

シャークビット工法 シールド長距離施工技術の開発 カッタービットを無制限に交換

原 修一¹・野元 義一¹・小林 暁²・林 友幸²・小田 実³

¹正会員 五洋建設株式会社 技術研究所（〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町1534-1）

²JFE 日本鋼管株式会社 総合エンジニアリング事業部（〒230-8611 横浜市鶴見区末広町2-1）

³JFE 日本鋼管株式会社 重機営業部（〒230-8611 横浜市鶴見区末広町2-1）

本工法は、社会資本整備に欠かす事のできないシールド工事において、ますます増える見込まれる長距離施工シールド機のカッタービットを摩耗や土質の変化に対応して、迅速かつ安全にまた何回でもサメの歯が生え替わるように交換できる工法であり、コストの縮減・工程の短縮・安全性の向上を実現して長距離施工や大深度施工に大きく貢献するものである。

キーワード:シールド掘進機, 長距離, 大深度, カッタービット交換, 摩耗検知

1. はじめに

近年、シールドトンネル工事で立坑築造に関わるコスト縮減や、都市部において立坑用地の確保が困難であるといった理由からシールドトンネル延長が2,000m, 3,000m, またそれ以上の長距離化が図られている。さらに、平成13年4月施行の『大深度地下の公共的使用に関する特別措置法』により、地下30～40m以上の大深度シールドトンネルが増加することが見込まれ、立坑築造における経済性・安全性などを考慮してますます長距離化が進むものと思われる。

長距離施工においては、シールド機のカッタービットの摩耗量も増大し、許容摩耗量を超えたカッタービットは交換が必要になる。また、掘削地山の土質の変化に対しては効率良く掘削できる形状および材質のカッタービットに交換して掘進する必要がある。

カッタービットの交換方法には、切羽周辺に地盤改良等を施した後、人が切羽に出て交換を行ったり、交換用立坑を築造して交換する人的交換方法と、シールド機に取り付けた特殊な機械装置により行う機械的交換方法等がある。人的交換方法においては高コスト・長期間の工期・危険作業といった問題があり、機械的交換方法においてもコストの増大・交換回数に制限がある・ビットの形状、材質を自由に選択できない等の問題があった。

本工法は、これまでの人的交換方法と機械的交換方法の諸問題を解決し、低コスト・短時間・安全施工を実現する機械的カッタービット交換工法である。

2. 工法の概要

本工法に使用するカッタービットは、1個づつが単体で構成されており（写真-1参照）、カッター装置中心部のカッタービット挿入ボックスに交換用カッタービットを1個づつ挿入しカッタースポークに押し込むことにより、摩耗した外周側のカッタービットを外側に押し出すという簡便な機構でカッタービットの摩耗による交換や、掘削土質の変化に対応してカッタービット形状・材質の変更にも簡単に対応できる。比較的摩耗の少ないフィッシュテールのセンタービットは、摩耗した分だけ前方に押し出すことで再生する。

