

砂礫地盤におけるシールドカッタービットの 摩耗評価に関する研究

山元 寛哲¹・笹岡 孝司²・島田 英樹³・野口 宏治⁴・大前 慶恵⁵・羽鳥 哲夫⁶

¹正会員 株式会社大林組 土木本部生産技術本部シールド技術部（〒108-8502 東京都港区港南2-15-2）

E-mail: yamamoto.hiro@obayashi.co.jp

²九州大学大学院工学研究院 地球資源システム工学部門（〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744）

E-mail: sasaoka@mine.kyushu-u.ac.jp

³正会員 九州大学大学院工学研究院 地球資源システム工学部門（〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744）

E-mail: shimada@mine.kyushu-u.ac.jp

⁴株式会社大林組 機械部（〒108-8502 東京都港区港南2-15-2）

E-mail: noguchi.koji@obayashi.co.jp

⁵正会員 株式会社大林組 土木本部生産技術本部シールド技術部（〒108-8502 東京都港区港南2-15-2）

E-mail: tsujino.yoshie@obayashi.co.jp

⁶株式会社大林組 機械部（〒108-8502 東京都港区港南2-15-2）

E-mail: hatori.tetsuo@obayashi.co.jp

昨今のインフラ整備で多用されるシールド工法では、掘削に伴うカッタービットの摩耗は避けることができない。近年では、施工条件の多様化も相まって、想定外の摩耗に起因する施工トラブルが散見されるなど、カッタービットの摩耗が工事の施工性や経済性に影響を与える要因となっている。このカッタービットの摩耗については、これまで種々の研究が行われているものの、事前の摩耗予測に関する定量的評価指標は未だ確立されていない。

そこで本研究では、砂礫地盤を対象としたシールド実施工現場において、掘削土砂の力学的特性やビット摩耗特性を室内試験にて確認するとともに、実際のビット摩耗データと比較検証し、特異な地盤条件を反映したシールドカッタービットの摩耗評価手法の確立をめざした。

Key Words : shield method, cutter bit, wear, quantitative evaluation in advance

1. はじめに

昨今のインフラ整備のうちトンネル工事においては、多様な地盤条件に対応でき、かつ道路交通や周辺環境への影響が少ないシールド工法を採用する例が多い。シールド工法では、シールド先端のカッターヘッドを回転させ地山を掘削する。このカッターヘッドには先端に超硬合金を埋め込んだカッタービットが装備されているが、掘削に伴うビットの摩耗は避けることができない（図-1）。近年では、切羽面を開放しない密閉型シールドの採用がほとんどであるが、施工条件の多様化も相まって想定外のビット摩耗に起因する施工トラブルが散見されており、掘削効率の低下や追加のビット交換作業など施工性、経済性に影響を与える要因となっている。

このカッタービットの摩耗については、これまで種々

の研究が行われているものの、事前の摩耗予測に関する定量的評価指標は未だ確立されておらず、過去の施工実績に基づいて予測しているのが実情である。その実績に基づく予測評価の指標の一つに「ビット摩耗係数」がある。ビット摩耗係数とは、カッターヘッドの回転に伴いビットが掘削面を摺動する距離（以下、ビット摺動距離）とビット摩耗量との比であり、値が大きいほどビットが



図-1 シールドカッタービットの摩耗

摩耗しやすいことを表す（式(1)）。

$$d = k \cdot L \quad (1)$$

d : ビット摩耗高さ (mm)
 k : ビット摩耗係数 (mm/km)
 L : ビット摺動距離 (km)

過去の実績データに基づいたシールドメーカーによるビット摩耗係数の設定例を 表-1 に示すが、その値はメーカーによってかなり異なる。また、土質区分が大まかなため特異的な地盤条件を反映しにくく、これらが予測以上のビット摩耗や、ひいては掘進停止等のトラブルにつながる要因の一つになっているとも考えられる。

そこで本研究では、硬質な砂礫地盤（図-2）を対象とした複数のシールド実施工現場において、掘削土砂の物理的特性やビット摩耗特性を室内試験にて確認するとともに、実際のビット摩耗データと比較検証し、地盤特性を反映したシールドカッタービットの定量的な摩耗評価手法の確立をめざした。

