

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

山元 寛哲^{1*}・辻本 康平²・笹岡 孝司³・島田 英樹³・野口 宏治⁴・大前 慶恵¹

¹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)

²九州大学大学院工学府 地球資源システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

³九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)

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: yamamoto.hiro@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、硬質な砂礫地盤を対象としたシールド実施現場において、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、シールドマシンカッタービットの摩耗評価に関して検討を行った。

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

1. はじめに

昨今のインフラ（トンネル）整備においては、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、シールドマシン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、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、過去の実績に基づいて予測しているのが実情である。その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摩耗しやすいことを表す。過去の施工実績に基づいたマシン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



シールドマシン カッタービット

図-1 シールドマシンカッタービットの摩耗

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 ($\times 10^{-3} \text{mm/km}$)		
			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

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、これらが想定外摩耗・施工トラブルの一要因とも考えられる。

そこで本研究では、硬質な砂礫地盤を対象としたシールド実施現場において、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、シールドマシンカッタービットの摩耗評価に関して検討を行った。

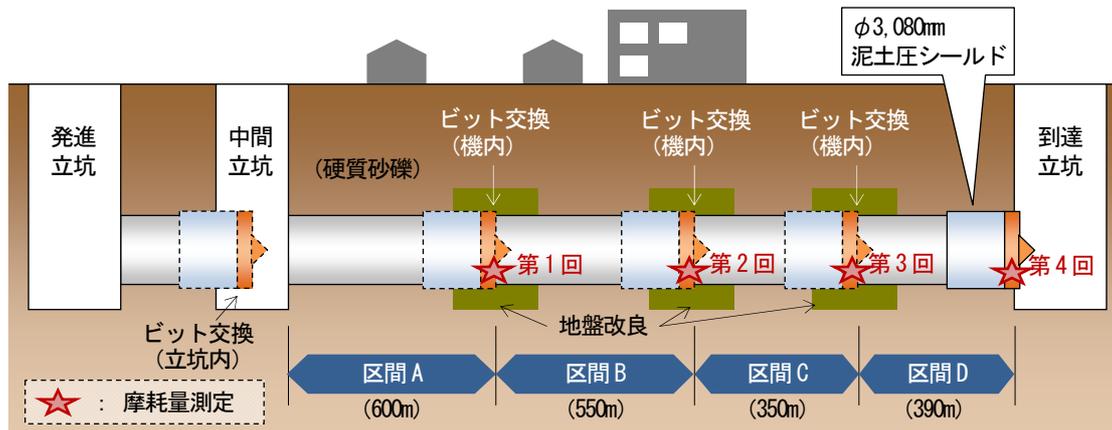


図-2 工事概要

2. 実施工でのビット摩耗実績

(1) 工事概要

対象工事は、泥土圧シールド工法により掘削外径φ3,080mm、延長約3kmのトンネルを新設するもので、地盤は硬質な礫を含有する砂礫が主体であった。本工事では途中で計4回のビット交換が計画されており、このうち1回目のビット交換を行った中間立坑から後の区間を研究対象とし、ビット交換時、立坑到達時の計4回でビット摩耗量を測定した。また、ビット交換あるいは到達までの各区間（A～D）で、それぞれ3～4地点で掘削土および礫の試料を採取し、室内試験に供した（図-2）。

(2) ビット摩耗実績

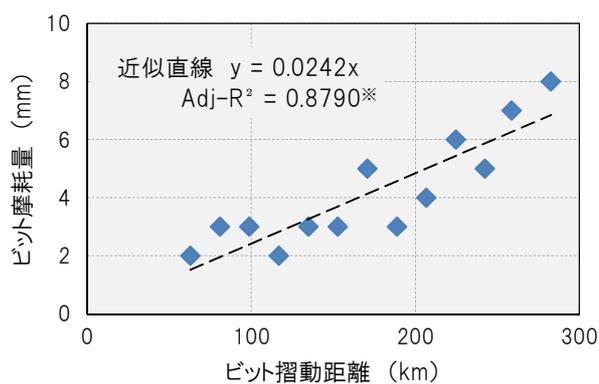
本研究では、シールドマシンに装備した数種類の Cutterビットのうち、地山の先行切削を主目的とした「先行ビット（超硬チップ：E5）」を対象とし、各区間施工後のビット摩耗量を測定した。このうち、区間B施工後の測定結果を図-3に示す。ここで、グラフの横軸はビット摺動距離であり、各ビットの取り付け位置（中心からの取り付け半径）と施工区間中のCutter総回転数から換算している。ビットの取り付け位置が外周部であるほど、このビット摺動距離は大きくなる。