掘進時のカッタービットは、カッタースポーク内の固定ガイドと固定板でしっかり固定しているため、カッタービット個々のズレやガタツキが無く掘削に影響を与えない。

また、押し出されたカッタービットの摩耗計測・状態確認を行いたい場合は、予めカッタービット回収装置を取り付けておけば回収することも可能になる。

3. 工法の特長

(1) 大幅な経済性の向上

ビット交換のための立坑築造や地盤改良が不要であり、簡便な機構で迅速にビット交換ができるため工期短縮と大幅なコスト縮減が図れる。

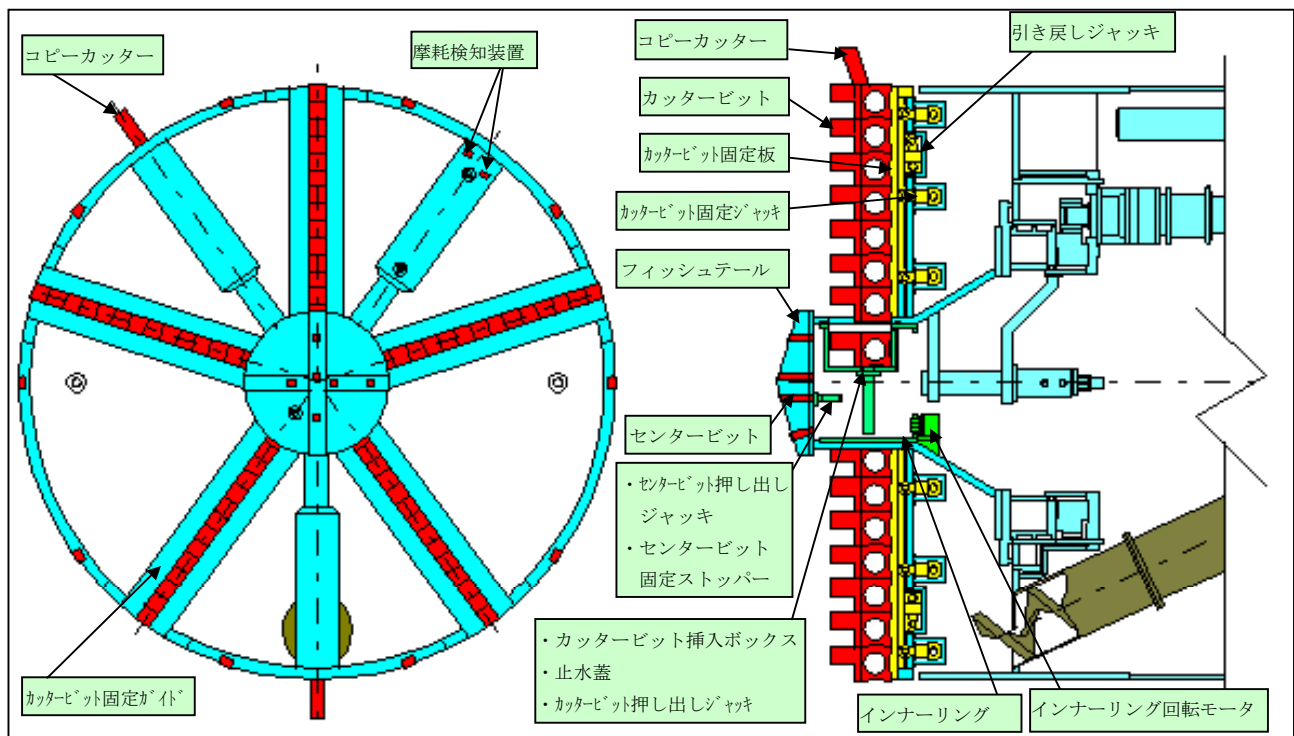


図-1 シャークビット工法の機構 (5本スポークの場合)

(2) 容易なビット交換

摩耗によるビット交換はもとより、掘削地山の土質に合わせたビットの選択変更が容易にできる。

(3) 安全性の確保

切羽作業、高所作業、狭隘箇所での溶接・溶断作業等の危険作業が無いため安全性に優れている。

(4) 周辺環境に優しい

ビット交換のための場所や時期の制約がなく占用地の確保が不要であり、交通渋滞や振動騒音が発生せず近隣住民に迷惑をかけることがない。

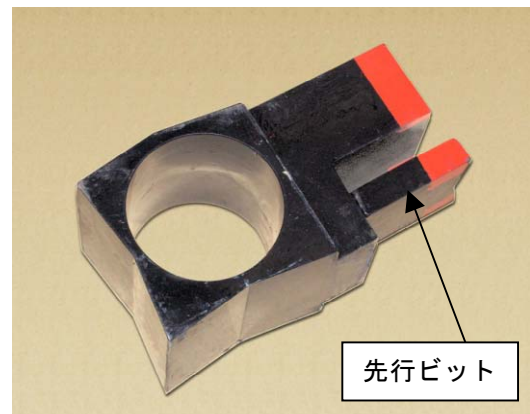


写真-1 カッタービット単体

4. 工法の機構とカッタービット交換手順

(1) 機構

本工法の機構は、図-1 に示すように、カッタービット交換機構として、「インナーリング・インナーリング回転モータ」「カッタービット挿入ボックス・止水蓋」「カッタービット押し出しジャッキ」「カッタービット固定板・固定ジャッキ」「カッタービット固定ガイド」「摩耗検知装置」から構成されている。カッタービットは、写真-1 に示すように山型の凹凸によりカッタービット同士や固定板と嵌合する形状をしている。切削パス数はスポーク毎にカッタービットを上下反対に挿入することにより複数パス切削が可能となる。

フィッシュテールのセンタービット再生機構は、フィッシュテール内に貫通した長尺ビットを摩耗した分だけ押し出す「センタービット押し出しジャッキ」と「センタービット固定ストッパー」から構成

される。

また、本工法の適用径は、 $\phi 3.0\text{m}$ 以上である。

(2) カッタービット交換手順

カッタービット交換手順は、図-2 に示すように以下の①～⑤の手順で行う。

- ① インナーリングをスポーク間位置に停止させ、カッタービット挿入ボックス内に新しいビットをセットし止水蓋を閉める。
- ② ビット交換したいスポークの位置にインナーリングを回転させる。
- ③ カッタービット押し出しジャッキで新しいビットをスポークの内周側から外周側へ押し出す。このとき、ビットの押出量はビットとシールド機の縁切りのため、数センチ多めに押し出す。
- ④ 新しいビットを押し出すことにより最外周のビ

