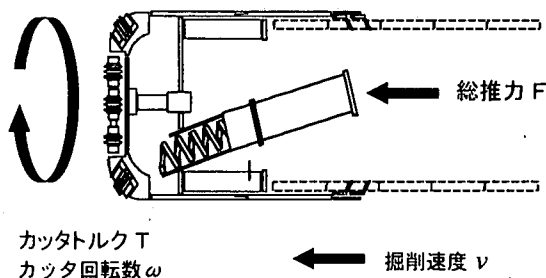


図-1 シールド掘進機における機械量データ

種の機械量を計測しているが、このうち機械の掘削性能を評価するうえで基本となるのは図-1に示すような総推力 F 、カッタトルク T 、掘進速度 v およびカッタヘッドの回転数 ω である。通常はカッタヘッドを一定の速度で回転し、カッタトルクが許容値を越えない範囲内で掘進速度を調整して運転操作を行っている。従って、回転数と掘進速度は人為的に操作可能な因子であるが、カッタトルクと総推力は掘削地盤の特性に従属して発生する機械量である。

共著者である佐藤らは岩石による切削実験や原位位置計測の結果から、TBMによる硬岩掘削において総推力 F およびカッタトルク T とカッタヘッド1回転あたりのカッタ貫入量 P_c の間に次のような関係が成り立つことを報告している^{(13),(14)}。

$$F = K_F \cdot P_c^\alpha \quad (2)$$

$$T = K_T \cdot P_c^\beta \quad (3)$$

ここで、指数 α と β は岩石の種類やカッタの幾何学的形状とは独立に $\alpha = 0.5 \sim 0.64$ 、 $\beta = 1.0 \sim 1.21$ の値を持ち、係数 K_F と K_T は岩石の力学的性質やカッタの幾何学的特性を反映する値であることなどが見出されている。これらの関係式はTBM工法で使用されるディスクカッタを対象にして経験的に求められたものであるが、土砂や巨礫を含む地盤を掘削するシールド掘進機にも適用できるとし、さらに指数 α 及び β は他の関連研究^{(15),(16)}をも考慮に入れてそれぞれ 0.5 及び 1.0 と仮定すると、式(4)、(5)で示す2種類の係数 K_F 、 K_T を定義することができる。本研究ではこれらの係数を掘削係数と呼ぶことにする。

掘削係数 K_F 、 K_T は前述のように掘削地盤の力学的性質とカッタヘッド上に配列されたディスクカッタの幾何学的条件の双方に依存する。従って、ディ

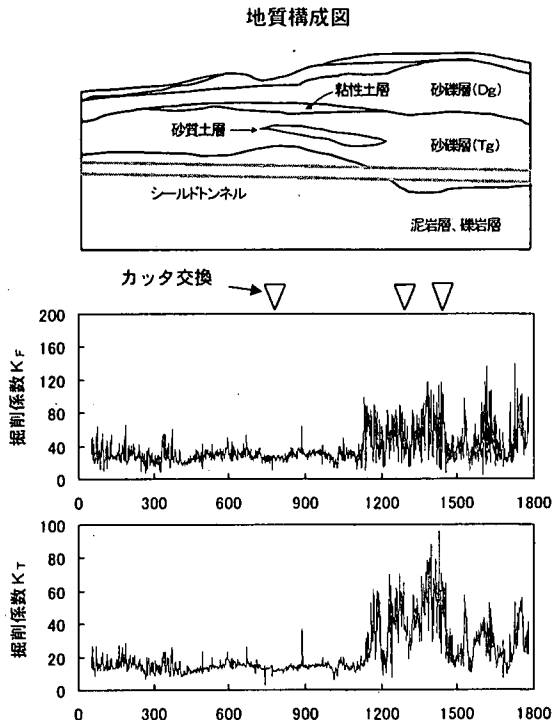


図-2 地質構成図と掘削係数の計測例 (事例-1)

$$K_F = \frac{F}{P_c^{1/2}} = \frac{F}{(v/\omega)^{1/2}} \quad (4)$$

$$K_T = \frac{T}{P_c} = \frac{T}{v/\omega} \quad (5)$$

スクカッタの摩耗が一定とみなし得る短い区間で掘削係数に変化が生じた場合、それは地盤の特性が変化したことを表している。逆に、対象地盤が同一地層区分に属しているにもかかわらず掘削係数が変化する場合はディスクカッタの著しい損傷による欠落などにより、その幾何学的な条件に大きな変化が生じていると考えられる。

(2) 掘削係数 K_F 、 K_T の変化特性

上式で定義した掘削係数の変化特性を調べるために、実際のシールド工事における計測例を図-2に示す。この例は後述の事例-1における各掘削リングの平均掘削係数の変化を示したものである。事前に調査された地質構成図と対比すると、前半の泥岩層において K_F と K_T はともに小さくほぼ一定の値を示しているが、砂礫層に入ると両掘削係数とも急激

