

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できるシャークビット工法 -

原 修一* 松岡 義治*

要 旨

本研究は、国土交通省等で実施している公共工事コスト縮減施策のなか、工事コストの縮減・工事の時間的コストの低減・工事中の安全対策等への対応を目的として開発を進めた。

シャークビット工法は、厳しい財政事情の下で推進する社会資本整備に欠かすことのできないシールド工事において、シールド掘進機のカッタービットを摩耗や土質の変化に対応して、迅速かつ安全に何回でもサメの歯が生え替わるように交換でき、長距離施工や大深度施工に大きく貢献する技術である。本編では、本工法の検討や実験を通して実証した、機構・機能および工法の優位性について報告するものである。

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、特に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 1 日施行の『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への需要が高まり、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、シールド掘進機のカッタービットの摩耗量が増大し、許容摩耗量を超えたカッタービットは交換が必要となる。また、通過土層の変化に対して効率良く掘削できる形状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、切羽に地盤改良等を施した後、人が切羽に出て行う交換方法や立坑を築造して交換する人的交換方法、シールド掘進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機械的コストが増大するものや、摩耗・土質への対応性に劣るものがある。本工法は、それらの諸問題を解決する工法として開発を行った。

1. 工法の概要

本工法は、交換用カッタービットを挿入ボックスから 1 個づつカッタースポークに挿入することにより、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何回でもカッタービットの交換ができる。摩

耗だけでなく掘削地山の地質の変動によるカッタービット形状・材質の変更にも簡単に対応できる経済性と施工性に優れた交換工法であり、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方式を採っている。

掘進時のカッタービットは、固定ガイドと固定板でしっかり固定しているため、カッタービットのズレやガタツキも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は、カッタービット回収装置を取り付けることにより回収することも可能となる。

2. 工法の特長

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の短縮と大幅なコスト縮減が図れる。

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。

3. 工法の機構

本工法の機構を、図 - 1 に示す。また、各部の機能は、インナーリング・インナーリング回転モーターインナーリングは、中空センターシャフトと二重構造になったリングであり、シール構造効果により止

*技術研究所

水性を確保する。インナーリング回転モータは、交換用カッタービットを挿入セットする止水位置とカッタービットの押し出し位置にインナーリングを回転させるためのモータである。

カッタービット挿入ボックス

交換時に、止水位置で交換用カッタービットを挿入セットするボックスであり、インナーリング内側に取り付けている。カッタービット押し出し時は、止水蓋を開けて止水性を確保する。

カッタービット押し出しジャッキ

インナーリング回転モータで、押し出し位置まで回転されたカッタービット挿入ボックスから交換用カッタービットを外周側に押し出すためのジャッキであり、カッタービット挿入ボックスに取り付けている。

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板は、掘削時にカッタービットを固定する連続した山型凹凸の板であり、固定ジャッキにより固定し、ズレやガタツキを無くすとともにカッタービットの抜けだしを防止している。

カッタービット固定ガイド

カッタービットの交換押し出し時のレールであり、掘進時はカッタービットが推力により後方に押し出されたりズレたりしないためのガイドである。

カッタービット

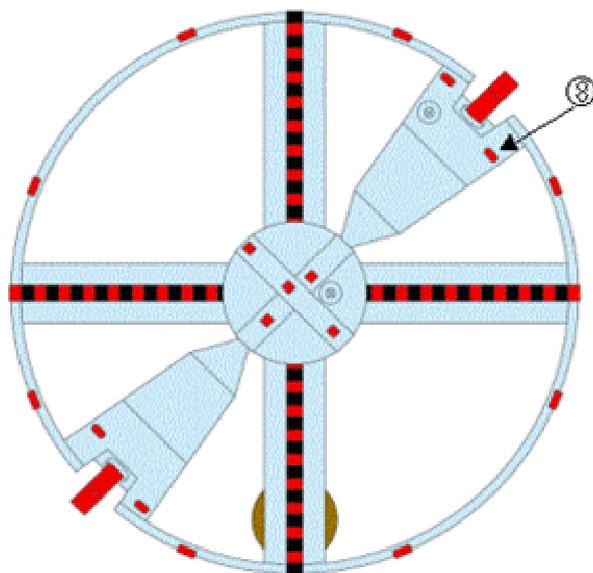
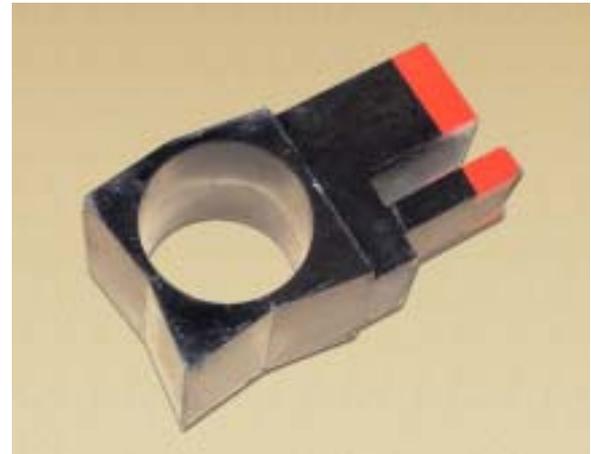