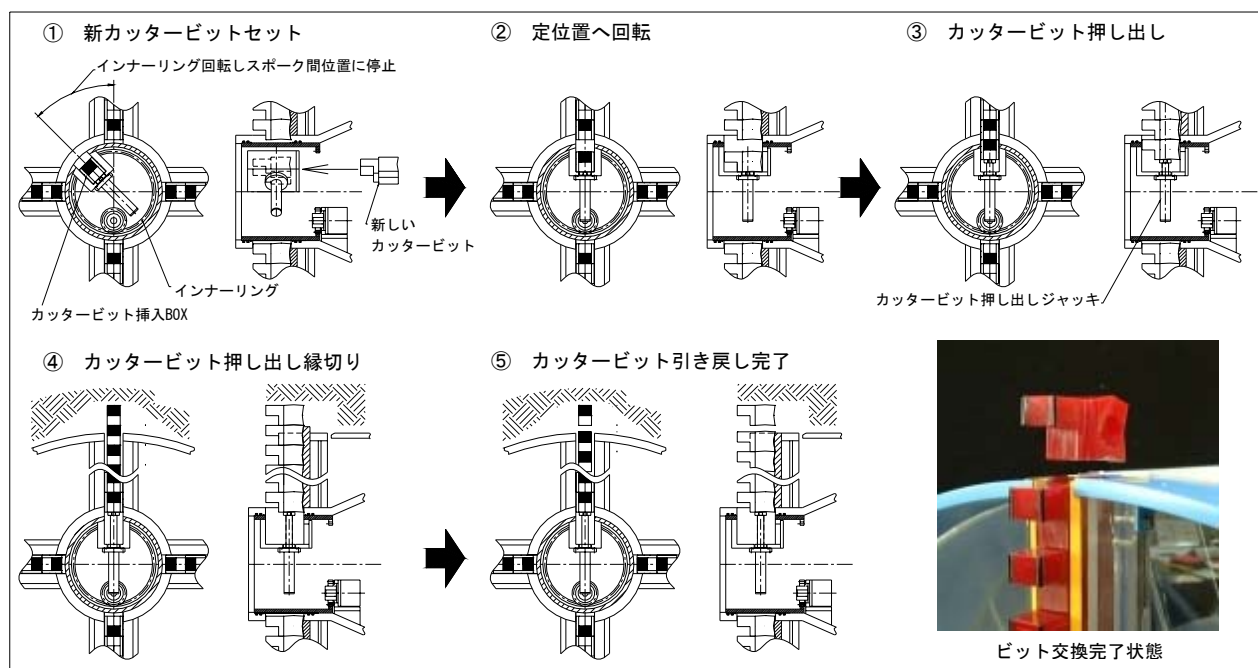


図-2 カッタービット交換手順

ットを地山中へ押し出し、シールド機と縁を切る。

- ⑤ 縁切りが完了したら、余分に押し出した量を引戻しジャッキにより引き戻し、カッタービット固定板でビットを定位置に固定する。

フィッシュテールのセンタービット再生手順は、図-3のように①再生したいビットの位置にセンタービット押し出しジャッキをセットし、②フィッシュテール内に貫通したビットを摩耗した分だけジャッキで押し出して再生する。

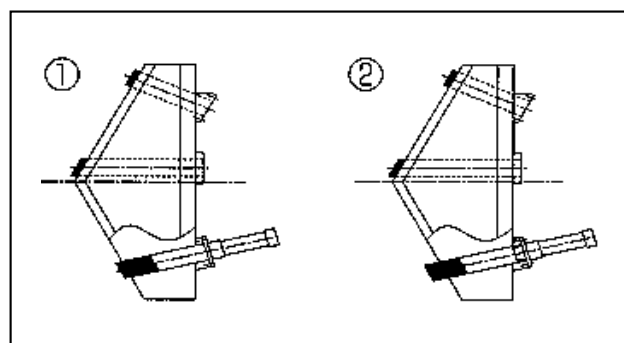


図-3 センタービット再生手順

5. カッタービットの固定力、押出力

本工法では、機構上、主として

- (1)掘進時のカッタービット固定板押付力
(2)カッタービット押出時の押出力
が検討事項となる。

掘削中またはカッタービット交換時にはスポークの位置が上下左右様々考えられるが、ここではビット自体にかかる重力が最大となるスポークが上方向を向いている状態でのカッタービット固定板押付力およびカッタービット押出力の計算方法、計算例を示す。