に大きくなり砂礫層内を掘削中は大きく変動している。ボーリング調査結果ではN値はともに60以上で貫入不能となっているが、サンプリング試料の観察結果によると前半は凝灰質で強風化したシルト状の泥岩層であり、後半は径2~10mmの礫を主体として径30~300mmの玉石を含む玉石混り砂礫層である。この調査結果から、定性的ではあるが砂礫層は泥岩層と比較してかなり硬い地盤であると言える。掘削係数はこのような地盤の強度特性を反映して大きく変化し、強度の高い砂礫層において大きな値を示している。

次にディスクカッタの摩耗や損傷に伴う切削能力の低下が掘削係数に与える影響を調べるために、砂礫層において実施した2回目と3回目のカッタ交換地点前後における掘削係数の変化を示すと図-3のようになる。2回目の地点では交換直後に掘削係数は低下し10リング程度は小さくなる傾向を示すが、その後再び増加している。この交換地点では平均で11.3mmの摩耗量が測定されているが、交換直後の短区間に同程度の摩耗が進行するとは考え難いので、このような変化は地盤特性によるものと考えられる。一方、3回目では交換前に掘削係数が大きく変動するが、交換後は変動幅とその値がともに小さくなっている。この交換地点では平均で15.2mmと限界値近くまで摩耗が進行しているにもかかわらず、掘削係数は交換後に急激ではなく徐々に低下し、交換以前にも交換後より小さい値を示している。従ってこの地点においてもディスクカッタの切削能力の変化による影響は小さく、点在する玉石の有無や大きさに依存して掘削係数が変化していると考えられる。また、図-2に示した1回目の交換地点でも平均で約8.4mmの摩耗が生じているが、その前後で掘削係数は大きな変化を示していない。

以上のような結果から掘削係数は主に地盤の力学的な性質の影響を受けて変化し、ディスクカッタの欠損などによりその切削機能が著しく損なわれない限り、ディスクカッタの許容限界内の摩耗による切削能力の低下の影響は小さいと言える。

(3) ディスクカッタ摩耗量の推定式

掘削係数 K_T の物理的な意味を考えてみると、定義式(5)よりこの値は単位掘削長だけ掘削する間にシールド掘進機が地盤に対して加えたトルクを表している。ところで、カッタトルク T は地山の掘削抵抗に対抗してカッタヘッドを1回転させるのに要する仕事 W と $W = 2\pi r T$ の関係にある(付録の式(13), (14)参照)。したがって K_T は単位掘削長だけ掘削する際、シールド機が地盤に対して行った回

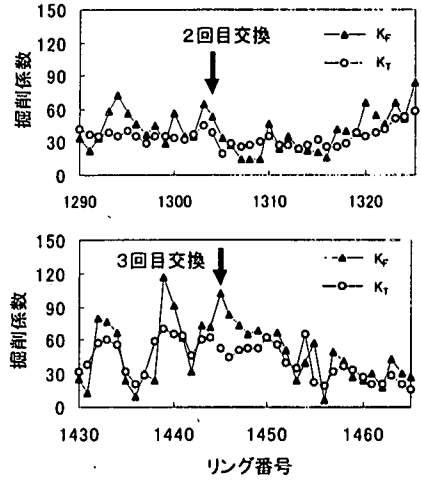


図-3 カッタの摩耗が掘削係数に与える影響

転掘削仕事に関連している。ディスクカッタの摩耗は円周軌道上を転送される時、その周縁部のすべり速度によって生じる摩擦仕事に起因するので^{17), 18)}、この摩擦仕事と等価な回転掘削仕事はディスクカッタの摩耗と密接な関係があると考えられる。そこで、単位掘削長あたりの摩耗量(以下摩耗率と称す)が回転掘削仕事を表す K_T のべき乗に比例するものと仮定すると、摩耗率 dw/dx は掘削係数 K_T を変数として次のように表すことができる。

$$\frac{dw}{dx} = C \cdot K_T^n \quad (6)$$

ここで、 x は掘削方向に沿ってとった距離変数であり、 w はディスクカッタの摩耗量を表している。上式において指数 n はシールド掘進機の仕様や掘削地盤の特性などの掘削条件とは独立した値を持ち $n \geq 1$ と期待される。一方、比例係数 C はこれとは逆に掘削条件の影響を受けて変化すると予想されるが、いずれにしても実際のシールド工事で得られた計測データにもとづいて決定する必要がある。摩耗率の関係式が成立すれば、掘削距離 L の区間における累積摩耗量 w は次式により求めることができる。

