

カッタービット交換システムの開発

－スライドカッター工法の実証－

村中浩昭* 太田義己* 西村直樹*
高塚康夫** 柚木卓郎*** 三上賢二***

1. まえがき

シールド工事ではビット交換を必要とする長距離施工や、粘性土・砂礫・玉石などが路線中に存在し、地質が大きく変化する地盤での施工が近年増加している。このようなシールド工事に対応するためにビット交換作業が不要な「スライドカッター工法」を開発した。

本工法を適用することで、従来のように中間立坑を設けてビット交換を行う方法やシールド機の切羽部分を地盤改良して機内からビット交換する方法に比べて、大幅な工期短縮とコスト低減が可能になる。

本報では、スライドカッター工法の概要と工場でのスライド機構の性能確認実験および現場での適用結果について述べる。

2. スライドカッター工法の概要

今回開発した「スライドカッター工法」は、粘性土層・砂礫層・玉石層など路線中で地質が大きく変化する地盤の掘進や長距離掘進を対象にした泥土圧シールド工法である。

従来、玉石混じり砂礫層と粘性土層などが繰り返して出現する地盤を1台のシールド機で施工する場合、いずれかの土質を対象にしたシールド機を選定せざるを得ない。そのため、玉石によるビットの損耗、粘性土によるスリットの閉塞、ローラービットが引き起こす粘性土での掘進速度の低下など土質変化に伴う様々なトラブルや、最悪の場合には掘進不能の事態に至る場面も生じていた。このようなトラブルを防ぐため、中間立坑を設けてビット交換を行う方法やシールド機の切羽部分を地盤改良して機内からビット交換する方法が採られてきた。スライドカッター工法はこのような作業を必要としない施工法である。

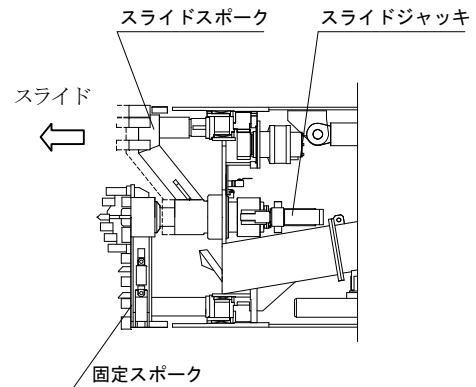


図-1 カッターの構造

本工法に用いるスライドカッターシールド機のカッタースポークの構造を図-1に示す。スライドカッターシールド機は、固定構造のカッタースポーク（固定スポーク）と掘進方向にスライド可能なカッタースポーク（スライドスポーク）の二重構造になっており、土質及び施工距離に応じて地盤変化対応型シールド機と長距離対応型シールド機に分類される。

2.1 地盤変化対応型シールド機

地盤変化対応型シールド機は、カッターヘッドとなる固定スポークに玉石破砕用のローラービットを取付け、スライドスポークに粘性土掘削用ビットを取り付けた構造である。

発進当初が玉石混じり砂礫層で途中から粘性土層が出現する地盤での適用例を図-2に示す。

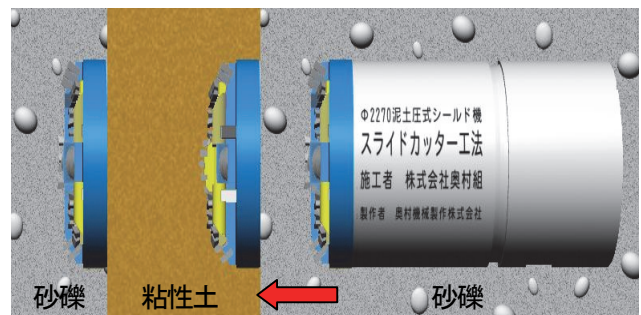


図-2 地盤変化対応型の適用例

*関西支社機械部 **関西支社土木技術部 ***関西支社土木部

最初の砂礫層ではスライドスポークはチャンバー内に後退させ、固定スポークを前面に出して玉石をローラービットで破碎しながら掘進する。そして、粘性土が出現した時点でスライドスポークを固定スポークより前方にスライドさせ、この粘性土掘削用ビットで粘性土の掘削を行う。