(1)掘進時のカッタービット固定板押付力の計算

掘削時にビットに働く力は、表-1 および図-4 に示すように、ビットの重量・掘削反力・固定板押付力・固定板摩擦力となる。カットヘッド回転力による遠心力およびビット固定ガイド摩擦力も作用しているが微小な力であるため、ここでは考慮しない。

表-1 ビットに働く力

シールド機 の状態	ビット 重力 f1	地山への 押し出し 抵抗 f4	掘削 反力 F2	遠心力	カッタービット 固定板		ビット 固定ガイド 摩擦力 f2
					押付力 F1, Fw	摩擦力 Fb, f3	
掘削時	○	-	○	-	○F1	○Fb	-
ビット交換時	○	○	-	-	○Fw	○f3	○

掘進時のカッタービット固定板押付力 $F1$ (kN) は、式(1)で表せる。

$$F1 = Nb \times (Fb + F2) \quad (1)$$

ここで各記号は、

- Nb (個) : スポーク内ビット個数
 Fb (kN) : ビットと固定板の摩擦抵抗
 $F2$ (kN) : 掘削反力

である。

ビットと固定板の摩擦抵抗は、凸凹で嵌合していることからクサビの摩擦力¹⁾より算出する。

(2)カッタービット押出時の押出力の計算

ビット交換時にビットに働く力は、表-1 および

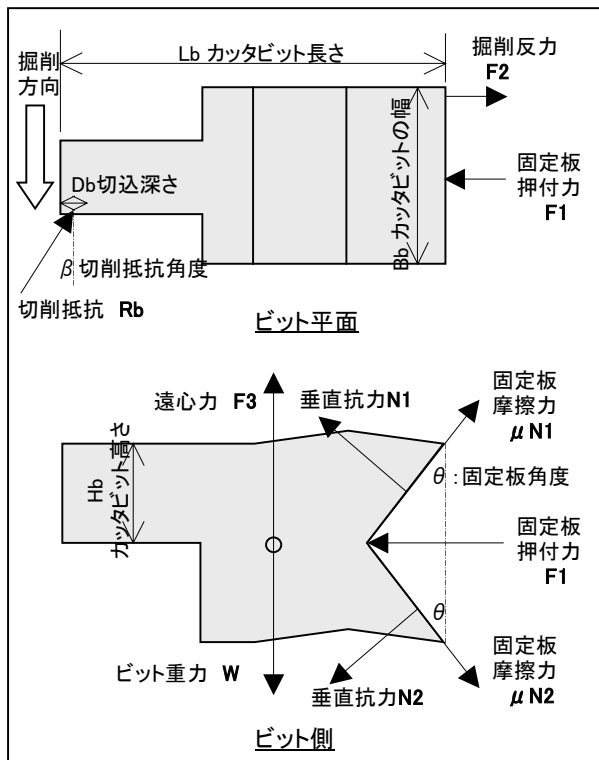


図-4 掘削時にビットに働く力

図-5 に示すように、ビットの重量・地山への押出抵抗・固定板押付力・固定板摩擦力・ビット固定ガイドとの摩擦力である。ただし、掘削中にはビット交換を行わないので、押出ジャッキの装備を小さくするためカッタービット交換時には固定板押付力をカッタービットがスポーク内を自然落下しない限界値（ビット落下限界）に低減した押付力 F_w とする。カッタービット押出時の押出力 F_a (kN) は、式(2)で表せる。

$$F_a = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \quad (2)$$

ここで各記号は、

- f_1 : ビット押上重力
- f_2 : ビットと固定ガイドの摩擦抵抗
- f_3 : ビットと固定板の摩擦抵抗
- f_4 : 地山への押出抵抗

である。

(3) ビットの固定力および押出力算出例

本工法において、シールド機の条件を表-2 に示すように、 $\phi 3.5$ m, $\phi 5.0$ m, $\phi 7.0$ m の 3 種類とし、カッタービットの条件を表-3 に示すように重量 254N とした場合のビットの固定力および押出力の算出例を示す。なお、土質は粘性土より条件が厳しい砂質土地盤を想定し、地山貫入抵抗を 44N/cm^2 とする。安全率は、装置の小型化を考慮し、1.5 とする。