写真 - 1 に示すように山型の凹凸によりカッタービット同志や固定板と嵌合する形状をしており、4本スポークの場合、2本のスポークのビットを上下反対に挿入することにより2パス切削が可能となる。

写真 - 1 先行ビット付きカッタービット



フィッシュテールセンタービット再生装置

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前に押し出す「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。

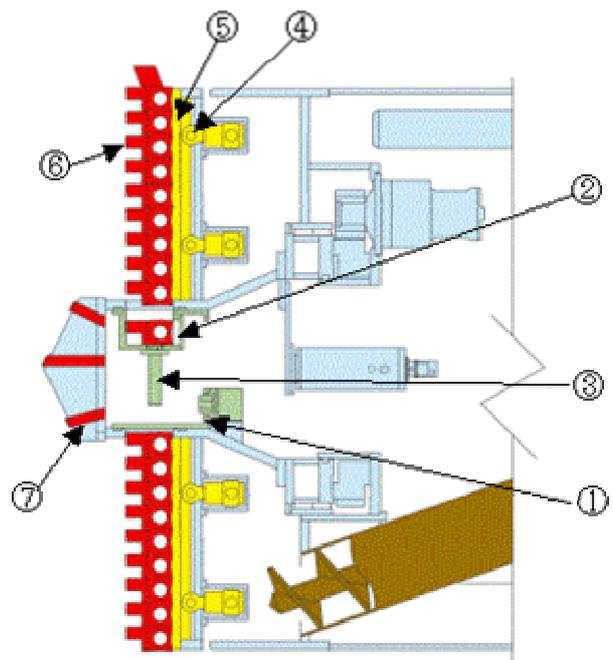


図 - 1 シャークビット工法機構

摩耗検知装置

外周側の cutter ビットの許容摩耗量を検知する装置であり、数度の検知が可能な装置である。

cutter ビット回収装置 (オプション装置)

押し出された cutter ビットを回収するときだけ装備するものである。機構としては、掘進時はシールド機内に格納されており、回収時にスポーク外周部にセットし、押し出される cutter ビットを待ち受けて回収する。