このように土質ごとに上述のようにカッターヘッドを対応させることでシールド掘進を効率的に行うことができ、繰り返し変化する地層にも対応が可能である。

2.2 長距離対応型シールド機

長距離対応型シールド機は、写真-1に示すようにカッターヘッドとなる固定スポークおよびスライドスポークの両方に土砂用ビットを取付けた構造である。固定スポークのビットが摩耗すると、スライドスポークを前方にスライドさせることにより、カッター寿命の延命を図る。

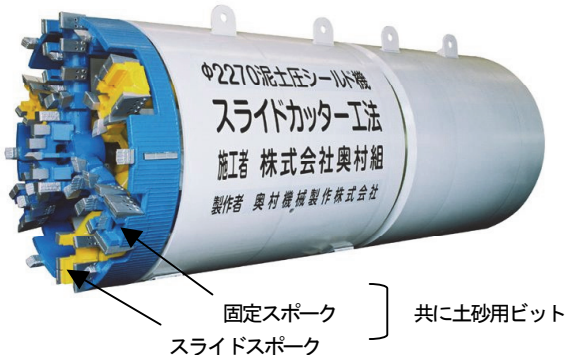


写真-1 長距離対応型シールド機

2.3 特長

スライドカッター工法の特長を以下に示す。

- i. 地盤の変化に対して短時間で、最適なカッタースポークに変更することができ掘進作業の効率化を図ることができる。
- ii. ビット交換に伴う地盤改良や立坑築造が不要となり、工期短縮とコストダウンを図ることができる。
- iii. ビット交換のための切羽作業が不要になるので安全性が向上する。
- iv. 対象地盤および施工距離に適合した合理的なシールド機的设计ができる。

2.4 適用範囲

従来、カッタービット交換を機械的に行うことが困難とされた小口径シールド（シールド機外径φ2,000mmクラス）への適用も可能である。適用範囲を以下に示す。

- ・適用径 φ2000mm～φ6000mm
- ・適用土質
 - 長距離対応型：粘性土～玉石混じり礫層
 - 地盤変化対応型：土質の変化が激しい地盤

3. スライド機構の性能確認実験

スライドカッター工法の開発にあたり、実物大の模擬カッターヘッドを製作し、スライド機構の強度および作動状況を調べた。

3.1 スライド機構の強度確認

スライド機構の強度は、掘進中にスライドスポークを作動させることを考慮し、スライドスポークに掘進方向及び回転方向の負荷をかけ、各部材のひずみ量を計測することにより強度を確認した。

a. スライドスポークへの作用荷重

スライドスポークの構造を図-3に示す。シールド推力は通常 1000 kN/m²程度であり、そのうち 60～70%がスキンプレートと土やセグメントとの摩擦で消費されることから、カッターヘッドに加わる推力を 400 kN/m²とした。

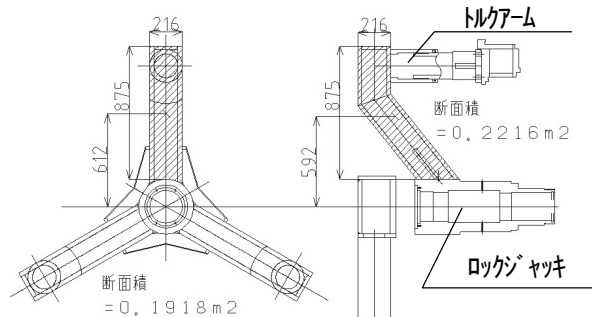


図-3 スライドスポーク単体図

スライドスポークの投影面積、荷重は次の通りである。

投影面積

$$\text{正面（推進方向）：} A_1 = 0.1918 \text{ m}^2$$

$$\text{側面（回転方向）：} A_2 = 0.2216 \text{ m}^2$$

スポーク 1 本に作用する荷重

$$\text{正面：} W_1 = 400 \text{ kN/m}^2 \times 0.1918 \text{ m}^2 = 76.72 \text{ kN}$$

$$\text{側面：} W_2 = 400 \text{ kN/m}^2 \times 0.2216 \text{ m}^2 = 88.64 \text{ kN}$$

b. 実験条件

スライドスポークの載荷位置はスポークの面積重心に作用させるのが妥当であるが、載荷治具の制約から以下のように設定した。

(a) 推進方向の荷重

カッター中心軸より 0.875 m の位置 (重心 : 0.612 m) に 5 kN ピッチで荷重を加えてひずみを測定した。最大荷重は前述した作用荷重よりも大きい 120 kN とした。