上記の条件により必要なビット固定板押付力の算出した結果、安全率を見込んでも表-4 に示すように 16~47kN (スポーク 1 本当たり) の押付力で

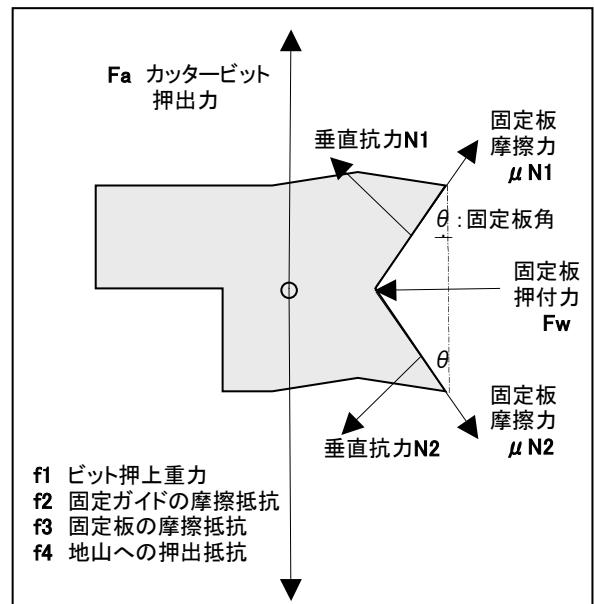


図-5 ビット交換時にビットに働く力

表-2 シールド機条件

外径	D(m)	3.5	5.0	7.0
掘進速度	V(mm/min)	35	30	30
カット回転数	n(min-1)	1.7	1.0	0.7
ビット个数	Nb(個/スポーク)	8	13	19
地山貫入抵抗	Wk(N/cm ²)	44	44	44

表-3 カッタービット条件 (1 個あたり)

重量	長さ	幅	高さ(切削部)
N	mm	mm	mm
254	293	139	80

表-4 ビット固定力算出結果

外径	D(m)	3.5	5.0	7.0
掘削反力	F2(kN)	0.764	0.89	1.059
ビットと固定板の摩擦抵抗	Fb(kN)	0.56	0.56	0.56
安全率	α	1.5	1.5	1.5
固定板押付力	F1(kN)	16	29	47

表-5 ビット交換時固定板押付力

外径	D(m)	3.5	5.0	7.0
ビット交換時				
固定板押付力	Fw(kN)	6.9	11.3	16.5
ビット				
押上重力	f1(kN)	2.286	3.556	5.08
固定ガイド				
摩擦抵抗	f2(kN)	1.035	1.688	2.475
固定板				
摩擦抵抗	f3(kN)	3.130	5.103	7.485
地山への				
押出抵抗	f4(kN)	11.788	11.788	11.788
安全率	α	1.5	1.5	1.5
ビット				
押出力	fa(kN)	27.4	33.3	40.3

掘削可能である。また、必要なカッタービット押出力は表-5 に示すように 27～41kN であり、大きな設備を必要とせず本工法が成立する。

6. 実証実験

本工法におけるカッタービット固定板押付力およびカッタービット押出力の関係を把握するために、写真-2 に示す実証実験機（シールド外径φ3.5m 相当）を作製し実証実験を行った。

実験機の寸法は、幅 3080mm、奥行 1850mm、高さ 2855mm、スポーク内ビット数 8 個、ビット寸法縦 139mm、横 293mm、高さ 160mm、ビット重量 254N とした。

実験により、カッタービット固定板の押付力に対するカッタービット押出力の関係を把握した。図-6 に

- ① 実験値（グラフ●）
- ② 地山への押出抵抗を考慮した実験値（グラフ▲）
- ③ 地山への押出抵抗を考慮した計算値（グラフ○）

を示す。③の値は、シールド機外径φ3.5m を想定して式(2)によって算出した。

実験結果より、式(2)による計算値は、実験値に地山への押出抵抗を加えた値より大きな値となっている。また、傾きもほぼ一致していることから、土質条件等を十分に考慮したうえで、式(2)によってカッタービット押出ジャッキの設計が可能（安全側）であることが確認された。