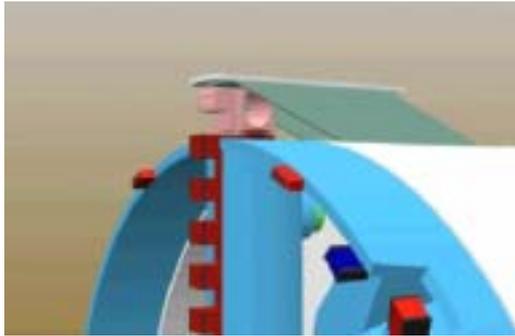


図 - 2 回収装置

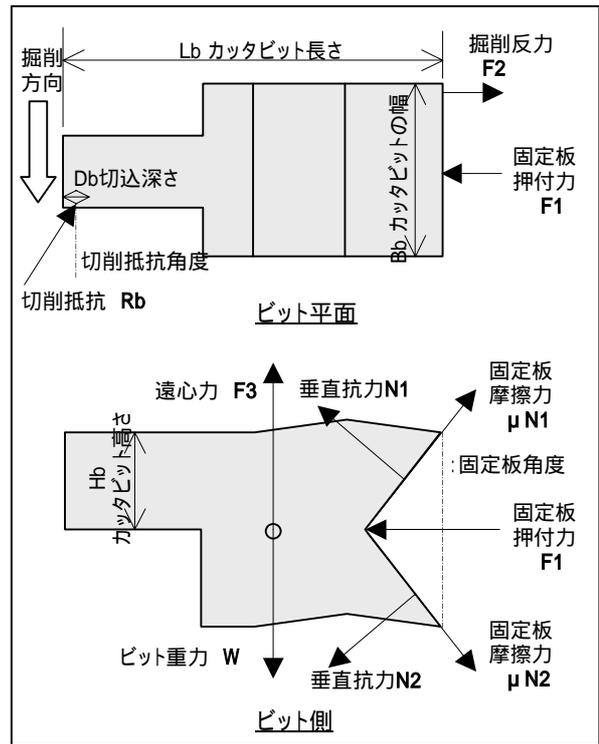


図 - 3 ビットに働く力

4. 固定板押付力・cutter ビット押出力の算定

本工法において、ビットに働く力は表 - 1 および図 - 3 に示すとおりである。

表 - 1 ビットに働く力

シールド機の状態	ビット重力	地山への押し出し抵抗	掘削抵抗	遠心力	加死ビット固定板押付力	摩擦係数	ビット固定ガイド摩擦係数
A 停止時	-	-	-	-	-	-	-
B 掘削時	-	-	-	-	-	-	-
C ビット交換時	-	-	-	-	-	-	-

「 - 」は力が微小もしくは0のため考慮せず

4.1 実験概要

本工法における cutter ビット固定板押付力および cutter ビット押出力を把握するために、実験機を作製し計測を行った。図 - 4 に実験機外形を示す。

実験機寸法 W3080mm × B1850mm × H2855mm

スポーク内ビット数 8個 (先行ビット対応可能)

ビット寸法 W139mm × B293mm × H160mm

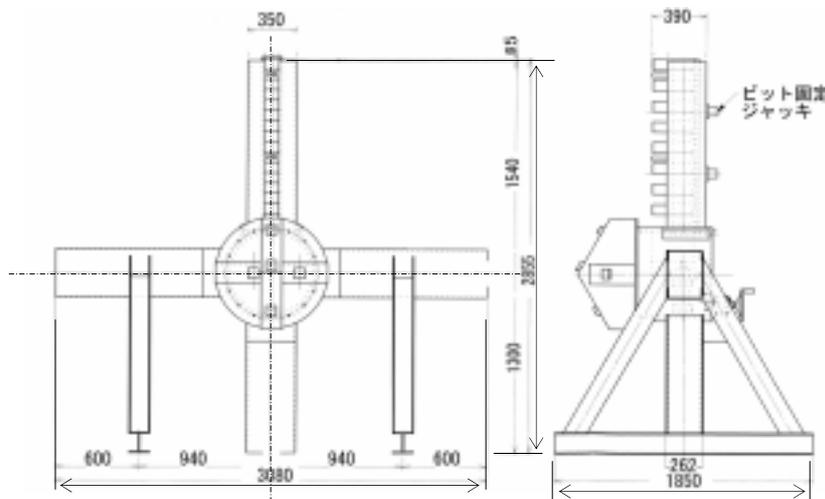


図 - 4 実験機外形

4.2 ビット固定板押付力の計算

ビットに働く力を図3-1に示す。

計算の前提条件

カッタービットにかかる力が最大となる場合（鉛直方向）で計算を行う。

シールド機掘削時にカッタービットが自重や切削抵抗によりズレたり動いたりしないように実験機結果をもとにビットの必要固定板押付力 $F1$ （1 スポーク当り）を算出する。

ビット自重によるズレ抵抗力（重力によるビットのズレに抗する力）に掘削時作用する掘削反力を加えた値にスポーク内ビット個数をかけた値を必要な固定板押付力 $F1$ とする。

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

となる。

Nb	: スポーク内ビット個数	8 (個)
Fb	: ビットズレ抵抗力	(N/個)
F2	: 掘削抵抗	(N/個)

ビットズレ抵抗力 Fb は、ビットと固定板はクサビ状になっていることから、クサビの摩擦の原理¹⁾として考えると式(2)となる。

$$Fb = W / \tan(2 +) \quad \dots \dots \dots (2)$$

= 239 (N/個)