図-3より、ビット摺動距離が大きいほど摩耗量は一次線形的に増大しており、Cutter外周部のビットの方が内周部に比べて摩耗量が大きいことがわかる。図-3中の近似直線の勾配が、いわゆる「ビット摩耗係数」である。区間A～Dの各区間での実摩耗量から求めたビット摩耗係数を表-2に示す。

3. 室内試験におけるビット摩耗特性の検討

(1) 地盤（礫）の物理的特性

現場から採取した礫について、一軸圧縮試験および圧裂引張試験を行って強度を測定するとともに、内部標準



※Adj-R²：自由度修正決定係数

図-3 区間B施工後のビット摩耗量測定結果

表-2 実摩耗量から求めた各区間でのビット摩耗係数

区間	A	B	C	D
ビット摩耗係数 ($\times 10^{-3}$ mm/km)	16.5	24.2	20.4	35.7

法を利用したXRD（X-Ray Diffraction）分析¹⁾を行って石英含有率を測定した。なお、比較参考として当現場以外の花崗岩、砂岩の試料についても同様に測定を実施した。また、掘削土の粒度試験を行い、対象地盤中の礫率を測定した。測定結果を表-3に示す。ここで、地点14については、対象地盤が砂礫から風化花崗岩に変化しており、強度および石英含有率は掘削土砂から採取した風化花崗岩の岩塊に対する試験結果となっている。他の地点（1～13）で採取した礫は、すべて同じ岩種（濃飛流紋岩）であった。

地盤中の礫は、上記の地点14を除くいずれの地点においても、多少のばらつきはあるものの一軸圧縮強さ200MPa程度と硬岩相当の強度を有していることがわかった。また、礫率は55%前後と比較的大きく、全区間を通してほぼ一定であった。

表-3 地盤（礫）の物理的特性

区間	A			B				C				D			(参考)	
地点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	花崗岩	砂岩
平均 UCS ^{※1} (MPa)	178.7	242.3	238.6	192.9	248.1	293.8	218.1	196.7	177.9	116.6	152.6	—	—	82.1	138.0	58.1
平均 BTS ^{※2} (MPa)	15.1	10.6	15.6	16.0	14.1	21.6	19.7	8.5	11.8	12.4	13.3	7.6	7.5	10.2	17.9	9.8
石英含有率 (%)	29.5	33.2	19.8	33.3	49.9	38.1	32.5	36.3	25.3	18.9	33.4	31.4	18.7	32.2	46.0	35.0
礫率 (%)	56.6	45.2	50.7	53.2	62.7	54.7	54.1	56.4	42.6	52.8	43.7	48.2	57.0	16.3	—	—

※1 UCS:一軸圧縮強さ ※2 BTS:圧裂引張強さ

(2) Cerchar 摩耗試験およびSchimazek 摩耗試験

カッタービットの摩耗特性を表す指標としては、地盤が有する「摩耗能」（接触する相手を摩耗させる程度）があげられる。岩石の摩耗能およびビットの摩耗性について定量的評価が可能とされている従来の試験方法としては、Cerchar 摩耗試験²⁾ と Schimazek 摩耗試験³⁾ がある。

Cerchar 摩耗試験は、適用岩石が限定されずあらゆる岩石の摩耗性を簡便に評価する方法として、フランスの石炭公社の中央研究所 Cerchar で提案された方法であり、試験用ビットに一定の荷重を作用させて供試岩石をひっかけ、その際の試験用ビットの摩耗量（幅）を指標として CAI (Cerchar Abrasivity Index) を導くものである。

$$CAI = d \times 10 \quad (1)$$

d : 試験用ビットの摩耗した平面幅 (mm)