(b) 回転方向の荷重

カッター軸より 0.825 m の位置 (重心 : 0.592 m) に 5kN ピッチで荷重を加えてひずみを測定した。最大荷重は前述した作用荷重よりも大きい 100 kN とした。ひずみゲージ取付け位置を図-4 に示す。

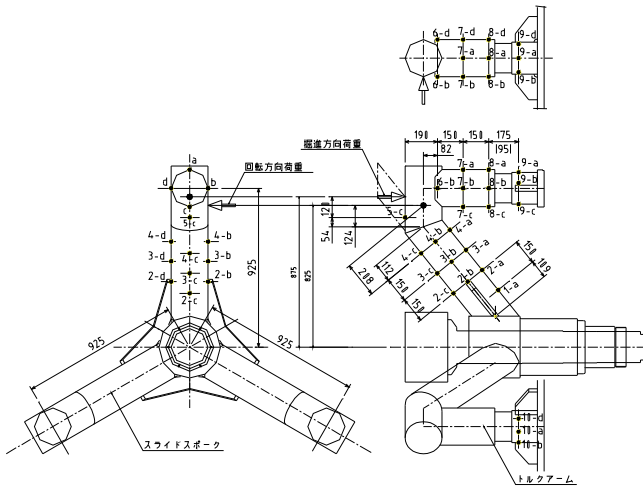


図-4 ひずみゲージ取付け位置図

c. 実験結果

スライドスポークのストロークを 0 mm、80 mm とし、最大荷重をかけた時の応力測定結果を表-1 に示す (スポークの断面係数 $Z=722.63 \text{ cm}^3$)。

表-1 曲げ応力測定結果

No.	荷重方向	荷重		スポーク最大応力		トルクアーム最大応力	
		ストローク mm	kN	位置	N/mm^2	位置	N/mm^2
1-1	掘進方向	80	120	1-a	-57.8	7-a	-11.6
1-2	掘進方向	80	120	1-a	-57.6	7-a	-11.8
2-1	掘進方向	0	120	1-a	-54.0	7-a	-18.8
2-2	掘進方向	0	120	1-a	-55.6	7-a	-18.0
3-1	回転方向	80	100	2-d	-34.8	9-b	-19.8
3-2	回転方向	80	100	2-d	-34.4	9-b	-19.6
4-1	回転方向	0	100	2-d	-35.2	9-b	18.0
4-2	回転方向	0	100	2-d	-35.2	9-b	18.0

カッタースポークではセンターに近い部分に最大圧縮応力 57.8 N/mm^2 、トルクアームではスライドスポークの根元側で最大引張応力 19.8 N/mm^2 が生じた。いずれの応力も許容応力 140 N/mm^2 以内であり、十分な強度を保有することを確認した。

3.2 スライド機構の作動確認

スライド機構の作動は、掘削中にカッターを回転しながらスライドすることを想定し、スライドスポーク 3本にパワージャッキで回転方向の荷重を加えた状態

でスライドし、ロックジャッキの押し引きの油圧を測定してスライド抵抗を求めることにより、確認した。

パワージャッキの接点における摩擦係数を $\mu=0.2$ とした時のスライド抵抗を表-2 に示す。

表-2 スライド抵抗測定結果

回転方向荷重 kN/1本	摩擦力 kN	平均油圧 MPa	ジャッキ推力 kN	スライド抵抗 kN
0	0	4.2	109.2	0
10	6	5.8	150.8	35.6
20	12	6.1	158.6	37.4
30	18	6.3	163.8	36.6
40	24	6.5	169.0	35.8
50	30	6.8	176.8	37.6
平均				36.6

回転方向の荷重に関係なくスライド抵抗が一定であること、また、この時のスライド抵抗力は約 35kN となり、カッタースポークを作動させるには問題がないことを確認した。