W	: ビット単品重量	208 (N/個)
	: 固定板 θ 角度	7.6 (度)
	: クサビの摩擦角	16.7 (度)
	$\mu = \tan$	
μ	: 摩擦係数(実験値より)	0.30

掘削抵抗 $F2$ は切削抵抗により固定板に作用する力であり、切削抵抗角度は 0.47° と非常に小さいため 0° として計算を行う。掘削時カッタービットに加わるモーメントのつり合いは図-3より式(3)になる。

$$F2 \times Bb = Rb \times Lb \quad \dots \dots \dots (3)$$

式(3)より、掘削抵抗 $F2$ は式(4)になる。

$$F2 = Rb \times Lb / Bb \quad \dots \dots \dots (4)$$

= 696 (N/個)

Rb	: 切削抵抗	(N)
Lb	: カッタービット長さ	293 (mm)
Bb	: カッタービット幅	139 (mm)

切削抵抗 Rb は、切削抵抗指数とその切削面積から求められる。切削面積は、ビットの切込深さ×カッタービット高さより求める。

ビットの切込深さ Db は掘進速度とカッター回転数、ビッ

トパス数によって決定し、式(5)のようになる。

$$Db = V / N / m \quad \dots \dots \dots (5)$$

= 10(mm)

V	: 掘進速度	35 (mm/min)
N	: カッター回転数	1.7 (min^{-1})
m	: ビットパス数	2

従って切削抵抗 Rb は次の(6)式になる。

$$Rb = Wk \times Db \times Hb / 100 \quad \dots \dots \dots (6)$$

= 330(N)

Wk	: 切削抵抗指数 ²⁾	44 (N/cm ²)
Db	: ビット切込み深さ	(mm)
Hb	: カッタービット高さ	75 (mm)

以上の式(1)~(6)より、

$$F1 = 7,480 (N) \quad \text{となる。}$$

この結果より、固定板押付力は安全率 = 2.0 を考え、1 スポーク当り 15 kN とする。

4.3 ビット押出力の計算（ビット交換時）

実験機結果によりビットの押出力 f を算出する。

計算の前提条件

交換ビットを鉛直上方向、地山中に押し出す。押し出し用ジャッキを小さくするため、押し出し時にはビット固定板押付力を低減する。

ビットがズレたりする限界値は、式(2)の Fb （ビットズレ抵抗力）より 239N/個である。これにスポーク当たりのビット個数 8 個と安全率 = 1.5 を考慮して、固定板押付力を 3.0kN まで低減するものとする。

ビット交換時に、ビット押出力 f は式(7)となる。

$$f = f1 + f2 + f3 + f4 \quad \dots \dots \dots (7)$$

f1	: ビット押上重力	(N)
f2	: ビットと固定ガイドの摩擦抵抗	(N)
f3	: ビットと固定板の摩擦抵抗	(N)
f4	: 地山への押出抵抗	(N)

ビット押上重力 $f1$ は、スポーク内ビット重量と交換用ビット 1 個の重量を加えたものであるから、式(8)で表せる。

$$f1 = (Nb + 1) \times W \quad \dots \dots \dots (8)$$

= 1,872(N)

ビットと固定ガイドとの摩擦抵抗 $f2$ は、摩擦係数と低減した固定板押付力 Fw から求める。

$$f2 = Fw \times \mu \quad \dots \dots \dots (9)$$

= 900(N)

Fw : 低減した固定板押付力 3,000 (N)

ビットと固定板の摩擦抵抗 $f3$ は、式(2)と同様に考え

ると、固定板押付力 F_w によってクサビの摩擦力が働くとして

$$f_3 = F_w \times \tan(2 +) \dots\dots\dots (10)$$

$$= 2,608(N)$$

地山への押し出し抵抗 f_4 は、地山貫入抵抗とビットの貫入面積から求める。

$$f_4 = Ba \times Wq \dots\dots\dots (11)$$

$$= 15,400(N)$$

Ba : ビット貫入面積 350 cm^2
 Wq : 地山貫入抵抗 44 N/cm^2

以上の式(7)~(11)より、
 $f = 20,780 (N)$ となる。
 これらの結果より、ビット押し出し力は安全率 $= 2.0$ を考え、42kN とする。