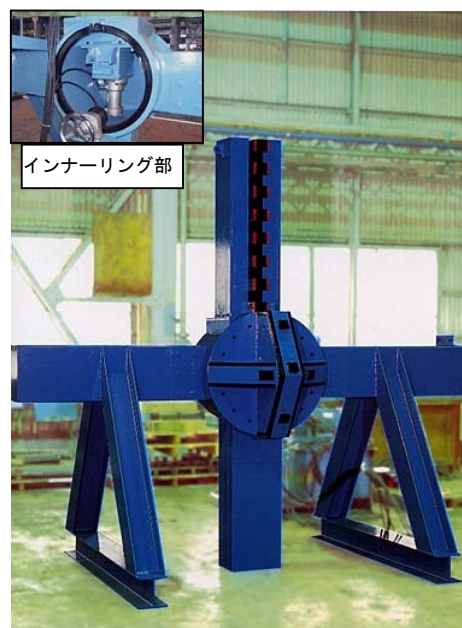


写真-2 実証実験機外観

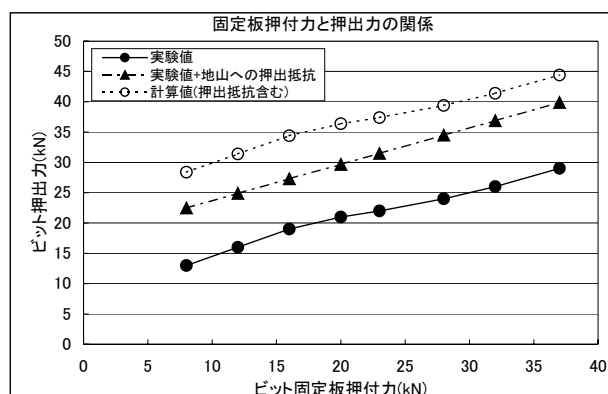


図-6 実証実験結果

7. カッタービットの摩耗と交換

(1) カッタービットの摩耗の要因

カッタービット摩耗に係わる検討事項としては、掘進延長はもちろんとして、掘削土質、シールド機種別およびカッタービット材質等が挙げられる。

カッタービットの寿命は、刃先に取り付けられた超硬チップの摩耗に加え、欠損・剥離脱落により、その寿命が決まってくるが、欠損や剥離脱落は、何らかの障害物や礫との衝突等による外的要因であり、予測しがたい要因といえる。

摩耗についても施工実績から導かれた摩耗係数から算出するものであるが、カッタービットの取付位置・形状・大きさ・数量、泥水や加泥材の状況、土質の差異といったさまざまな条件から、実際には計算値とは異なることがあるため注意が必要である。また、カッタービットの一般的な許容摩耗量は、15mm から 20mm である。

(2) カッタービットの摩耗計算

カッタービットの摩耗量 δ (mm) は、式(3)によって

表-6 摩耗係数

単位: mm/km

掘削土質		粘性土	砂質土	砂礫土		
シールド機形式	*2超硬チップ材質			小礫	中礫	大礫
泥土圧式	E3	0.008	0.023	0.026	0.039	0.052
	E5	0.010	0.030	0.034	0.051	0.068
泥水式	E3	0.005	0.009	0.011	0.015	0.019
	E5	0.007	0.012	0.014	0.020	0.029

表-7 摩耗限界距離例 (φ3.5m シールド機)

※磨耗許容量 20mm とする

(単位: m)

シールド機形式		土圧式		泥水式	
掘削土質	ビット材質	E3	E5	E3	E5
粘性土		3,901	3,121	6,241	4,458
	砂質土	1,357	1,040	3,467	2,601
礫質土	小礫	1,200	918	2,837	2,229
	中礫	800	612	2,080	1,560
	大礫	600	459	1,642	1,076

表せる。

$$\delta = (L/v) \cdot n \cdot (2 \cdot \pi \cdot r) \cdot k \quad (3)$$

ここで各記号は、

- L (m) : 掘進延長
- V (mm/min) : 掘進速度
- n (min⁻¹) : カッター回転数
- r (m) : カッタービット軌跡半径
- k (mm/km) : 摩耗係数

である。

摩耗係数は、土質、カッタービットの材質およびシールド形式によって決まる。表-6 に摩耗係数例（五洋基準値）を、表-7 に式(3)により算出した、シールド機外径φ3.5m、ビット許容摩耗量を20mmの場合のカッタービット摩耗限界距離（例）を示す。

(3) 超硬チップ

超硬合金のチップは JIS 規格により、耐摩耗性と靱性を硬さ（HRA）と杭折力で表している。硬さと杭折力は表-8 に示すように相反する数値を示しており E3 の場合硬度は硬いが脆さがある。このように砂礫土の中礫・大礫地盤で E3 の超硬チップを採用する場合、摩耗量は少ないが欠損・欠落の無いような構造を充分検討する必要がある、粘性土・砂質土の地盤では E5 の超硬チップで充分であると言える。

表-8 超硬チップ材料比較表

	硬度 (HRA)	杭折力 (Mpa)
E 3	8 8 以上	1600
E 5	8 6 以上	2000

表-9 摩耗交換検討条件1

掘削条件		
掘削土質	使用ビット種別	摩耗係数 K (mm/km)
砂質土	E3	0.009

表-10 摩耗交換検討条件2

シールド機			仕様		
シールド形式	掘進距離 L (m)	シールド外径 D (m)	カッターヘッド外周速度 (m/min)	カッター回転数 n (min ⁻¹)	掘進速度 V (mm/min)
泥水式	10,000	5.00	16	1.02	25.0