4. 現場適用

4.1 概要

長距離対応型のスライドカッター工法を下記のシールド工事の現場に適用し、工法の検証を行った。また、従来工法と摩耗量を比較するために隣接工区の段差ビットを取付けたシールド機のビットを同時に調査した。工事概要を表-3、スライドカッターシールド機の仕様および基本構造を表-4、図-5に示す。

表-3 適用工事の概要

	スライドカッター適用工区	隣接対比工区
シールド外径	$\phi 2,270\text{mm}$	
セグメント内径	$\phi 2,000\text{mm}$	
掘進延長	$L=2,374\text{m}$	$L=2,424\text{m}$
土質	玉石混じり礫質土層	粘性土混じり礫質土層

表-4 スライドカッター機本体主要諸元

項目	諸元値
型式	泥土圧シールド機
外径	$\phi 2,270\text{mm}$
機長	5,550mm
本体シェル長	4,290mm
カッタートルク	常用353kN・m ($\alpha=30.2$)
カッター回転数	2.3 r.p.m. ($v=16.4\text{m/min}$)
駆動モータ	油圧 27.8kN・m \times 35MPa \times 2台
シールドジャッキ	4,800kN (8本) ストローク 1,150mm
中折れジャッキ	4,000kN (4本) ストローク 125mm
オーバーカッタージャッキ	ストローク 50mm \times 2本
カッタースライドジャッキ	300kN \times 2台
スクリュコンベア	$\phi 450\text{mm}$ (リボン+軸付)
開口率	61.2%
本体重量	35 t



図-5 スライドカッター機基本構造図

スライドカッターシールド機と隣接工区のシールド機ビット段差量の比較を図-6、ビットの取付け状況の比較を表-5に示す。

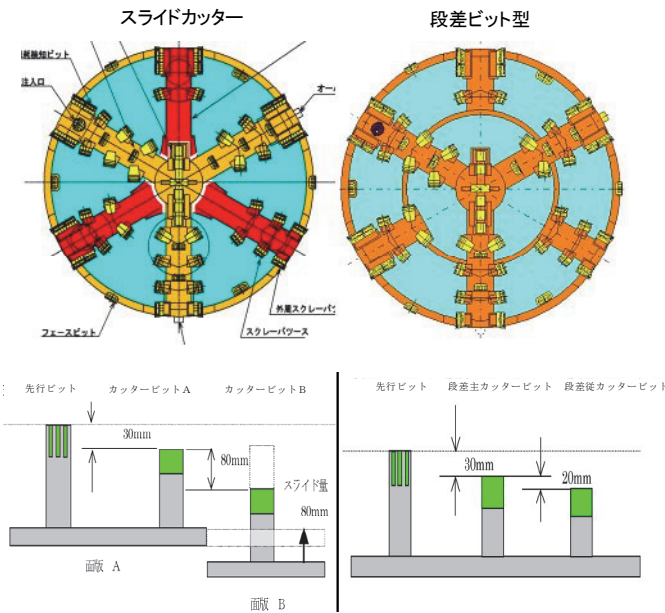


図-6 シールド機面版比較図

表-5 ビット取付け比較

項目	スライドカッター	段差ビット型
ビット個数	先行ビット 19個 カッタービット 46個	先行ビット 19個 カッタービット 46個
先行ビット高さ	130 mm	130 mm
カッタービット高さ	100 mm	100mm、80mm
パス数	外周3パス 内周1パス(2重)	外周6パス 内周2パス

4.2 検証項目

現場での調査項目を以下に示す。

- i. カッタービットの摩耗量
- ii. スライド機構の作動
- iii. チャンバー内の掘削土砂の流動性

4.3 検証結果

a. 土質

スライドカッターシールド機が通過する土質は、全体的に沖積礫質土層 (A g) であった。発進位置から190m 地点までは φ200mm~φ250mm の玉石を含む地質で、その後1,100m~1,900m 区間ではN値が4程度、粒度組成は礫分 3.2%、砂分 11.9%、シルト分

48.5%、粘土分 36.5%で粘性土の割合が多い土質であった。一方、隣接する比較工区の土質は、粘性土混じり沖積礫質土層 (A g) であり、全体的に玉石が点在する程度であった。発進位置から1,260m 地点までは、粘性土 (N値3~5) と砂質土 (N値5~27) の互層が連続し、到達位置に近づくにつれ洪積礫質土 (D g) が出現した。

b. カッタービットの摩耗量

両工区とも、先行ビットの摩耗量は許容摩耗量以下であり、シールド機が到達するまで主に先行ビットで掘削を行った。到達時における両工区のビット摩耗量の測定結果を図-7、図-8に示す。