4.4 実験結果との比較

実験機を用いて行ったビット固定および交換の実証実験結果との比較を行った。その結果を表-2 および図-5 に示す。

表-2 実験結果との比較

固定板押付力 kN	実験値		計算値	
	気中への 押出力 kN	気中への 押出力 kN	地山への 押出抵抗 kN	地山中への 押出力 kN
8	13	11.2	17.5	28.7
12	16	15.9	17.5	33.4
16	19	20.6	17.5	38.1
20	21	25.3	17.5	42.7
23	22	28.8	17.5	46.3
28	24	34.6	17.5	52.1
32	26	39.3	17.5	56.8
37	29	45.1	17.5	62.6

気中への押し出し(ビットの地山への押出抵抗なし)
 掘削地山への押出力は、ビットの地山への押出抵抗を考慮

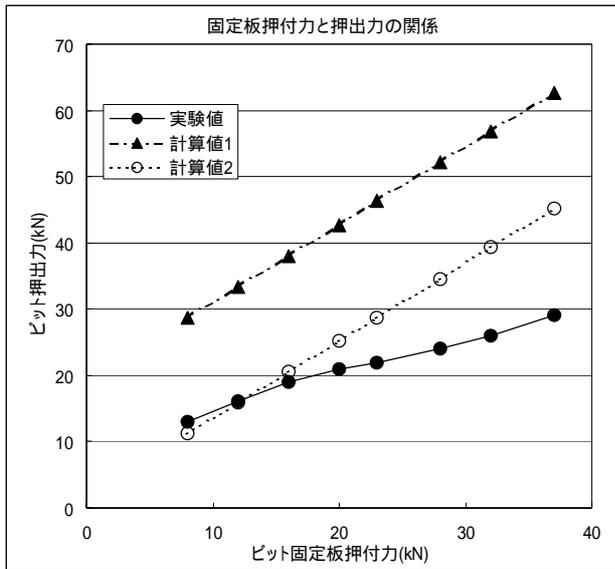


図-5 実験結果との比較

以上の結果から、ビット押出力の実験値と式(7)による事前計算値は、ほぼ一致している。また、ビット固定板押付力の増加に伴い、実験値が計算値を下回っていることから、土質条件等を十分に考慮したうえで、計算値によって設計が可能(安全側)である。

5. カッタービットの摩耗

5.1 カッタービットの摩耗要因

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。

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。

5.2 カッタービット摩耗量の計算

カッタービットの摩耗検討は以下の式を用いて算出を行う。

摩耗計算式

$$= (L/v) \cdot n \cdot (2 \cdot r) \cdot k \cdot M \cdot \dots (12)$$

L : 掘進延長 (m)
 v : 掘進速度 (mm/min)
 n : カッター回転数 (min^{-1})
 r : カッタービット軌跡半径 (m)
 k : 摩耗係数 (mm/km)
 M : カッタービットパス係数 ($M = 0.9^{(m-1)}$)
 m : 切削パス数(パス数を考慮せず $M = 1$ とする場合もある)
 : 機種係数(泥土圧式; 1.0. 泥水式; 0.6)

表-3 摩耗係数

土質	砂質土		砂 礫 土		
	粘性土	砂質土	小礫 (50mm以下)	中礫 (50mm~250mm)	大礫 (250mm以上)
超硬チップ材質					
E 3	0.008	0.023	0.026	0.039	0.052
E 5	0.010	0.030	0.034	0.051	0.068
			強化型カッタービット	強化型カッタービット 破砕型カッタービット (デイクッター)	強化型カッタービット 破砕型カッタービット (デイクッター)

以上の式により摩耗量の算定を行う。表 - 3 における摩耗係数は、それぞれの土質に応じたカッタービットの形状・材質によるものであり、砂礫土においては強化型カッタービットとしてビット自体や超硬チップを大型化して対応している。形状としては、大型化したビット自体に数個の超硬チップを配置したシェルビットを採用しているものが多い。砂礫層の大礫地盤では、破碎型のディスクカッターを多く採用している。