2. 研究対象

砂礫地盤を泥土圧シールド工法で掘進する3つの現場を対象に、掘進時の排出土砂から試料を採取して各種室内試験を行うとともに、掘進途中のビット摩耗点検時やビット交換時、あるいは到達時に実際のビットの摩耗量を計測した（表-2）。

本研究では、シールドのカッターヘッドに装備した数種類のカッタービットのうち、地山の先行切削を主目的とした先行ビット（チップ種類：E5）の摩耗を検討の

表-1 ビット摩耗係数の設定例（泥土圧シールド）

ビット種類	超硬種類	メーカー	ビット摩耗係数（ $\times 10^{-3}$ mm/km）		
			粘土・シルト	砂	砂礫
先行ビット	E5	A社	23.0	38.0	68.0
		B社	9.0	34.0	80.0
		C社	10.0	30.0	50.0
		D社	15.0	40.0	40.0



図-2 シールド掘削対象地盤（砂礫）の例

対象とした。室内試験用の試料は、ビット摩耗量を計測するまでの各区分内において、施工延長100～250m程度の間隔（区分内で2点以上）で採取した（図-3）。

3. 室内試験による地盤特性の把握

(1) 礫の強度

現場から採取した試料のうち、礫について一軸圧縮試験および圧裂引張試験を行って強度を測定した。試験用供試体は、採取した礫をロックコアリングドリルで直径25mmの円柱状にくり抜き、湿式カッターと研磨機を用いて長さ50mm（一軸圧縮試験用）および25mm（圧裂引張試験用）に切断・整形した。整形した供試体は、乾燥機にて72時間強制乾燥させて使用した。試験結果を 図-4 および 図-5 に示す。現場Cの一軸圧縮試験については、採取した礫のほとんどがφ50～70mm程度の礫径であったため供試体を作製できず、試験は1地点のみ実施した。

(2) 礫の鉱物組成（石英含有率および粒径）

礫の石英含有率を測定する方法として、内部標準法を利用したX線粉末回析（XRD）⁵⁾を採用した。採取した礫をハンマーおよび玉髓乳鉢を用いて75μm以下になるよう細かく粉砕し、XRD回析装置にて測定した。回析の際の内部標準物質としては蛍石（CaF₂）を使用した。測定結果を 図-6 に示す。現場Aや現場Bに比べ、現場Cの礫は石英を比較的多く含む傾向にあった。

また、採取した礫から薄片試料を作製し、光学顕微鏡を用いて石英を観察した。確認できた石英粒子の短径と長径を測定し、統計処理を行って平均粒径を求めた（表-3）。

表-2 対象現場の概要

現場	シールド外径	施工延長	主な礫の岩種	ビット種類	摩耗量計測回数
A	3,080mm	2,884m	濃飛流紋岩	先行(E5)	3回
B	2,280mm	1,249m	流紋岩	先行(E5)	2回
C	4,190mm	2,110m	チャート	先行(E5)	4回