$$w = C \cdot \int_0^L K_T^n dx \quad (7)$$

4. 工事実績にもとづく検証結果

(1) 工事概要

提案する摩耗量推定式の検証は、表-2に示す4

表-2 検証に用いた各事例の工事概要

	事例-1	事例-2	事例-3	事例-4
施工延長	1340m	984m	690m	2095m
掘削地盤	前半泥岩層 後半砂礫層	頁岩主体の 基盤岩	巨礫混り 段丘礫層	強風化 花崗岩
礫径	2~300mm		100~1000mm	
強度特性		18~20MPa		DH級
掘進機の仕様	径2140mm 泥土圧式	径2140mm 泥土圧式	径2140mm 泥土圧式	径3950mm 泥水式
カッタの仕様	直径	305mm	305mm	305mm
	個数	22個	22個	18個
カッタの仕様	材質	標準型	標準型と 後半硬質	標準型と 強化型混成
	交換回数	3回	5回	3回
				6回

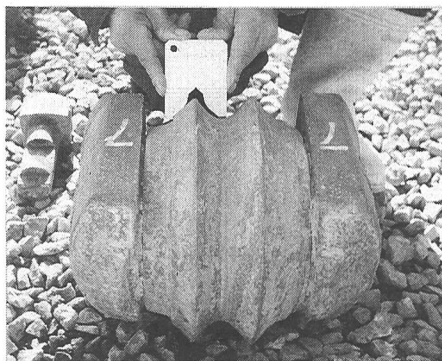


写真-1 摩耗量の測定状況

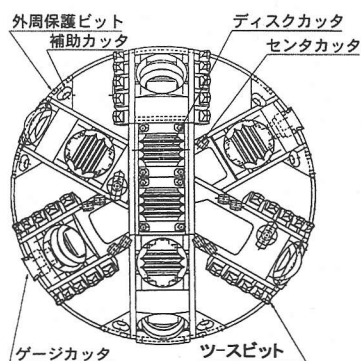


図-4 カッタの配置状況 (事例-1)

事例で計測された機械量と摩耗量のデータを用いて行った。各工事ではいずれも礫や岩盤を含んだ地盤を掘削するために外周部が球面状になっているドーム型のカッタヘッドにディスクカッタを装備したシールド掘進機が使用され、掘削中には3~6回のカッタの交換が行われている。図-4は事例-1で使用された掘進機のカッタ配置状況を示したものである。事例-2と事例-3でもこれと類似した掘進機が使用されているが、事例-4では掘削外径が2倍近くあるためカッタの配列や個数などが著しく異なっている。

一方、ディスクカッタの材質については各地盤の摩耗特性に適した対応がとられている。例えば、事例-2では当初事例-1と同様に標準的な材質のディスクカッタが用いられていたが、最後の区間において耐摩耗性に優れたカッタに変更されている。また、事例-3では18個のうち中心部に配置された6個に強化型のディスクカッタを用い、当初から異なる材質のものが混在する構成となっている。

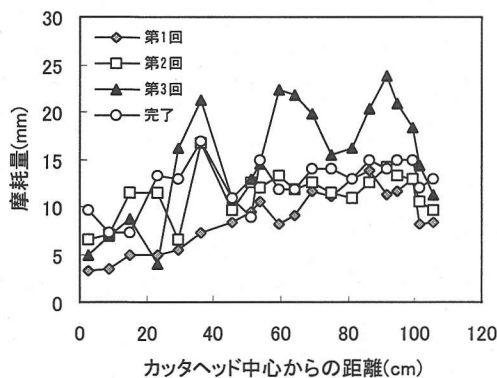


図-5 カッタ摩耗量の測定例 (事例-1)

事例-4でも当初の予想より摩耗が著しいために、掘削途中から32個のうち約半数が耐摩耗性に優れた硬質のディスクカッタに変更されている。

(2) ディスクカッタ摩耗量の測定例

摩耗量の測定はカッタ交換時と掘削完了時に写真-1に示すゲージを使用して個々のカッタ毎に行われ、摩耗や損傷の著しいカッタは新品と交換されている。摩耗量の測定例として事例-1における測定結果を図-5に示す。図ではカッタヘッドの中心からの距離と摩耗量の関係を示している。第1回目の交換では中心から離れた位置にあるカッタほど摩耗量が大きくなる傾向を示したが、この場合も外周付近の摩耗量は逆に小さくなっている。2回目と3回目の交換、並びに掘削終了時ではカッタの位置と摩耗量の関係はさらに複雑である。このような傾向は他の事例においても見られた。ディスクカッタの摩耗は中心に取付けられているカッタ、最外周付近に取り付けられるカッタ、並びにこれらの中に位置するインナカッタでは異なると言われている¹⁸⁾。そ