本工法では、カッタービットの形状の面からシェルビットまでの対応が可能であり、砂礫層の中礫地盤程度までの地盤を対象とする。

式(12)により算出した、3.6mクラスのシールド機カッタービットの摩耗限界距離(例)を表 - 4 に示す。

表 - 4 摩耗限界距離

		(単位：m)	
項目		泥土圧式	泥水式
粘性土		5,030(4,020)	8,330(6,670)
砂質土		1,830(1,340)	2,910(2,230)
砂礫土	小礫	1,600(1,180)	2,580(1,970)
	中礫	1,050(790)	1,720(1,310)
	大礫	770(590)	1,290(990)

()内はE5超硬チップ

5.3 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。

表 - 5 に示すように、硬さと杭折力は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 - 5 超硬チップ材料比較表

	硬度(HRA)	杭折力(Mpa)
E3	88以上	1600
E5	86以上	2000

6. カッタービットの交換

表 - 6, 表 - 7 にシャークビット工法カッタービット交換検討表を示す。条件としては、砂質土・泥土圧式・超硬チップE3・シールド機外径 3.60mとして、表 - 6 は、摩耗した外周側から4個・5個と順次交換する例であり、カッタースポーク1本あたりカッタービット9個として、5000mの掘進距離で15個のカッタービットを交換する。スポークが4本として60個を交換し、4回の交換作業が

必要である。

表 - 7 は、最外周のカッタービットが許容摩耗量に達した時点で全数交換する例で、同じく5000mの掘進距離で18個のカッタービットを交換する。カッタースポークが4本で72個を交換し、2回の交換作業が必要である。交換作業は、準備作業がほとんど無く1本あたり平均20分程度で簡単に完了するため、カッタービット交換数の少ない表 - 6の方法が、この比較では施工的にも経済的にも有利な方法である。また、交換作業を増やし、たとえば1~2個ずつ交換していけば交換個数もさらに少なくなり、摩耗の少ない土質ほど有利となり、施工性と経済性を考慮して選択できる。

7. 他社のカッタービット交換技術

クルン工法

球体シールド工法。シールド機内に装備した球体を用いて止水性を保ちながら、球体内部にカッター装置を内蔵し180度回転させてからシールド機内でビット交換を行う工法。回転する場合は、カッタースポークを縮めることでスペースを確保する。

トレール工法

シールド機内に組み込まれたスライド機構式カッタービット交換システム。スライド機構によりカッター装置をビット収納箱に引き抜き、新しいカッタービットと交換して、スポーク内に挿入する交換工法。

リレービット工法

カッターディスクのスポーク内に人が入れる程度のスペースを設け、そこにシールド機内から人が入りビットを1個ずつ交換する工法。

リボビット工法

カッターヘッドの旋回力を利用してスポークを回転させ新しいビットに交換する工法。交換用ビットを取り付けた円筒形のカッタースポークを装備し、交換用ビットは最初は背面に向けておく。ビットを交換する際は、バルクヘッドに取り付けたラックを油圧でスポークに押し当てカッターを回転することにより、スポークが回転し背面にあった交換用ビットが前面に出てくる。

レスキュービット工法

カッタービット(レスキューカッター-ビット)を油圧ジャッキと連結してカッターヘッド内に収納しておき、機内からの油圧操作により油圧ジャッキを伸長させ、カッタービットをカッターヘッド前面に押し出す工法。