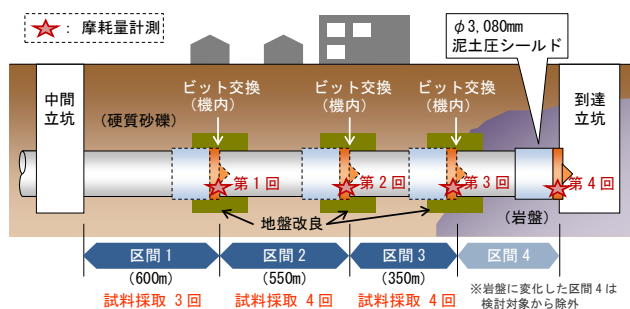


図-3 ビット摩耗量計測と試料採取との関係（現場A）

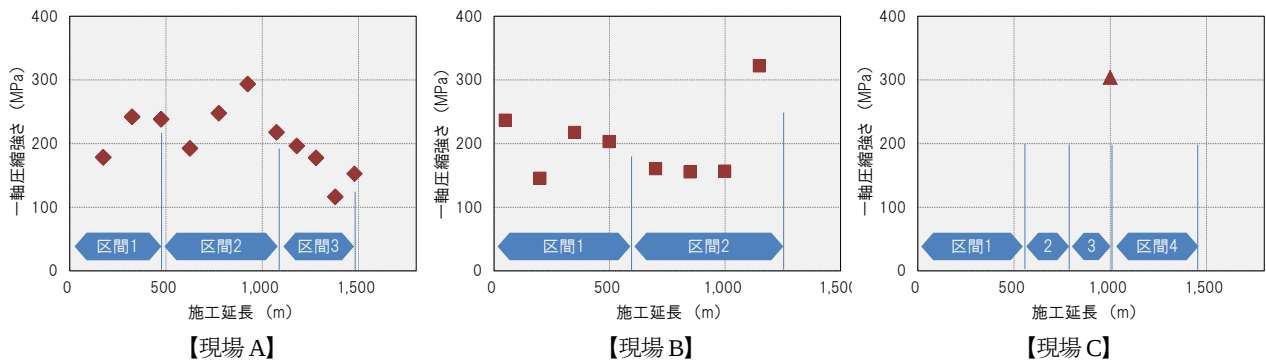


図-4 礫の一軸圧縮強さ

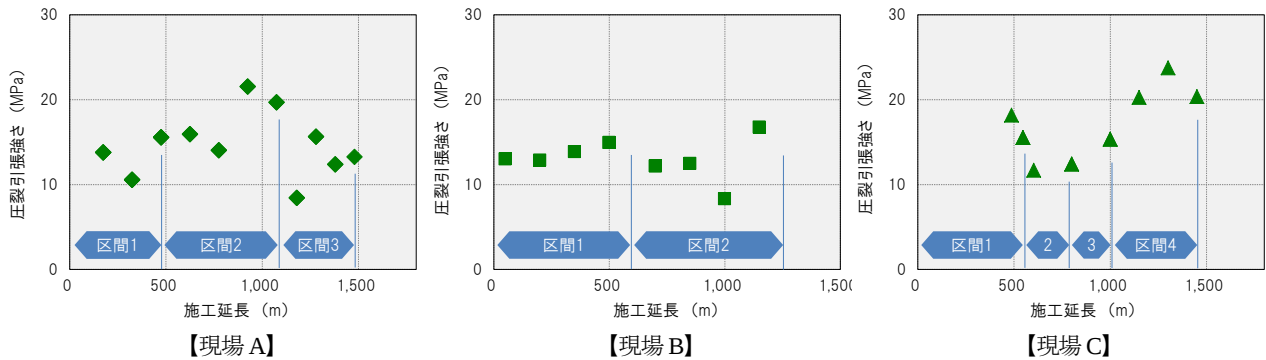


図-5 礫の圧裂引張強さ

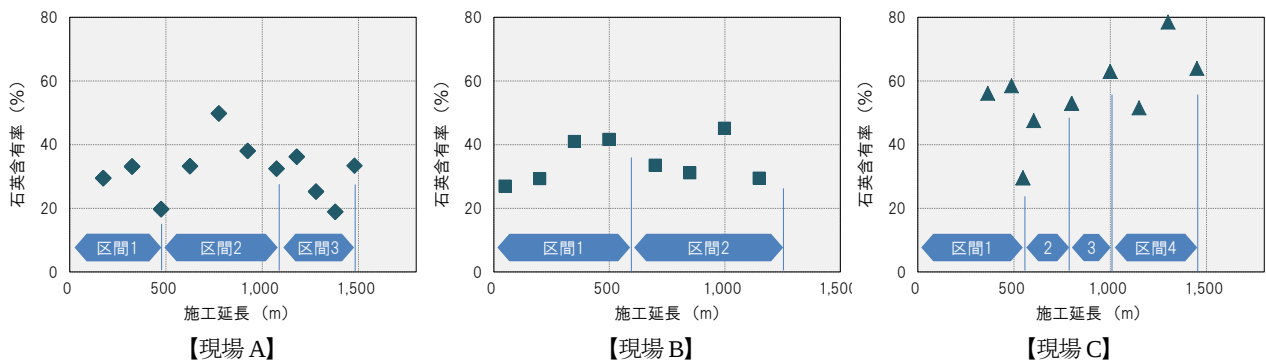


図-6 礫の石英含有率

表-3 礫に含まれる石英粒子の平均粒径

現場	A	B	C
石英粒子の平均粒径 (mm)	0.736	0.43~1.14	0.01 以下~0.5

(3) 地盤の礫含有率

採取した試料（掘削土砂）について粒度試験を行い、地盤中の礫（粒径2mm以上）の含有率を求めた。試験結果を図-7に示す。現場Aでは、礫含有率は概ね40～60%の範囲にあり、全区間にわたってほぼ一様であった。現場Bでは、概ね30～70%の範囲でばらついており、明確な傾向は見られない。現場Cでは、掘進初期の地盤は粘性土が卓越し礫は少なかったが、次第に砂質土、礫質土へと変化し、礫含有率が増加する傾向にあった。