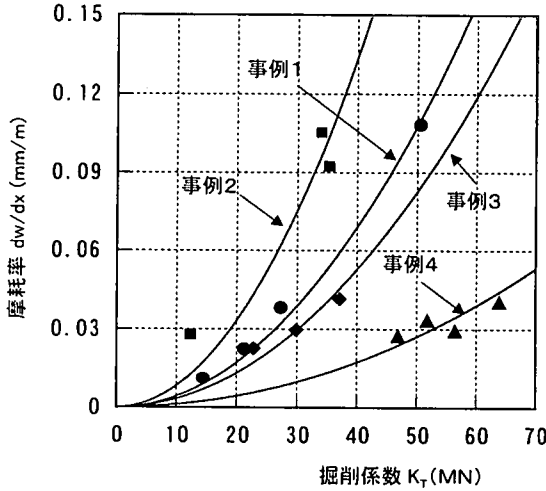


図-6 摩耗率と掘削係数の関係

ここで、本研究では測定されたカッタ毎の摩耗量の平均値を用いて検討を行った。

(3) 摩耗率と掘削係数 K_T との関係

式(6)で定義した摩耗率の関係式を検証するために、各事例においてカッタ交換区間毎に算定した摩耗率 dw/dx と単位掘削長当りの掘削係数 K_T の関係を示すと図-6のようになる。ここで、摩耗率はカッタ交換時に測定された摩耗量を前回のカッタ交換地点から累積した区間距離(掘削リング単位)で平均して求めている。掘削係数も同様に区間内の K_T の積算値を平均してリング当りの K_T を算定した。また、掘削途中でディスクカッタの仕様を変更した事例では掘削条件を同一にするために事例-2では標準型、事例-4では硬質のディスクカッタをそれぞれ使用した区間のデータを採用した。

各事例毎に式(6)を適用して摩耗率と掘削係数の関係を表す近似式求めると表-3に示す結果となる。このとき近似曲線は図に示すようになり、近似精度にばらつきがあるが摩耗率 dw/dx は掘削係数 K_T の2乗と比例関係にあることがわかる。定義式では摩耗率が掘削係数 K_T のべき乗に比例すると仮定したが、4事例の結果からシールド工事の掘削条件とは独立に摩耗率の関係式が成立しその指数は2であると言える。また、定義式はTBM工法において経験的に求められた機械量の関係にもとづいて導かれたものであるが、土砂や砂礫を含む地盤を掘削するシールド工法においても成立していることは興味深い。このような結果はDekethが人工岩石と天然の岩石を用いて行った切削工具の室内摩耗実験の結果と

表-3 各事例における摩耗率の近似式

事例	近似式	R^2	換算比例係数
1	$\frac{dw}{dx} = 4.3 \times 10^{-5} \times K_T^2$	0.995	4.3×10^{-5}
2	$\frac{dw}{dx} = 8.4 \times 10^{-5} \times K_T^2$	0.928	8.4×10^{-5}
3	$\frac{dw}{dx} = 3.3 \times 10^{-5} \times K_T^2$	0.967	2.2×10^{-5}
4	$\frac{dw}{dx} = 1.1 \times 10^{-5} \times K_T^2$	0.714	7.9×10^{-5}

矛盾しない¹⁹⁾。すなわち、この室内摩耗実験によれば、摩耗率は岩石の圧裂引張強度の2乗に比例し、比例係数は鉱物の平均粒径と石英含有率の相乗積となっている。このことは、提案する摩耗率の関係式が単一のカッタを用いた室内摩耗実験だけでなく、複数個のディスクカッタを装備して地盤を掘削するシールド掘進機に対しても成立することを示している。以上の結果から摩耗率 dw/dx の関係式は次のように表すことができる。

$$\frac{dw}{dx} = C \cdot K_T^2 \quad (8)$$

掘削係数は主に地盤の強度特性を反映する指標なので、上式は強度特性に対するカッタ摩耗量の増加割合を表し、軟らかい地盤では摩耗量が少なく、地盤の硬度が高くなるほど摩耗の進行が著しくなることを示している。また、この提案式は次節に示すように K_T^2 の積算値を監視することにより、掘削中の地盤の強度的な変化を特に注意することなくカッタの摩耗状況を把握できることを示唆している。

(4) 摩耗量の推定値と実測値の比較

摩耗率の関係式から掘削区間 L におけるディスクカッタの摩耗量 w は次式で示すように K_T^2 の積算値を用いて算定することができる。

$$w = C \cdot \int_0^L K_T^2 dx \quad (9)$$

各事例において、掘削リング毎に求められた掘削係数 K_T から式(9)を用いて算定した摩耗量と測定した平均摩耗量の関係を示すと図-7のようになる。ここで、比例係数 C には近似式で求めた値を用いている。図より推定誤差にはばらつきがあるが、4事例の範囲内でその誤差は平均で1.4mmとなり、シールド工事におけるカッタの摩耗管理において許容しうる精度である。これより、本方法は掘削