これに対し、Schimazek 摩耗試験は、岩石の強度や鉱物組成（石英含有）に基づく硬度を考慮できる評価方法とされており、次式に示す Schimazek 摩耗係数 F を指標とする。

$$F = Q \cdot D \cdot S_t \quad (2)$$

Q : 岩石中の石英体積含有率 ($0 \leq Q \leq 1$)

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)

現場から採取した礫についてこれら2つの摩耗試験を行い、地盤中の礫の摩耗能に関する定量的評価を試みた。図-4 に Cerchar 摩耗試験結果を、図-5 に Schimazek 摩耗試験結果をそれぞれ示す。

図-4 より、礫試料の CAI は、地点1を除いてほぼ同程度の値を示し、地点別で顕著な差は認められない。比較参考の花崗岩や砂岩と比べると、おおむね花崗岩、礫試料、砂岩の順に大きい値を示した。このように、対象試料の岩種が異なる場合には CAI の値に差が見られるが、同じ岩種の礫試料では差が見られなかった。

一方、図-5 より、Schimazek 摩耗係数 F は地点別で顕著な差が認められ、花崗岩、礫試料、砂岩の順に大きい値を示した。鉱物組成に基づく硬度を考慮する Schimazek 摩耗係数は、同じ岩種でも石英含有の程度によってその値に差が出ると考えられる。

(3) 旋盤摩耗試験

3. (2) の試験結果を踏まえ、礫試料を用いた旋盤摩耗試験を実施し、礫の物理的特性や摩耗能 (CAI および Schimazek 摩耗係数 F) とビット摩耗量との関係について比較検討を行った。試験は、旋盤チャックで試料を固定し、上方側面に試験用ビットを重錘で押し付けながら試料を所定時間回転させビットの質量減少量を測定した。ここで、試料の回転速度は実施工でのカッター外周部のビット摺動速度を、重錘の押し付け力は掘進時のシール

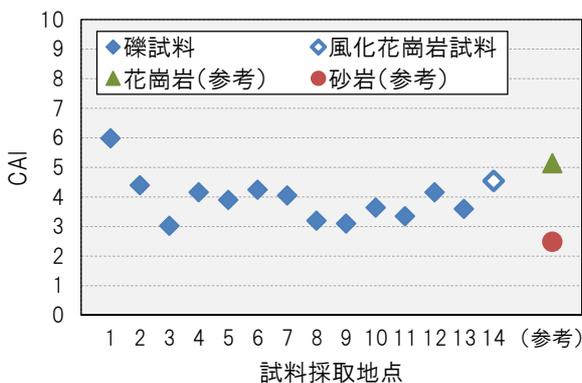


図-4 Cerchar 摩耗試験結果

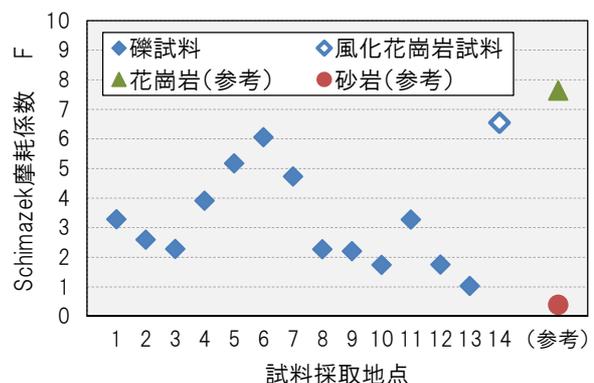


図-5 Schimazek 摩耗試験結果

ドマシンの実推力を基準に設定した。試験用ビットの材質は、実際の超硬チップよりも軟らかくビットの母材に使用されている中空鋼鋼材SKC24とした(図-6、表-4)。

まず、礫の物理的特性である強度と、旋盤摩耗試験によるビット摩耗量との関係を検証した。図-7に一軸圧縮強さとビット摩耗量との関係を、図-8に引張強さとビット摩耗量との関係をそれぞれ示す。これらより、岩種が同じ礫試料では、強度とビット摩耗量の間にある程度の相関性が見られる。しかし、同じ現場(地点14)で採取した風化花崗岩や、比較参考の花崗岩、砂岩といった異なる岩種については、相関性が見られない。この結果から、ビットの摩耗性を評価するための指標としては礫の強度のみでは不十分であり、強度以外の物理的特性をあわせて考慮する必要があると考えられる。