4. 現場でのビット摩耗実績

対象の3現場にて、各区間施工後の先行ビットの摩耗量（摩耗高さ）を測定した。このうち、現場Aの区間2での測定結果を図-8に示す。ここで、グラフの横軸はビット摺動距離であり、各ビットの取り付け位置（中心からの取り付け半径）と施工区間中のカッター総回転数から換算している。ビット取り付け位置が外周部であるほど、このビット摺動距離は大きくなる。ビット摩耗は摺動距離が大きいほど一次線形的に増大しており、カッター外周部の方が内周部に比べて摩耗量が多いことがわかる。図-8中の近似直線の勾配が、前述した「ビット摩耗係数」である。

各現場・区間での実摩耗量から求めたビット摩耗係数を表-4に示すが、その値にはかなりばらつきが見られる。

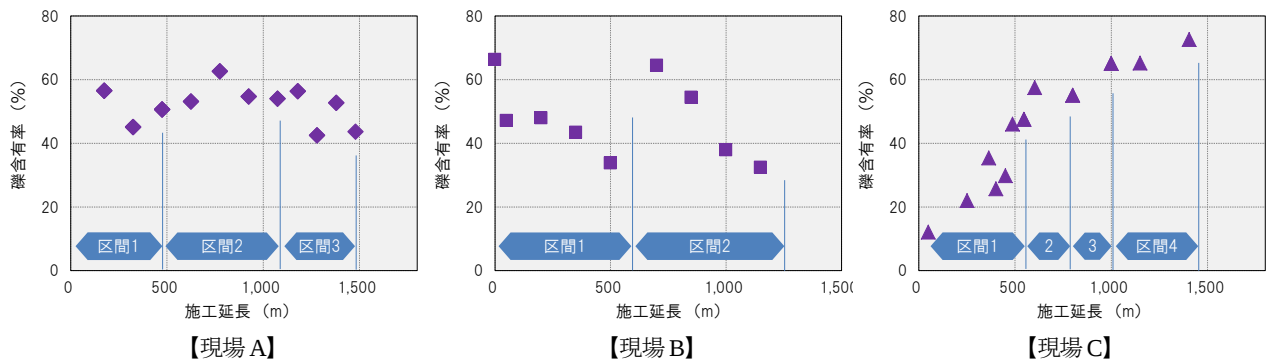
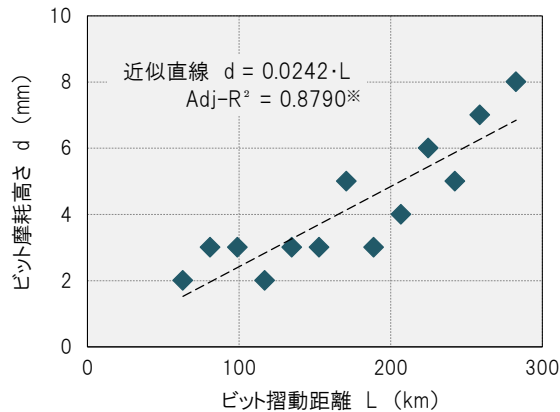


図-7 地盤の礫含有率



※Adj-R²: 自由度修正決定係数

図-8 ビット摩耗量測定結果 (現場 A, 区間 2)

表-4 実摩耗量から求めたビット摩耗係数

現場・区間	現場 A		
	区間 1	区間 2	区間 3
ビット摩耗係数 ($\times 10^{-3}$ mm/km)	16.5	24.2	20.4

現場・区間	現場 B	
	区間 1	区間 2
ビット摩耗係数 ($\times 10^{-3}$ mm/km)	12.0	18.9

現場・区間	現場 C			
	区間 1	区間 2	区間 3	区間 4
ビット摩耗係数 ($\times 10^{-3}$ mm/km)	22.3	43.6	54.9	67.1