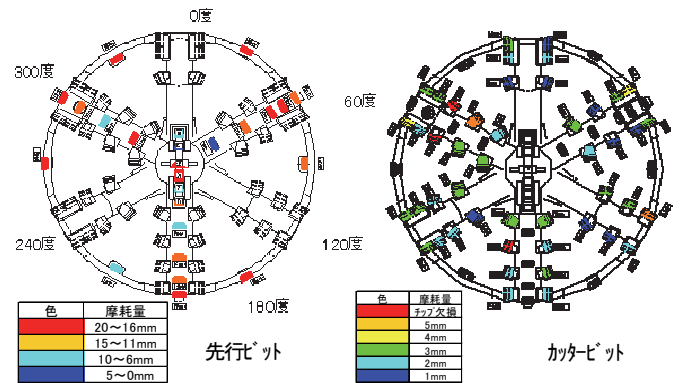


図-7 スライドカッター機摩耗量

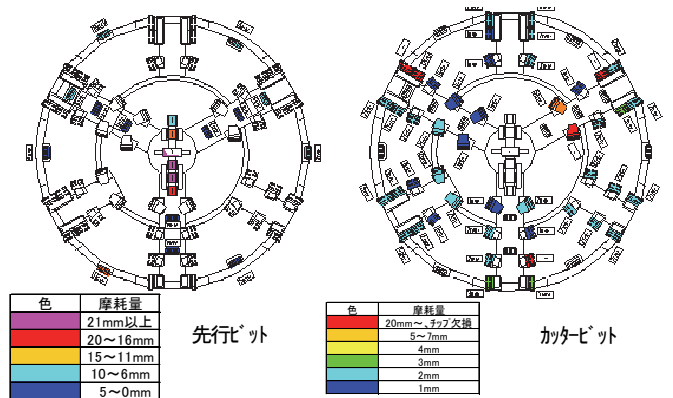


図-8 段差ビット型機摩耗量 (比較工区)

今回の施工では、以下に述べるビット摩耗量の算定式を用いた。単位摺動当りの摩耗量は、パス数を考慮せず材質が同じであればビットの形状 (先行ビット、カッタービット) によって摩耗が変わらないものと仮定した。

地山を掘削する先行ビットの摩耗量 M_a はビットの単位摺動距離当たりの摩耗量 M_t にビットの摺動距離を乗じて求められる。

$$Mt = N \cdot m \cdot k \quad (1-1)$$

$$Ma = \frac{Mt \cdot n \cdot \pi \cdot D \cdot L}{V} \quad (1-2)$$

$$L = \frac{Ma \cdot V}{Mt \cdot n \cdot \pi \cdot D} \quad (1-3)$$

Ma : 各土質での摩耗量(mm)
 Mt : 単位摺動距離当たりの摩耗量(mm/m)
 L : 各土質での掘削延長(m)
 N : N値
 m : 材質による摩耗量(mm/m)
 超硬チップ (SG30) : 0.243×10^{-5}
 k : 土質区分による摩耗負荷係数
 n : 回転数(r. p. m.)
 D : シールド機外径(m)
 V : 平均掘進速度(cm/min)

先行ビットより後方の位置にあるビットは補助的な掘削と掘削した土砂を攪拌してチャンバー内に導くことが主な働きとなり、先行ビットに比べて摩耗量が少なくなる。このことから、後方のビットの単位摺動距離当たり摩耗量 Mt' は Mt に「摩耗換算率 α 」を乗じた以下の式で求めることとした。

$$Mt' = \alpha \cdot N \cdot m \cdot k \quad (2-1)$$

先行ビットが許容摩耗量に達すると掘削機能がなくなり、次に後方のビットで地山を掘削することになる。この時の後方ビットの単位摺動距離当たり摩耗量は Mt (式1-1) で求められる。

以上の算定式を用いたスライドカッター工法の掘進距離と摩耗量の関係を図-9に示す。図-6から先行ビットおよび後方の面盤Aのビットが摩耗すると、面盤Bのスポークを切羽までスライドし、面盤Bのビットで地山を掘削することで長距離施工が可能になる。