次に、礫の摩耗能を示すCAI およびSchimazek摩耗係数Fと、旋盤摩耗試験でのビット摩耗量との関係を検証した。図-9にCAIとビット摩耗量との関係を、図-10にSchimazek摩耗係数Fとビット摩耗量との関係をそれぞれ示す。図-9では、CAIとビット摩耗量との間に明確な相関性はない。岩種ごとの比較では摩耗性指数の大きい岩種の方が摩耗量も大きいという傾向が見られるものの、同じ岩種の試料に対してはCAIの値がほぼ同程度となり摩耗特性の評価が難しいことがわかる。一方、図-10を見ると、岩種に関わらずSchimazek摩耗係数Fとビット摩耗量との間に強い相関が認められる。

以上の結果より、砂礫地盤におけるビットの摩耗特性の差異を評価するには、礫の強度と硬度の両方を考慮するSchimazek摩耗係数の適用が有効であると考えられる。

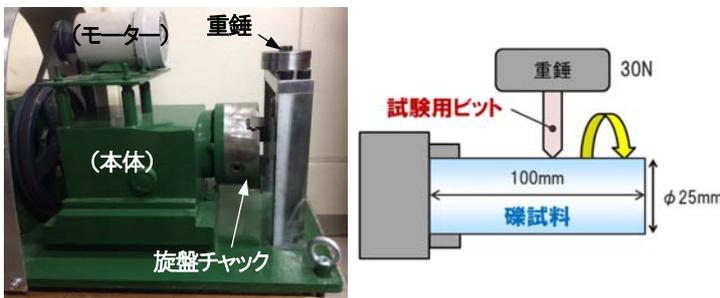


図-6 旋盤摩耗試験装置の概要

表-4 旋盤摩耗試験条件

供試体	ビット材質	試料 回転速度 (rpm)	ビット 摺動距離 (m)	重錘重量 (N)
礫試料	中空鋼 鋼材 SKC24	260	33,66,120	30
花崗岩			120	
砂岩			120	