ている鉱物の種類や大きさといった地質学的特性とも複雑に関連しており、その摩耗能を評価する指標としては「Cerchar 摩耗能指数」や「Schimazek 摩耗能指数」、「修正摩耗能指数」が比較的簡便で広く活用されている。

a) Cerchar 摩耗能指数

Cerchar 摩耗能指数は、フランスの石炭公社研究所 (CERCHAR) が提唱した試験方法によって求められる指標であり¹⁾、試験用ビットに一定の荷重を载荷しながら岩石供試体を引っかき、摩耗したビット先端の平面幅を計測して、指数を算出する (式(2))。

$$CAI = d \times 10 \quad (2)$$

CAI : Cerchar 摩耗能指数 (Cerchar Abrasivity Index)

d : 試験用ビットの摩耗した平面幅 (mm)

Cerchar 摩耗能指数は、対象岩石が限定されず簡便に試験を行うことができるという利点があるが、試験での計測値のオーダーが非常に小さく試験用ビットの製作精度等によって誤差が生じることや、同じ岩種や同等の強度を有する岩石間での評価が難しい²⁾という課題もある。

b) Schimazek 摩耗能指数

Schimazek 摩耗能指数は、Schimazek & Natz が提唱した指標であり³⁾、岩石の薄片を作製し光学顕微鏡にて調査した岩石の内部構造 (鉱物組成) と、岩石強度をあわせて考慮する方法である (式(3))。

$$F = Q \cdot D \cdot S_t \quad (3)$$

F : Schimazek 摩耗能指数

Q : 岩石中の石英の体積含有率 ($0 \leq Q \leq 1$)

D : 岩石中の石英粒子の平均粒径 (mm)

S_t : 岩石の引張強さ (MPa)

Schimazek 摩耗能指数は、鉱物組成と岩石強度の両面から摩耗能を定量的に評価できるという優位性がある。ただし、対象は堆積岩や火成岩、変成岩といった石英をある程度以上含有する岩石に限られ、石灰石や大理石のようにほとんど石英を含まない岩石には適用できない。

5. 砂礫地盤でのビット摩耗特性指標

(1) 岩盤での従来のビット摩耗特性指標

削岩機やロードヘッダなど岩盤・岩石を対象としたトンネル掘削機のビット摩耗評価方法については、古くから多くの研究がなされており、摩耗影響の要因として「岩石の摩耗能」(岩石が接触する相手を摩耗させる程度)があげられている。岩石の摩耗能は、岩石の強度や変形性、破砕性など力学的特性とともに、岩石を構成し

また、薄片から内部構造を調査する際には、調査範囲や顕微鏡の視野によって調査結果にばらつきが生じ、精度の信頼性の面で課題がある⁴⁾。

c) 修正摩耗能指数

修正摩耗能指数は、上記Schimazek摩耗能指数を再検討することでEwendtによって提案された指標であり⁹⁾、岩石に含まれる硬度の高い鉱物でも粒子径が1mm以下と小さい場合にはビットの摩耗に及ぼす影響が小さいこと、また圧裂引張強さを点載荷強さによって代替できることが指摘され、石英粒径の影響を抑えた指標となっている(式(4))。

$$F_{mod} = Q \cdot \sqrt{D} \cdot I_{S50} \quad (4)$$

F_{mod} : 修正摩耗能指数

Q : 岩石中の石英の体積含有率 ($0 \leq Q \leq 1$)

D : 岩石中の石英粒子の平均粒径 (mm)

I_{S50} : 岩石の点載荷強さ (MPa)

(2) 礫自体のビット摩耗特性指標

前述の岩盤における評価方法を参考に、砂礫地盤中の礫自体のビット摩耗特性（いわゆる「礫の摩耗能」）について検討した。前述の評価方法のうち、試験による誤差や同種・同等強度の岩石での評価が難しいといった課題のあるCerchar摩耗能指数を除く2つの指数について、礫の室内試験結果より算出した値を「礫の摩耗能」を表す指標と捉え、実施工でのビット摩耗との関係を比較検証した。

a) 礫のSchimazek摩耗能指数とビット摩耗との関係

室内試験にて確認した地盤物性値をもとにSchimazek摩耗能指数 F を算出した。また、各現場・区間内での F の平均値を求め、現場でのビットの実摩耗量から求めたビット摩耗係数と比較した(図-9)。なお、従来の考え方では、ビット摩耗係数は超硬チップの摩耗高さ(単位: mm)に対する係数となっているが、同様の地盤条