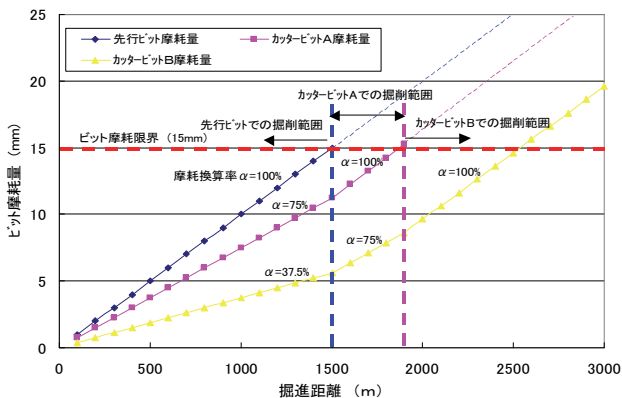


図-9 掘進距離と摩耗量

スライドカッター式の摩耗量および「摩耗換算率 α 」を表-6に示す。計画時の推定摩耗量と実績摩耗量に大きな差が生じた。スライドカッター式の摩耗量は、段差ビットの段差量 20 mm に対して 80 mm の段差量があることから、計画時には「摩耗換算率 α 」を

表-6 計画摩耗量と実績摩耗量 (スライドカッター)

	ビット種別	先行ビット	面盤A カッタービット	面盤B カッタービット
計画	計画での摩耗量	9.9mm	7.4mm	3.7mm
	摩耗換算率 α	100%	75%	37.5%
実績	実績摩耗量	14.6mm	5.3mm	2.5mm
	摩耗換算率 α	147%	54%	25%

表-7 計画摩耗量と実績摩耗量 (段差ビット)

	ビット種別	先行ビット	段差主 カッタービット	段差従 カッタービット
計画	計画での摩耗量	3.2mm	2.4mm	2.4mm
	摩耗換算率 α	100%	75%	75%
実績	実績摩耗量	6.9mm	3.6mm	2.5mm
	摩耗換算率 α	218%	114%	80%

先行ビット 100%、面盤カッタービット 75%、面盤カッタービット 37.5%として摩耗量を推定した。

推定摩耗量に比べて実績摩耗量が大きくなったことから、実施工で確認した掘削土の土質と実掘進速度のデータを使用して実績摩耗量から「摩耗換算率 α 」を求めた。算出した各ビットの実績摩耗量の「摩耗換算率 α 」は先行ビット 147%、面盤Aカッタービット 54%、面盤Bカッタービット 25%になった。

また、隣接工区の段差ビット方式についても到達時の摩耗調査結果から同様な方法で「摩耗換算率 α 」を求めた結果を表-7に示す。

両工区の摩耗結果をまとめると以下のようなものである。

- i. スライドカッター式では、先行ビットの摩耗量は実績値の方が多く、また、後方の面盤ビットの摩耗量は実績値の方が少なくなった。
- ii. 段差ビット方式では、先行ビットについてはスライドカッター式と同じ傾向が見られたが、後方の段差主ビットについてはスライドカッター式に比べて「摩耗換算率 α 」が高く、両方式に差が見られた。これは、スライドカッター式では、段差ビット式に比べてカッタースポークの構造が地山の掘削土砂をチャンバー内に取り込みやすい構造であることから、ビットの摩耗が少なくなったと思われる。
- iii. スライド式の面盤Bカッタービットと段差ビット式の段差従カッタービットの「摩耗換算率 α 」(実績値)を比べると、先行ビットからの段差量の少ない後者の摩耗換算率が高くなった。このことより、先行ビットで地山を掘削している時は段差ビット方式よりもスライドカッター式の方がビットの摩耗量が少ないことが分かる。
- c. スライドカッター工法の掘進可能距離の推定