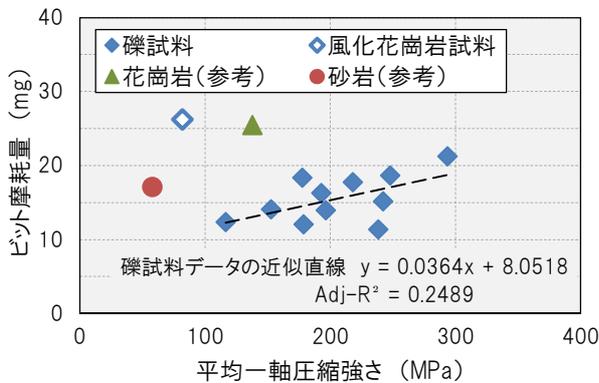


図-7 一軸圧縮強さと旋盤摩耗試験でのビット摩耗量との関係

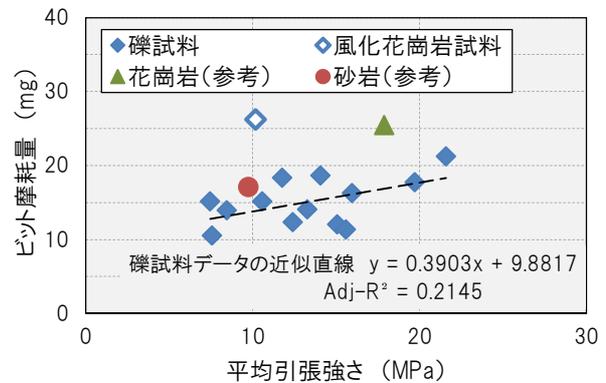


図-8 引張強さと旋盤摩耗試験でのビット摩耗量との関係

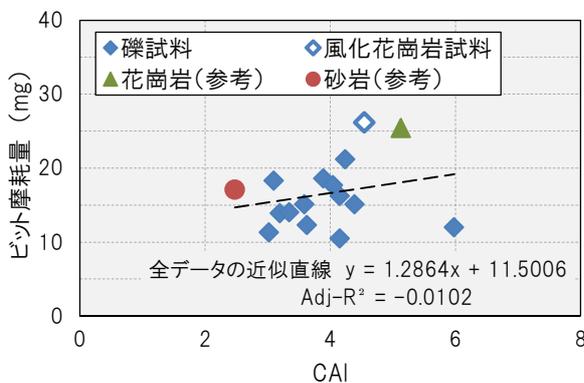


図-9 CAIと旋盤摩耗試験でのビット摩耗量との関係

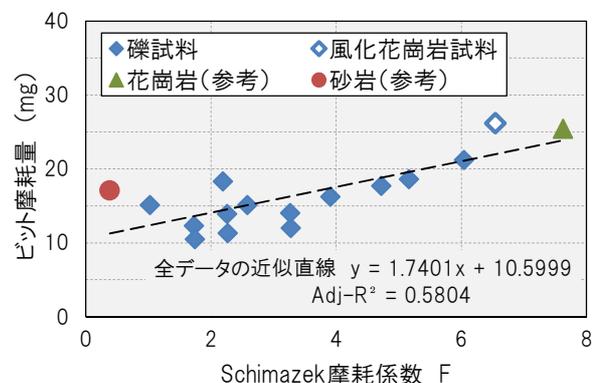


図-10 Schimazek摩耗係数Fと旋盤摩耗試験でのビット摩耗量との関係

4. ビット摩耗実績と室内試験結果との比較検討

3. (3) の旋盤摩耗試験結果について、ビット摺動距離とビット摩耗量との関係を区間ごとに整理したものを図-11 に示す。ここで、図中の近似直線の勾配がビット摩耗係数である。また、実施工におけるビット摩耗量について、摺動距離と実摩耗量の関係を整理したものを

図-12 に示す。なお、2. (2) に示したビット実摩耗量は超硬チップの摩耗高さ (mm) であったが、ここでのビット実摩耗量は摩耗高さから換算したビット1個当りの超硬チップの質量減少量 (g) としている。

さらに、図-11 から求まる旋盤摩耗試験での平均ビット摩耗係数と、図-12 から求まる実施工でのビット摩耗係数との比較を表-5 および図-13 に示す。図-13 を見る