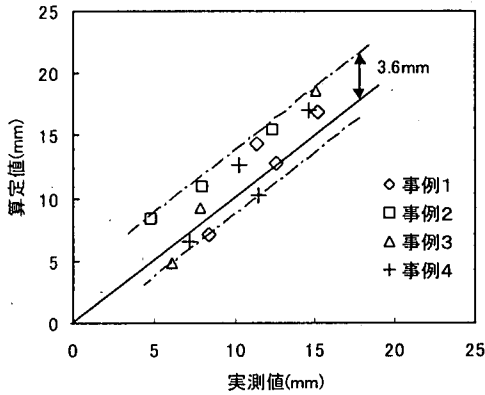


図-7 摩耗量の算定値と実測値の比較

中の摩耗量をリアルタイムで把握するのに有効な手法であると言える。

推定誤差を生じる要因について考えてみると、同一事例においてもばらつきが生じていることから、これは各区間における比例係数の値が異なっているためであると言える。すなわち、近似式で求めた比例係数が全区間の平均的な値であるのに対して、実際には掘削途中の地盤変化に伴って適切な比例係数の値は異なっていると考えられる。たとえば、事例-1で式(9)を用いて比例係数を逆算すると前半の泥岩層では $C=5.0 \times 10^{-5}$ となるのに対して、後半の砂礫層では $C=3.4 \times 10^{-5} \sim 4.2 \times 10^{-5}$ となる。近似式では $C=4.3 \times 10^{-5}$ となっているので、このような差が誤差を生じる原因であると考えられる。

(5) 比例係数Cへの影響要因

4事例の結果から、比例係数Cの値に影響を与える要因には掘進機の仕様、ディスクカッタの仕様、掘削地盤の特性などがある。このうち、掘進機の機械的な要因であるディスクカッタの配列や個数については、付録に示す異なる機種間の換算式を用いてその影響を取り除くことができるので、事例-1に用いた機種を基準として換算すると表-3の右欄に示す結果となる。この換算した比例係数と各事例における代表的な地盤の関係を示すと図-8のようになる。この図では工事中の観察記録などを参考にして、定性的ではあるが強度の低い地盤から順に並べている。また、図には事例-1で式(9)を用いて交換区間毎に逆算した比例係数と、事例-2の硬質カッタを用いた区間での比例係数をも同時に示している。以下、この図にもとづいて比例係数に対する掘進機の仕様以外の影響要因について検討する。

まず、掘削地盤の特性が比例係数に与える影響に

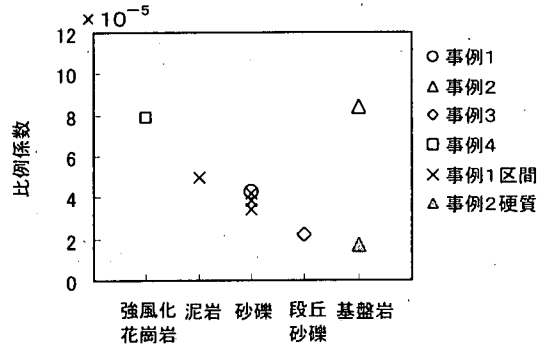


図-8 地盤の強度特性と比例係数の関係

ついて検討すると、4事例の中では最も軟らかい風化花崗岩を掘削した事例-4と、最も強度の高い頁岩主体の基盤岩を掘削した事例-2において他の事例よりも大きい値を示している。また、事例-1で区間毎に求めた比例係数についても軟らかい泥岩層において強度の高い砂礫層よりやや大きくなっている。このような結果は先に引用した室内摩耗実験と同様、実工事においても比例係数が地盤の鉱物組成やその粒径などの地質的な要因の影響を受けて変化することを示している。例えば、事例-4の風化花崗岩では摩耗を促進する石英分の含有率が高いため比例係数が大きくなっている。

次にディスクカッタ材質の影響を調べるため類似の地盤を掘削した事例-1と事例-3を比較すると、事例-1において比例係数は約2倍の値を示している。事例-3では中心部に強化型のディスクカッタを使用しているために摩耗が少なく、比例係数も小さくなっていると考えられる。また、事例-2においても標準型のディスクカッタを用いた区間で $C=8.4 \times 10^{-5}$ となるのに対して、硬質材の区間では $C=1.7 \times 10^{-5}$ となり比例係数は約1/5とかなり小さくなっている。硬質のディスクカッタを用いることによってどの程度比例係数が小さくなるかはその硬度や個数に依存するのでこの例だけでは定量的な評価は難しいが、ディスクカッタの耐摩耗性が向上するほど比例係数は小さくなると言える。