件にあってもビット(チップ)の形状寸法によって摩耗高さの値は変わってくると考えられる。そこで、以降の検討におけるビット実摩耗量およびビット摩耗係数は、測定した摩耗高さとチップの形状および単位体積質量から換算した摩耗質量(ビット1個当りのチップの質量減少量, 単位: g)を用いることとした(式(5))。

図-9 のとおり、 F はビット摩耗係数 k_m と負の相関となり、相関性は見られなかった。

$$w = k_m \cdot L \quad (5)$$

w : 換算ビット摩耗質量 (g)

k_m : ビット摩耗係数 (g/km)

L : ビット摺動距離 (km)

b) 礫の修正摩耗能指数とビット摩耗との関係

Schimazek摩耗能指数と同様に、確認した地盤物性値をもとに修正摩耗能指数 F_{mod} を算出し、各現場・区間内での平均値をビット摩耗係数と比較した(図-10)。修正摩耗能指数の算出にあたっては、点載荷強さではなく、室内試験で得られた圧裂引張強さを採用した。

ここでも F と同様に、 F_{mod} とビット摩耗係数 k_m は負の相関となり、相関性は見られなかった。

c) 新たな摩耗特性指標の検討

以上の結果より、礫自体の摩耗能がビット摩耗に影響を及ぼす要因の一つではあることは、岩盤に関するこれまでの多くの研究成果等からも容易に推測できるものの、その摩耗能を表す従来の指標であるSchimazek摩耗能指数 F や修正摩耗能指数 F_{mod} のみではシールドカッタービットの摩耗を正確に評価できないと考えた。

ここで、EwendtがSchimazek摩耗能指数を再検討して修正摩耗能指数を提案した際、硬度の高い鉱物でも粒子径が1mm以下と小さい場合にはビット摩耗に及ぼす影響が小さいことを指摘していることに着目し、Schimazek摩耗能指数のパラメータから石英平均粒径 D を控除した

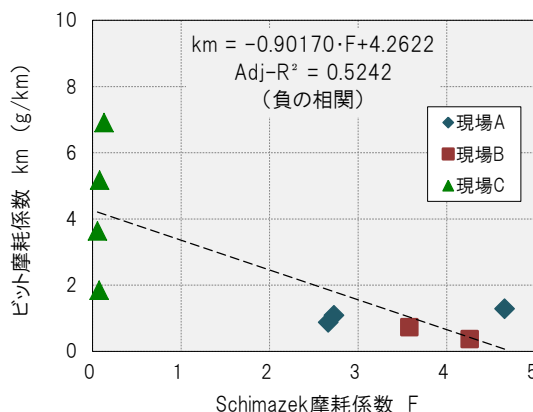


図-9 Schimazek 摩耗能指数とビット摩耗係数との関係

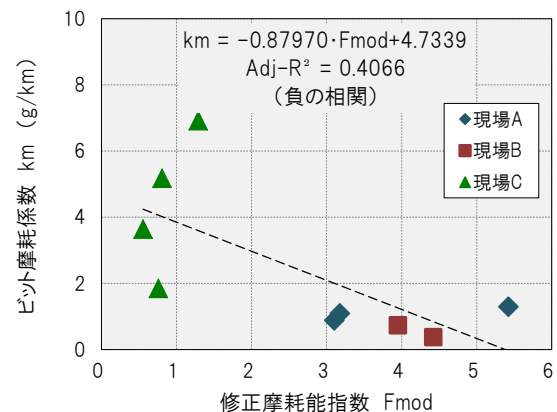


図-10 修正摩耗能指数とビット摩耗係数との関係

礫の石英含有率 Q と引張強さ S_t による指標 $Q \cdot S_t$ を用いてビット摩耗との関連性を再検証することを試みた。 $Q \cdot S_t$ とビット摩耗係数 k_m との関係を 図-11 に示すが、Schimazek 摩耗能指数 F や修正摩耗能指数 F_{mod} の場合に比べて相関性は高くなる。つまり、本研究が対象とした現場の地盤のように、礫に含まれる石英粒子の径が1mm程度以下と小さい場合には、石英粒径がビット摩耗に影響を及ぼす程度は小さく、礫の摩耗能を評価する指標として $Q \cdot S_t$ は有効であると考えられる。