表-11 摩耗交換検討条件3

スポーク数	ビット数	
5本	8個/スポーク	40個/機

表-12 交換パターンと交換数の関係

交換パターン	交換回数	総交換ビット数	交換にかかる総時間	ビット1個当たり交換時間	交換パターン図
全数（8個ずつ）交換	2回	80個	約1600分	約20分	図-7
4個ずつ交換 4回目のみ3個交換	4回	75個	約1500分	約20分	図-8
2個ずつ交換 7回目のみ1個交換	7回	65個	約1300分	約20分	図-9

(4) カッタービットの交換検討

本工法は、カッタービットの交換を任意の時期に設定できるため、

- a) 摩耗検知装置によりカッタービットの摩耗が確認されたとき
- b) 土質が変化したとき
(土質に対応したカッタービットに交換)
- c) カッタービットが欠損・剥離脱落したと確認されたとき
(排土にビットが混入していたり、掘削トルクが通常より上昇したとき)

にビットの交換を行う。

また、あらかじめ計算した摩耗予測をもとに、最適な交換サイクルを判断し、経済的なカッタービットの交換計画を立てることができる。交換計画は、本工法用の「ビット摩耗自動計算ソフト」を使用して簡便に行うことができ、摩耗検知装置によって実施工時のカッタービット摩耗量と予測値が異なる場

合も摩耗係数を修正し、新たに交換計画を立て直すことも可能である。

ここで実際にシールド機外径φ3.5mで砂質土を10,000m掘削する場合（表-9、表-10、表-11）の検討を行う。

検討結果（表-12）から交換パターンによって交換するカッタービットの総数と交換回数および交換にかかる総時間が変化することがわかる。

交換作業は1個あたり約20分で簡単に完了するため、カッタービット交換数の少ない方法が経済的に有利な方法であるが、本工法は・交換回数・交換個数・交換時期が自由に選べるため、現場の施工条件・掘削条件によって最適な交換パターン（図-7、図-8、図-9 参照）を選択することが出来る。

従来の人的交換によってカッタービットの交換を行う場合、図-7 の様に全数交換が前提になるため一定の掘削長に対して総交換ビット数を減らすことは困難である。

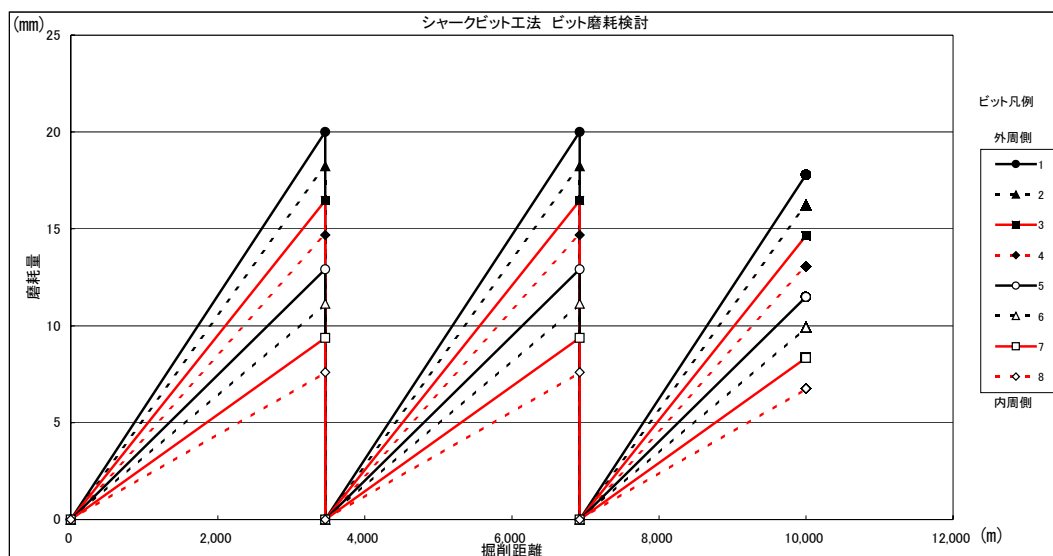


図-7 交換パターン 1 (全数交換)