実際の工事への適用において比例係数を決定する際には、上記の影響要因を参考にし過去の実績値にもとづいて推定する必要がある。また、類似の工事例が無い場合には1回目の交換時における摩耗量の測定値から式(9)を用いて比例係数を求め、その後の掘削で適宜修正することも可能である。4事例の範囲内では標準材質のディスクカッタを用いるとして、この種の工事によく見られる礫～基盤岩の地盤で比例係数は $3.0 \times 10^{-5} \sim 8.5 \times 10^{-5}$ 程度である。

表-4 事例-1における摩耗量の推定結果

区間	掘削長 (リング')	比例係数 ($\times 10^{-5}$)	K_T (MN)	K_T^2 積算値 ($\times 10^5$)	摩耗量 (mm)
1	781	4.3	14.6	1.665	7.2
2	523	4.3	21.4	2.395	10.3
3	141	4.3	50.6	3.61	15.5
4	334	4.3	27.4	2.508	10.8
計	1779		114	10.178	43.8

5. シールド工事への適用方法

(1) カッタ交換回数の推定方法

工事の計画時点で得られた地質構成図から、シールド工事の全区間が地盤の特性や使用予定のディスクカッタの材質によって m 個の区間に分割できるとき、工事全体で生じる平均摩耗量の合計 W は次式で算定できる。

$$W = \sum_{i=1}^m C_i \int_{L_{i-1}}^{L_i} K_{Ti}^2 dx \quad (10)$$

ここで、 C_i と K_{Ti} はそれぞれ各区間の掘削条件に対応する比例係数と掘削係数を示す。上式で算定される平均摩耗量がメーカーの提示する許容限界摩耗量 w_{max} に達した時点でカッタ交換を行うとすると、この工事における必要なカッタ交換回数 N は次式より求められる。

$$N = \frac{W}{w_{max}} \quad (11)$$

事例-1 を例に試算すると、表-4 に示すように全区間で生じる総摩耗量は 43.8mm となる。ここで、 K_T^2 の積算値は各区間における平均的な K_T^2 に区間長を乗じて算定し、比例係数には近似式で求めた値を用いている。実際の工事に適用する場合には、これらの値を過去の実績値から推定する必要がある。ディスクカッタの摩耗限界値を 18mm とすると交換回数 N は 2.4 回となり、掘削中に必要なカッタ交換回数は 2 回となる。平均摩耗量はその最大値ではないので、この方法で算定した交換回数で施工すると一部のディスクカッタでは摩耗限界値を越えて掘削することになる。しかし、シールド工事で使用されるディスクカッタは摩耗限界を超えると全て新品と交換され、またメーカーの提示する許容限界値はカッタの修理可能な限界を意味しているので、摩耗限界値を越えて掘削してもシールド機本体に損傷を与えることは少なく、式(11)を用いて交換回数を決定しても実用的には問題はないと言える。

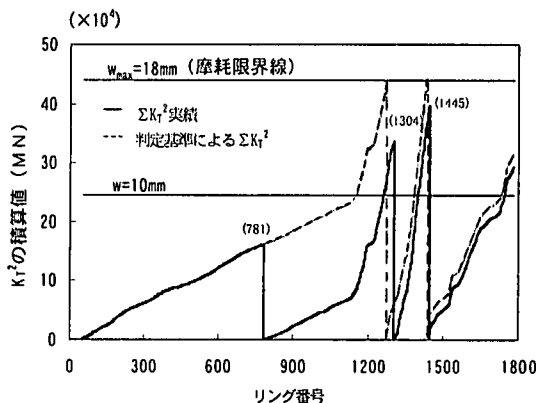


図-9 K_T^2 の積算値による摩耗管理例 (事例-1)

(2) K_T^2 の積算値を利用した摩耗管理方法

提案式に従えば、掘削中のディスクカッタの交換は式(12)で示す基準式にもとづいて判断されることになる。すなわち摩耗限界値 w_{max} に対して w_{max}/C で算出された値を基準とし、掘削中に求めた K_T^2 の積算値がこの値に達した時点で交換が必要であると判断できる。

$$\int_0^L K_T^2 dx \leq \frac{w_{max}}{C} \quad (12)$$

図-9 は事例-1 で計測された K_T^2 の積算値の変化を示したものである。この例では 1 回目の交換地点において、 w_{max}/C で求めらる摩耗限界線に達するまでかなり余裕があるので、交換の必要はなく継続して掘削可能であると判断できる。このとき、 K_T^2 の積算値は図中の破線のように変化し摩耗限界値に達したときだけカッタ交換を行うとすると、この工事での交換数は 2 回となり式(11)で算定した回数と一致する。