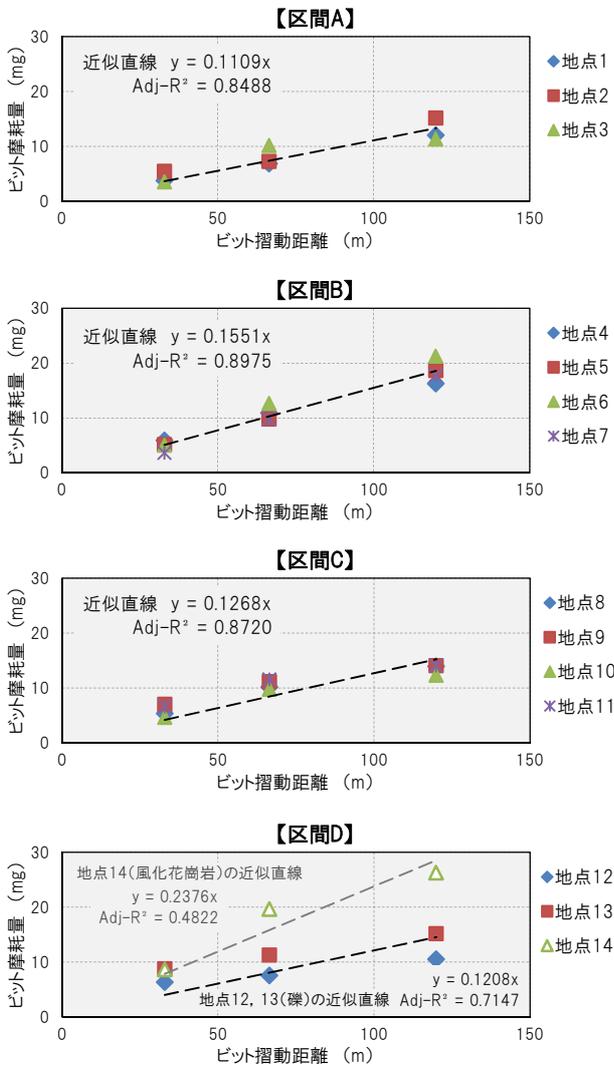


図-11 旋盤摩耗試験でのビット摩耗量測定結果

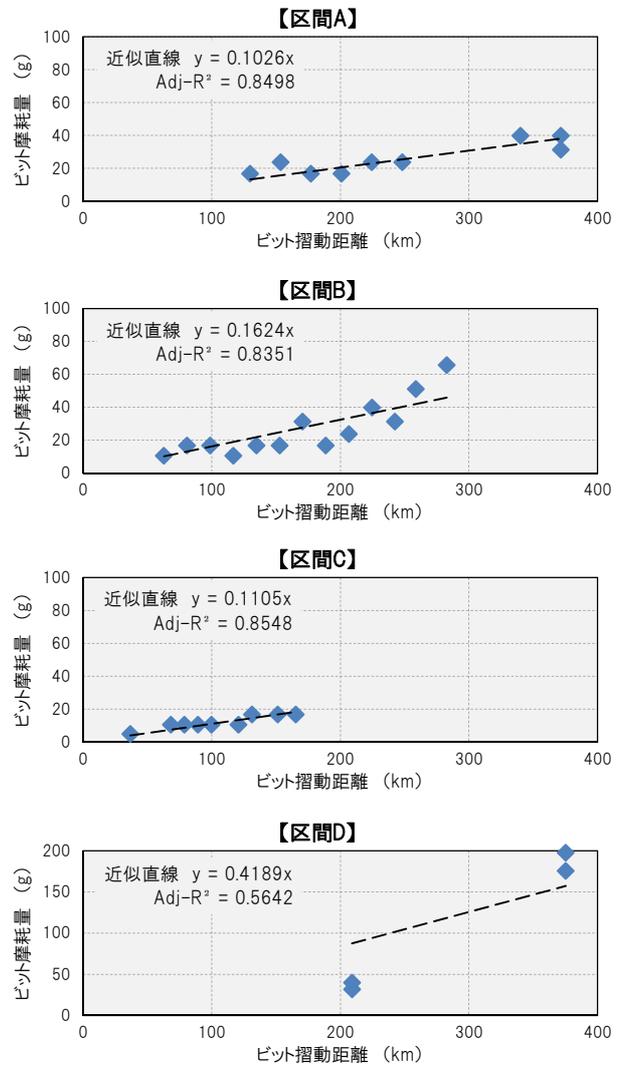


図-12 実施工でのビット摩耗量測定結果

表-5 旋盤摩耗試験と実施工でのビット摩耗係数の比較

区間	A	B	C	D
旋盤摩耗試験での平均ビット摩耗係数 ($\times 10^{-3} \text{mg/m}$)	11.1	15.5	12.7	180*
実施工でのビット摩耗係数 ($\times 10^{-3} \text{g/km}$)	102.6	162.4	110.5	418.9

*礫での試験結果 ($12.1 \times 10^{-3} \text{mg/m}$) および岩塊での試験結果 ($23.8 \times 10^{-3} \text{mg/m}$) に対して、現場管理実績より砂礫の区間長：風化花崗岩の区間長=1：1で考慮し、平均値とした。