ここに紹介した交換技術はほんの一部であり、各社さまざまなカッタービット交換技術により、今後の

シールド長距離・超長距離施工の受注に向けて営業展開の拡大を図っている。

表 - 6 シャークビット工法カッタービット交換検討表 - 1

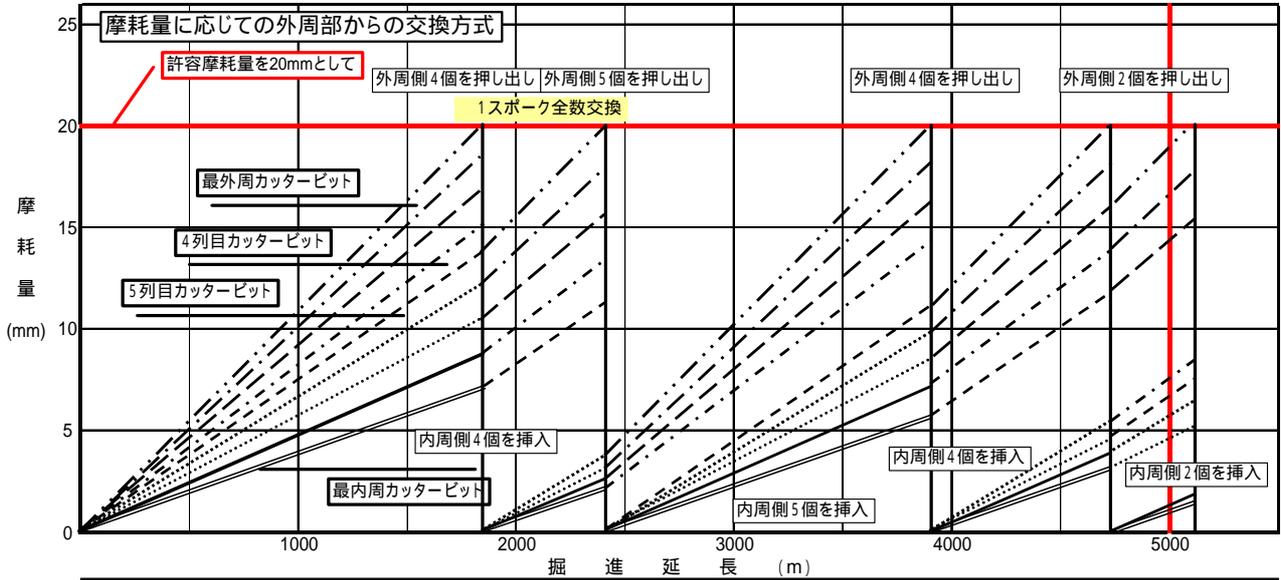
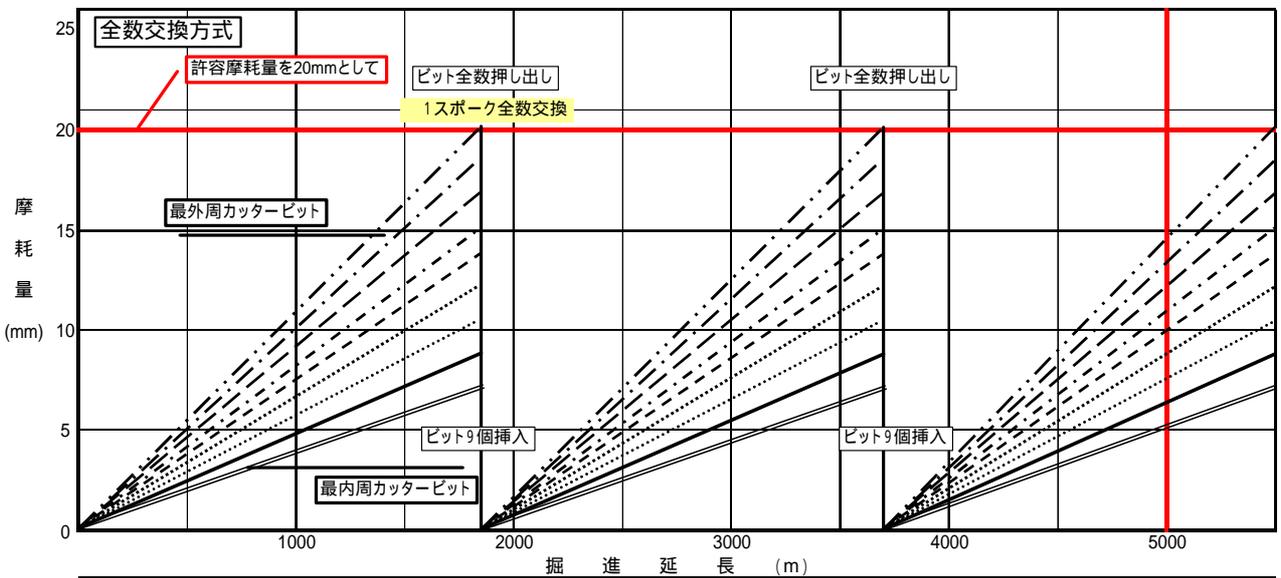


表 - 7 シャークビット工法カッタービット交換検討表 - 2



おわりに

「シャークビット工法」は、シールドトンネルの長距離化、大深度化にむけて開発された工法であり、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。

最後に、ご意見・ご指導をいただいた関係各位の皆様方、共同開発者であるNKK殿ならびに、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ます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 P3-37 第5章
土質工学ハンドブック 土質工学会