カッタ交換地点については、 K_T^2 の積算値の増加率から摩耗限界に達するまでの距離を算定することによって予測できる。図では K_T^2 の積算値の変化曲線と摩耗限界線との交点が適切な交換地点となる。この例で 1 回目や 3 回目の交換区間のようにほぼ直線的に増加する場合にはグラフからも簡単に求めることができるが、2 回目の区間のように途中で勾配が著しく変化する場合は変化後の勾配を利用して交点の位置を修正する必要がある。実際の工事ではどの位置で勾配が変化するか不明なので、常にその勾配を監視しておくことが重要である。このように掘削中の機械量データから求められる K_T^2 の積算値の変化を監視することにより、シールド工事にお

けるディスクカッタの摩耗管理を行うことができる。

6. まとめ

本研究ではシールド掘進機に装備されたディスクカッタの摩耗量をリアルタイムに予測する簡単な経験式を提案し、4件のシールド工事における計測データを用いて検証した。また、実際の工事への適用方法を事例にもとづいて検討した。得られた結果をまとめると次のようになる。

- ① シールド掘進機の機械量データから導いた掘削係数 K_r と K_T は主に掘削地盤の強度特性の影響を受けて変化し、ディスクカッタの許容限界内の摩耗による切削能力の低下の影響は小さい。
- ② 摩耗量の推定には掘削係数 K_r が有用な指標となり、摩耗率は掘進機やディスクカッタの仕様あるいは掘削地盤の特性などの掘削条件に関係なく K_T の2乗に比例し、掘削中の摩耗量は K_T^2 の積算値から算定できる。
- ③ 比例係数は掘進機の機械的な仕様、ディスクカッタの仕様、地盤特性などの影響を受けて変化する。このうち地盤特性に関しては強度特性よりもむしろ地質特性の影響が大きく、石英などの摩耗を促進する鉱物成分が多くなると比例係数は大きくなる。また、耐摩耗性に優れた硬質のディスクカッタを用いると比例係数は小さくなる。
- ④ 実際の工事では K_T^2 の積算値の変化を監視することにより、ディスクカッタ交換の判断や交換地点の予測などの摩耗管理が可能である。

今後の課題として、一つには比例係数の合理的な決定方法の確立が挙げられる。このためには、できるだけ多くの工事実績を蓄積し各種の掘削条件における比例係数の値を把握しておく必要があることは言うまでもないが、蓄積されたデータから統計的な手法を用いて合理的に決定する方法を確立しておくことも重要である。また、本研究ではシールド掘進機に装備されたディスクカッタを対象に検討したが、提案する摩耗率の関係式は掘削機能として重要な役割を果たしているカッタビットに対しても成立すると考えられるので適用範囲を広げる必要がある。

最後に、シールド工事における最近の傾向の一つである長距離化に対してカッタの耐久性向上が重要な課題となっているが、これには耐摩耗性に優れたカッタの開発と同時に摩耗の進行を極力少なくするような運転管理方法を確立する必要がある。本方法を利用して掘削中に計測される機械量データから摩

耗量をリアルタイムに推定可能なシステムを構築し、掘進機の運転操作と連動させることによって経済的な工事が行えるシステムを開発することも今後の課題として重要である。

付録 異なる機種間での比例係数の換算式

今、カッタヘッドの中心から r_i の位置に配置されたディスクカッタに加わる回転力を F_{ri} とすると、 $i=1, 2, \dots, N$ 個のカッタによってカッタヘッドにもたらされる全トルク T は

$$T = \sum_{i=1}^N r_i F_{ri} \quad (13)$$

と表される。回転力がすべてのディスクカッタで均等と仮定できるとき、トルク T はその位置の平均距離 r_m を用いて次式で表すことができる。

$$T = N r_m F_R \quad (14)$$

一方、回転力 F_R は式(2)、式(3)と同様カッタ貫入量 P_c に比例し、その比例係数を K_R とすると式(4)、式(5)と同様に K_R に関して次式が得られる。

$$K_R = \frac{F_R}{P_c} = \frac{F_R}{v/\omega} \quad (15)$$

ここで K_R と式(5)の K_T を比較すると両者の間には次式で示す関係がある。

$$K_T = N r_m K_R \quad (16)$$

同一の掘削地盤を異なる仕様の機種で掘削する場合、ディスクカッタが同一の幾何学的形状を有する限り K_R は同じと期待されるので、2つの異なる機種の属性を添字 a, b で区別すれば式(16)より

$$\frac{K_{Ta}}{N_a r_{ma}} = \frac{K_{Tb}}{N_b r_{mb}} \quad (17)$$

が成り立つ。また機種が異なってもディスクカッタの幾何学的な形状と材質が同じであるならば摩耗率 dw/dx は同値なので、式(8)における2つの機種 a, b での比例係数 C_a, C_b は次の関係を満たす。

$$C_a K_{Ta}^2 = C_b K_{Tb}^2 \quad (18)$$

これより、2つの異なる機種間での比例係数の換

算式として次式を得ることができる.