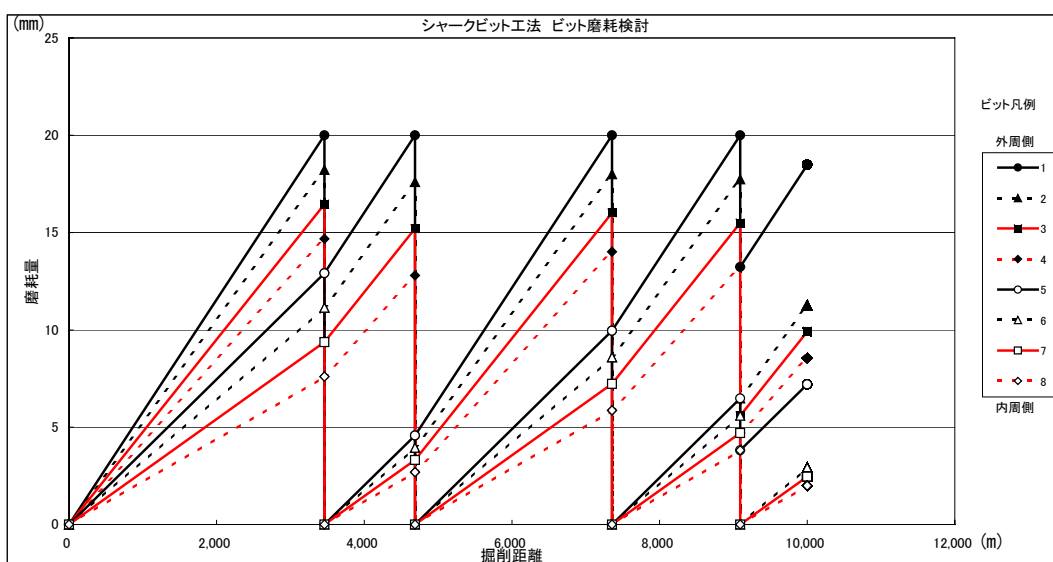


図-8 交換パターン 2 (4 個ずつ交換, 4 回目の交換は 3 個交換)

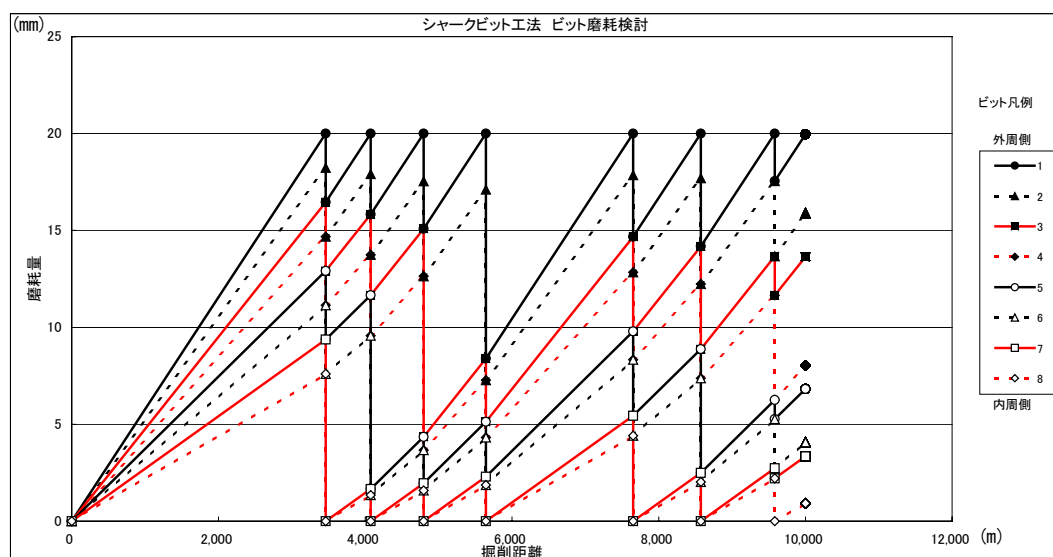


図-9 交換パターン 3 (2 個ずつ交換, 7 回目の交換は 1 個交換)

8. 本工法の効果

本工法は、シールドトンネルの長距離化、大深度化にむけて開発した工法であり、今後の都市再生事業に絡む長距離トンネルや、大深度トンネルなどに経済性・安全性に優れた有効な工法である。

φ3.5mクラスのシールド機の試算によれば、本工法は、従来の「地盤改良を施し、人が切羽に出てカッタービットを交換する工法」と比較して、

- ・ 経済性（従来工法の32%（68%減））
- ・ 工期（従来工法の7%（93%減））
- ・ 安全性（人が切羽に出る必要が無くシールド機内で操作可能である）

という効果がある。

9. おわりに

最後に、ご意見・ご指導をいただいた関係各位の皆様方ならびに、開発に携わった協力会社の方々に心からお礼を申し上げるとともに今後共ご指導・ご鞭撻よろしくお願い致します。

参考文献

- 1) 機械工学便覧 5章 5.3.2
- 2) トンネル標準示方書〔シールド工法編〕・同解説