(3) その他ビット摩耗への影響要因

a) 地盤の礫含有率

ビット摩耗への影響要因として、掘削対象地盤の粒度組成、特に礫の含有率が関係するであろうことは容易に想定できる。前出 表-1 の過去の実績データに基づくビット摩耗係数設定例を見ても、粘土・シルトや砂に比べ砂礫の摩耗係数は大きく、その傾向は明らかである。そこで、シールド工事着手前の土質調査として一般的に実施され、比較的簡便な粒度試験によって得られる粒度分布データのうち、粒径2mm以上の礫分の含有率 G を摩耗特性指標の一つとして考慮することとした。

b) 掘進中にビットに作用する地山への押付け力

対象地盤の特性以外にも、シールド掘進時の施工条件、特にカッターヘッドを回転させながら地山を切削する際にビットに作用する地山への押付け力は、ビット摩耗に大きく影響すると考えられる。そこで、現場の施工管理データに着目し、掘進中のシールド総推力等のデータからビット1個当りに作用する地山への押付け力 p を算出して、指標の一つとして考慮することとした。

能 $Q \cdot S_t$ 、礫含有率 G 、ビットの押付け力 p を考慮し、その積 $(Q \cdot S_t) \cdot G \cdot p$ と現場でのビット摩耗係数 k_m との関係について検証した。ここで、礫含有率 G の値は、現場の掘削土砂から採取した試料による粒度試験結果 (図-7) を用いた。また、ビットの押付け力 p の値は、現場でのシールド総推力や切羽圧等の掘進管理データをもとに算出した (式(6))。

$$p = (f - f_a - f_b)/n \quad (6)$$

p : ビット 1 個当りに作用する地山への押付け力 (kN)

f : 掘進中のシールド総推力 (kN)

f_a : チャンバー内圧力による前面抵抗 (切羽圧データと掘削径より想定, kN)

f_b : シールド外周面の摩擦抵抗 (シールド寸法より想定, kN)

n : カッターヘッドへのビット装備数 (個)

$(Q \cdot S_t) \cdot G \cdot p$ と k_m との関係を 図-12 に示す。礫の摩耗能 $Q \cdot S_t$ のみで評価した場合 (図-11) と比べて、さらに相関の度合いが良くなる傾向にある。つまり、砂礫地盤でのシールドカッタービットの摩耗を評価するための摩耗特性指標としては、礫自体の摩耗能だけでなく、地盤の粒度組成として礫含有率を、掘進時の施工条件としてビットの地山への押付け力を考慮することが有効であると考えられる。

また、各指標がどの程度ビット摩耗に影響を与えているかという影響度合いについて検討したところ、図-13 に示すように礫の摩耗能の影響度合いを小さく評価した場合において、ビット摩耗との関係はさらに高い相関が得られることがわかった。