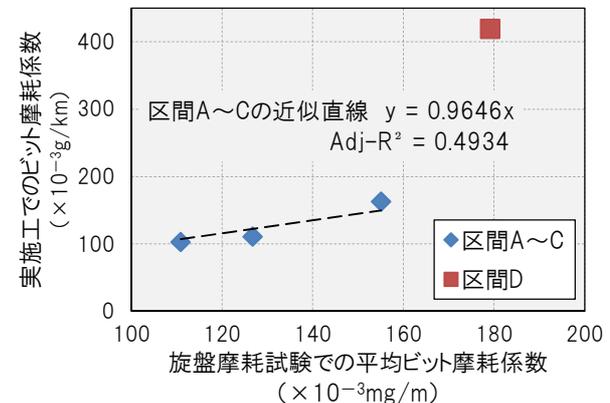


図-13 旋盤摩耗試験と実施工でのビット摩耗係数の比較

と、区間A～Cにおいては旋盤摩耗試験結果と実施工でのビット摩耗量との間に強い相関が認められる。ここで、旋盤摩耗試験の結果は、前出 3. (3) のとおり礫の強度と硬度を考慮したSchimazek摩耗係数と強い相関があった。これより、ビットの実摩耗量はSchimazek摩耗係数とも相関性が高いと言える。つまり、砂礫地盤を対象としたシールド掘進におけるカッタービットの摩耗は、地盤中の礫が有する摩耗能に依存すると考えられる。なお、対象地盤が砂礫から風化花崗岩に変化した区間Dについては、区間A～Cと連係した相関は認められなかった。

5. まとめ

硬質な砂礫地盤を対象としたシールドマシンカッタービットの摩耗について、各種室内試験や現場実測をもとにその摩耗特性や定量的摩耗評価に関する検討を行った。

その結果、硬質な砂礫地盤では、ビット摩耗は礫が有する摩耗能に依存し、その摩耗特性は礫の強度と硬度の両方を考慮するSchimazek摩耗係数と相関性が高いことがわかった。これにより、礫のSchimazek摩耗係数からカッタービットの摩耗量を予測できると考えられる。

6. 今後の展開

今回の研究対象は硬質な砂礫地盤であったが、礫率や礫の強度が工事区間全体にわたってほぼ一様であった。また、地盤が砂礫から風化花崗岩へ変化した区間Dについては、他との相関性を確認することができなかった。

今後より的確にビット摩耗量を予測するためには、様々な地盤条件での実施工データや室内試験データを蓄積していく必要がある。

現在、砂礫地盤や岩盤を掘削する複数のシールド現場を対象に、今回と同様の検討を行い研究を継続している。

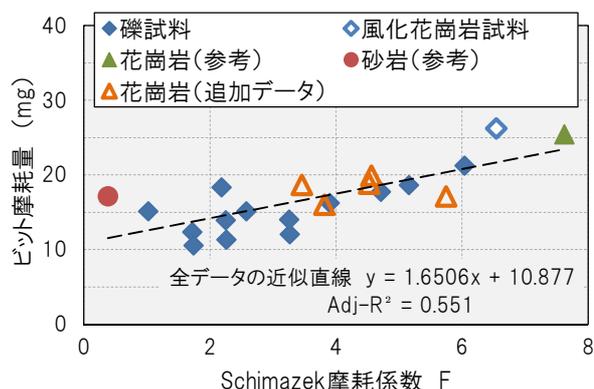


図-14 Schimazek摩耗係数 F と旋盤摩耗試験でのビット摩耗量との関係 (岩盤現場のデータを追加)

このうち、岩盤（花崗岩）の現場で採取した掘削岩塊試料について、室内試験を行って前出 図-10 と同様に Schimazek 摩耗係数 F と旋盤試験でのビット摩耗量との関係の検証を試みた (図-14)。その結果、礫と岩塊の違いに関わらず Schimazek 摩耗係数とビット摩耗量との間には引き続き強い相関が認められ、岩盤におけるビット摩耗性評価にも Schimazek 摩耗係数の適用が有効である可能性が高いことを確認できた。

これら対象現場はまだ施工中であるが、引き続き研究を進め、礫率や強度、土質の相違による摩耗特性への影響等についてさらに検討を深めていく所存である。

参考文献

- 1) 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
- 2) Michael Alber et al: 47nd Rock Mech Rock Eng, pp.61-266, 2014
- 3) Schimazek et al: Gluckauf, Vol.106, pp.5-278, 1970

STUDY ON QUANTITATIVE EVALUATION OF CUTTER BIT WEAR FOR SHIELD MACHINE

Hiroaki YAMAMOTO, Kohei TSUJIMOTO, Takashi SASAOKA, Hideki SHIMADA, Koji NOGUCHI and Yoshie OMAE

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.