$$\frac{C_a}{C_b} = \left(\frac{K_{7b}}{K_{7a}} \right)^2 = \left(\frac{N_b r_{mb}}{N_a r_{ma}} \right)^2 \quad (19)$$

参考文献

- 1) 深沢成年, 石徳博行, 槻宅武夫: 長距離シールドのビット摩耗と進歩促進対策, 建設の機械化, pp. 8-14, 1996.
- 2) 山下幸夫, 藤田謙二郎: シールド切羽監視システムの現場適用例, 建設の機械化, NO. 490, pp. 48-51, 1990.
- 3) 橋本司, 多田幸司, 谷口 徹: 密閉式シールドにおける切羽探知システム, 電力土木, NO. 218, pp. 159-163, 1989.
- 4) 秩父顕美, 吉野広司, 佐藤一彦, 柴 涛: シールド掘削音による切羽地質の判定方法について, 土木学会第 52 回年次学術講演会 VI, pp. 196-197, 1997.
- 5) 中山隆義, 井上哲, 背野康英, 高島良澄, 岸武男: TBM 全自動掘削システム, 建設機械, pp. 40-44, 1996.
- 6) 吉野広司, 秩父顕美, 佐藤一彦: 掘削音と機械量を利用したディスクカッタの診断, 土木学会第 51 回年次学術講演会 VI, pp. 370-371, 1996.
- 7) 吉野広司, 秩父顕美, 佐藤一彦, 柴 涛: シールド掘削におけるディスクカッタの交換基準, 土木学会第 52 回年次学術講演会 VI, pp. 222-223, 1997.
- 8) 秩父顕美, 吉野広司, 佐藤一彦: シールド掘進機におけるカッタ摩耗量の推定方法, 日本建設機械化協会関西支部摩耗対策委員会研究成果報告書 (V), pp. 59-68, 1997.
- 9) 小松製作所編: TBM の諸元と性能予想, 1991.
- 10) 小松製作所編: 巨礫地盤における最近のシールド“礫破碎方式を中心に”, 1987.
- 11) NKK 編: ビット摩耗検討書, 1996.
- 12) 佐藤雷介: 岩盤シールドにおけるビット摩耗の予測と実績, 社内発表資料, 1996.
- 13) Sato, K., Gong, F. and Itakura, K.: Prediction of disc cutter performance using circular rock cutting ring, Proceedings of the First International Symposium on Mine Mechanization and Automation, pp.[1]31-40, 1991.
- 14) Gong, F., 佐藤一彦, 浅井秀明: 円周軌道切削における岩石の切削抵抗—ディスクカッタによる岩石の切削抵抗に関する研究 (第 1 報), 資源と素材, Vol. 22, No. 3, pp. 153-161, 1992.
- 15) 福井勝則, 大久保誠介, 本間直樹: TBM の掘削抵抗を利用した岩盤強度の推定, 資源と素材, Vol. 112, No. 5, pp. 303-308, 1996.
- 16) 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, Vol. 28, No. 2, pp. 35-43, 1997.
- 17) Gurgenci, H., Xing, S.L., Guan, Z. and Hood, M.: Tool temperature during disc cutting, Proceedings of the Third International Symposium on Mine Mechanization and Automation, pp.[10]1-11, 1995.
- 18) 西沢泉, 三谷典夫: ディスクカッ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.
- 19) Deketh, H.J.R.: Wear of Rock Cutting Tools, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 100-109, 1995.

(1998. 12. 7 受付)

PREDICTION OF DISC CUTTER WEAR THROUGH MACHINE PERFORMANCE DATA IN SHIELD TUNNELING OPERATION

Akiyoshi CHICHIBU, Hiroshi YOSHINO and Kazuhiko SATO

A new method for estimating the wear of disc cutters is proposed to improve the management of shield tunneling operation. Machine torque per unit penetration, called the coefficient of excavation K_p , is a useful parameter for relating the machine performance data and the wear of disc cutters. The investigation on data sets obtained from four construction sites shows that the wear rate is proportional to the square of K_p regardless the condition of tunneling. On the other hand, the coefficient in the formula depends on the conditions except hardness of the ground. Thus, wear of disc cutters can be evaluated from the cumulative value of K_p^2 . Outline of the equation and the results of the investigation are given in this paper. The way of applying this method to the management is also suggested.