6. ビット摩耗との関連性の検証

砂礫地盤でのビット摩耗特性の指標として、礫の摩耗

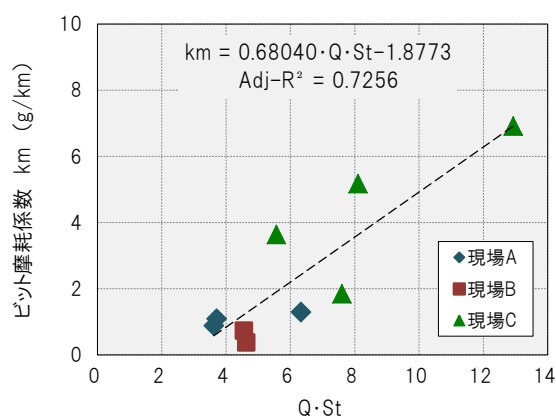


図-11 $Q \cdot S_t$ とビット摩耗係数との関係

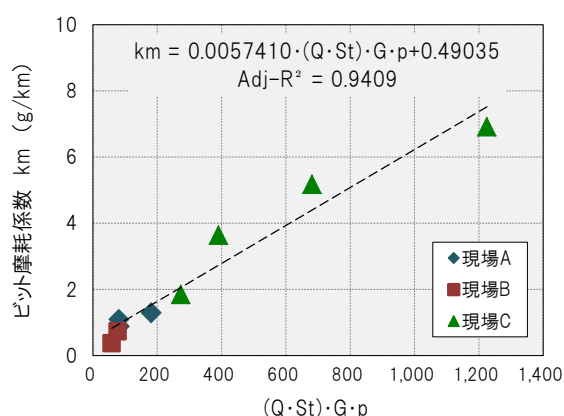


図-12 $(Q \cdot S_t) \cdot G \cdot p$ とビット摩耗係数との関係

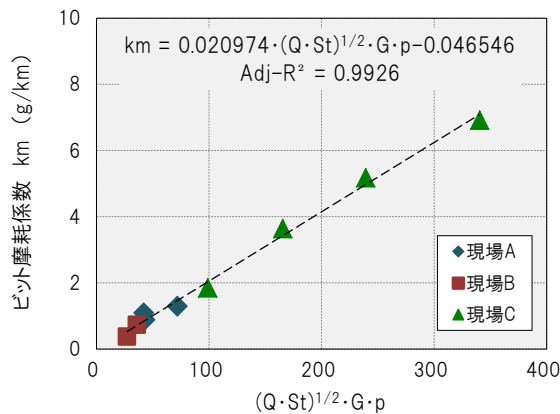


図-13 $Q \cdot S_t$ の影響度合いを小さく評価 (1/2 乗) した場合

④さらに、礫含有率 G やビット押付け力 p に比べて、礫の摩耗能 $Q \cdot S_t$ の影響度合いを小さく評価した場合、さらに高い相関が得られる。

以上より、砂礫地盤におけるシールドカッタービットの摩耗は、礫の摩耗能、礫含有率、ビット押付け力を指標として定量的に評価できることがわかった。これらの指標のうち、礫の摩耗能を構成するパラメータ値や礫含有率は、事前の土質調査成果やコアサンプル等を用いた室内試験によって把握できる。また、ビット押付け力は、過去の施工実績等に基づく施工計画（推力計画）やシールド設計（ビット配置、形状等）によって施工前に仮定できることから、この評価方法によってビット摩耗量を精度よく事前に予測することが可能である。

7. まとめ

砂礫地盤を掘進するシールド実現場を対象に、地盤特性や施工条件とビット摩耗との関連性を検証した結果、以下の知見が得られた。

- ①礫の摩耗能を表すSchimazek摩耗能指数 F や修正摩耗能指数 F_{mod} （礫の強度、石英含有率、石英粒径に基づく指標）のみでの評価では、ビット摩耗との明確な相関性は見られない。
- ②上記①に対し、パラメータとして石英平均粒径 D を控除した指標 $Q \cdot S_t$ にて評価した場合、相関性は高くなる。つまり、礫に含まれる石英の粒径がビット摩耗に影響を及ぼす程度は小さいと考えられる。
- ③礫の摩耗能を $Q \cdot S_t$ で評価し、礫含有率 G およびビット押付け力 p をあわせて考慮した場合、相関の度合いが良くなる傾向にある。

参考文献

- 1) Michael Alber et al : 47nd Rock Mech Rock Eng, pp.61-266, 2014.
- 2) 山元寛哲ほか：シールドマシンカッタービットの摩耗の定量的評価に関する研究，土木学会 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 44, pp.307-312, 2016.
- 3) Schimazek & Nutz : Der Einfluß des Gesteinaufbaus auf die Schnittgeschwindigkeit und den Meißelverschleiß von Streckenvortriebsmaschinen, Bochumer geologische und geotechnische Arbeiten, Vol.106, No.6, pp. 274-278, 1970.
- 4) 島田英樹：岩盤の機械掘削における掘削ビットの圧入挙動と掘削能率の予測に関する研究，国立国会図書館，pp.85-99, 1993.
- 5) 片岡邦郎，一色貞文：X 線回折による定量分析について，生産研究，12（8），pp.311-316, 1960.

(2016.8.5 受付)

STUDY ON EVALUATION OF CUTTER BIT WEAR FOR SHIELD MACHINE IN GRAVEL GROUND

Hiroaki YAMAMOTO, Takashi SASAOKA, Hideki SHIMADA, Koji NOGUCHI,
Yoshie OMAE and Tetsuo HATORI

It is unavoidable to have cutter bit wear during shield tunnel excavation. In recent years, because of a variety of ground conditions being excavated, problems caused by excessive cutter bit wear sometimes happen in projects. Many studies on cutter bit wear have been done in past but quantitative evaluation method of cutter bit wear in advance of excavation has not been established yet. In this paper, data are collected from an actual project where a hard gravel layer was excavated by a shield machine and the data are compared with characteristics of the excavated ground and mechanical durability of the cutter bits measured in laboratory tests.