今回のビット摩耗量の実績値から得られた表-8に示す「摩耗換算率 α 」を用いてスライドカッター工法の掘削可能距離を推定した。

表-8 摩耗換算率 α

ビット種別	先行ビット	面版A カッタービット	面版B カッタービット
摩耗換算率 α	150%	60%	30%

代表的な土質を表-9に示す5種類とし、各層の比率で掘進距離を区分し、代表的なN値と摩耗負荷係数からビットが許容摩耗量に達するまでの掘進距離を求めた。ここで、ビットの交換時期は、各ビットがばらついた摩耗状態になっても効率的な掘削状況を保持するために、先行ビットは15mm、カッタービットは許容刃先摩耗量の半分の15mmを目安とした。平均掘進速度は、5cm/minとし、土質区分による摩耗負荷係数については玉石層と玉石混じり砂礫層に区分した。

表-9 設定土質と掘進可能距離

玉石層	砂礫層 玉石混じり	砂礫層	砂質土層	粘性土層	ビット交換前の 距離(m)	ビット交換後の 距離(m)	掘進可能距離 (m)
○		○	○	○	2,324	832	3,156
	○	○	○	○	2,972	1,072	4,044
	○	○	○		2,214	771	2,985
	○	○			1,636	590	2,226
		○	○		4,340	1,660	6,000

計算結果から、スライドカッター工法ではビット交換を行わない従来のシールド機よりも掘進距離を約35%伸ばす事が可能であると推定される。

d. スライド機構の作動確認

掘進途中の2,025mの地点でスライド機構の作動確認(ビット交換)を行った。最初はカッターヘッドを回転させずにスライド機構の作動を試みたが、切羽の前面抵抗が大きいためスライドスポークを前方にスライドできなかった。次に、カッターヘッドを回転させると容易にスライドさせることができた。切羽側へのスライド時間は9秒、チャンバー側に戻す時間は6秒であり、短時間でビット交換が可能であることが分かった。図-10にビット交換前後の掘進速度とカッタートルクの関係を示すが大きな変化はなかった。

e. チャンバー内の流動性確認

従来の泥土圧シールド機ではチャンバー内の塑性流動化を促進するために、隔壁に固定翼、カッタースポークに回転翼を取付けることが多い。

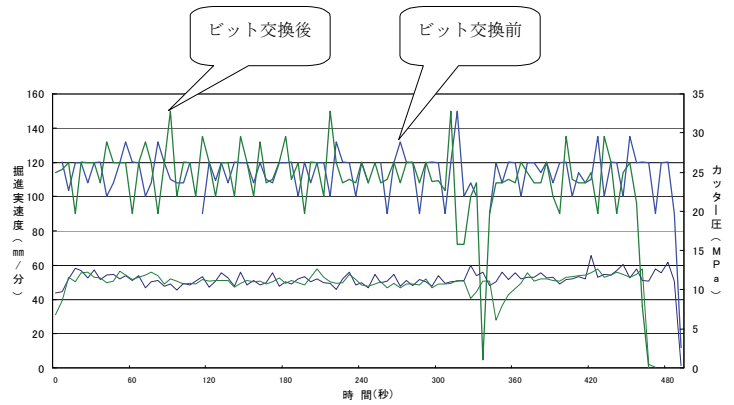


図-10 掘進速度とカッタートルク

今回、スライドスポークの中央部を傾斜することで、掘削土砂の取り込みを容易にするのと同時にチャンバー内の攪拌効率の向上を図った。掘削土の排土状況および到達時のカッタースポークおよびチャンバー内の掘削土砂の付着状況を調べた結果、十分な攪拌効果が得られることが分かった。

5. まとめ

現場適用の成果をまとめると以下の通りである。

- i. スライドスポークを作動させることでカッタービットの交換が可能となり、安全性の向上と大幅な工期短縮ができる
- ii. 従来のシールド機よりも掘進距離を約35%伸ばすことができる
- iii. スライドスポークの中央部を傾斜させることで、掘削土の取り込みが容易になり、チャンバー内の掘削土砂の攪拌効率が向上する

6. あとがき

今回の現場適用では、スライド状況や掘削性能、ビットの摩耗等の貴重なデータを収集するとともに、従来型のシールド機を同一現場で施工する機会に恵まれ、ビット摩耗量を比較することができた。

今後は、地盤変化対応型シールド機による適用を図り、本工法の完成度を高めていきたい。

謝辞：最後に本工事の計画から施工にわたり、終始御指導いただいた大阪ガス(株)、新日本製鐵(株)に謝意を表します。