

トンネル 特集

シールド機内からカタビット交換が可能な
テレスポークビット工法の施工

磯村 繁樹・山本 裕三

近年のシールド工事は、工事用地の確保難や輻輳する地下構造物、大深度化に伴う立坑設置が不可能な場合、あるいはコストダウンを目的に、長距離化されてきている。長距離化に伴う課題として、カタビットの延命・更新技術があるが、種々提案実証されている。

このようななかで、回数に制限なくシールド機内より機械的にビット交換が可能な工法としてテレスポークビット工法が開発された。この装置を装備したシールド機が現在稼働中であり、中間点でのビット交換が完了した。

本報文では、テレスポークビット工法の概要と、このシールド工事でのビット交換実績を報告する。

キーワード：トンネル、シールド工法、ビット交換、機械式ビット交換、地中接合、MSD工法、長距離掘進

1. はじめに

名古屋市では、平成12年9月11日～12日に発生した東海豪雨をうけ、緊急雨水整備計画を策定し、従来からの雨水対策とともに「雨に強いまちづくり」を進めている。その一環として名古屋市西区小田井地区において貯留量54,000 m³の雨水貯留管が計画された。この貯留管はシールド工法によって施工されるが、計画路線約4 kmの全線が密集した市街地であり、シールド発進基地は路線両端部に隣接する公園用地によって確保が可能である(図-1)。

本工事はこの貯留管の下流側工区を担当し、約2.4 kmの区間を泥土圧シールド工法にて築造し、MSD

工法によって上流側工区と接続するものである。このなかには、路線のほぼ中間点において、取水人孔立坑内を利用したカタビット交換工事が含まれており、市街地内での立坑築造、立坑前後での補助地盤改良を必要とした。

このビット交換工事に着目し、補助地盤改良工を対象としたVE(Value Engineering)提案によってシールド機内よりの機械式カタビット交換工法(テレスポークビット工法)を採用した。本報文では1,250 m地点でビット交換を実施したので概要と実績について報告するものである。

2. 工事概要

小田井貯留管計画の工事内容は以下のとおりである。

- ①工 事 名：小田井貯留管築造工事(その2)
- ②発 注 者：名古屋市緑政土木局
- ③工 期：平成13年10月～平成16年3月
- ④場 所：名古屋市西区中小田井三丁目～赤城町地内
- ⑤施 工 者：大林・西松・大日本特別共同企業体
- ⑥工 事 内 容

- (a) 泥土圧シールド工
 - 掘削外径 $\phi=5,240$ mm
 - 仕上内径 $\phi=4,250$ mm
 - 掘進延長 $l=2,390$ m



図-1 小田井貯留管計画平面図

- 最小曲線半径 $R=40\text{ m}$
- (b) 立坑工
 発進立坑（開削工法）1箇所
 取水人孔立坑（ケコム工法）1箇所
- (c) 補助地盤改良工
 発進防護工一式
 立坑底盤改良工一式
 急曲線防護工一式
 橋杭防護工一式

3. 土質概要

施工場所は濃尾平野の東部に位置し、庄内川と新川に挟まれた低地な地域であり、標高はTP+3 m前後で地下水はGL-2.0 m程度である。

ボーリング調査の結果、上位より盛土・埋土層、南陽層、鳥居松礫層、熱田層（上部・下部）、海部弥富累層が確認されている。このうち、当シールド工事の掘進対象地盤は鳥居松礫層（D5）が一部上部に出現するが、主に砂質土層を主体とした熱田層上部（D3U）である（図-2）。

・鳥居松礫層（D5）

土層は砂礫層（D5g）で構成される。N値=25～50以上を示す比較的良く締まった土層である。礫分は $\phi 5\sim 50\text{ mm}$ が多く、 $\phi 70\sim 100\text{ mm}$ 程度の玉石が混入している。

・熱田層（D3U）

粘性土層と砂質土層で構成され、砂質土層が優勢である。

粘性土層（D3Uc）はシルトやシルト質粘土で均質であり、N値=4～10を示す中位の硬さの土層である。

砂質土層（D3Us）は砂、礫混じり砂、シルト混

じり砂、シルト質砂であるが粘性土層をレンズ状に挟みながら比較的良く締まっている。N値は5～50以上を示し、値のばらつきが大きい。

4. テレスポークビット工法

(1) テレスポークビット工法の概要

テレスポークビット工法は、地下の高度利用や環境問題、コストダウンに伴い長距離化されてきた近代のシールド工事において重要なポイントとなるカッタービットをシールド機内より機械的に交換するシステムであり、株式会社大林組と三菱重工業株式会社によって共同開発された。

中口径以上のシールドを対象とし、場所や回数に制限なく、土質に応じたカッタービット交換が可能である。図-3、図-4に構造概念図および交換手順を示す。

(2) テレスポークビット工法実証実験

テレスポークビット交換装置の機能性、止水性、耐久性について検証を行うため、試験装置（実物大）を製作し三菱重工業株式会社神戸造船所内で(a)～(c)の項目について試験を行った。

(a) 回転シールの最適形状の選定試験

スポーク開口部に設けた止水シールがインナーチューブを180°回転させる工程（交換手順の図-4③参照）の際、開口部を一時的に通過するため切損する可能性がある。このため開口部に曲面加工、テーパ加工を施し、表-1の止水シール供試体を用いて摺動実験を行い、ビット交換における止水シールの適応検証を行った。

実験は止水シール部を0.8 MPaに加圧し、5回の摺動を行い表-2の結果を得た。

以上の結果より本装置の回転シール部に甲丸型の止

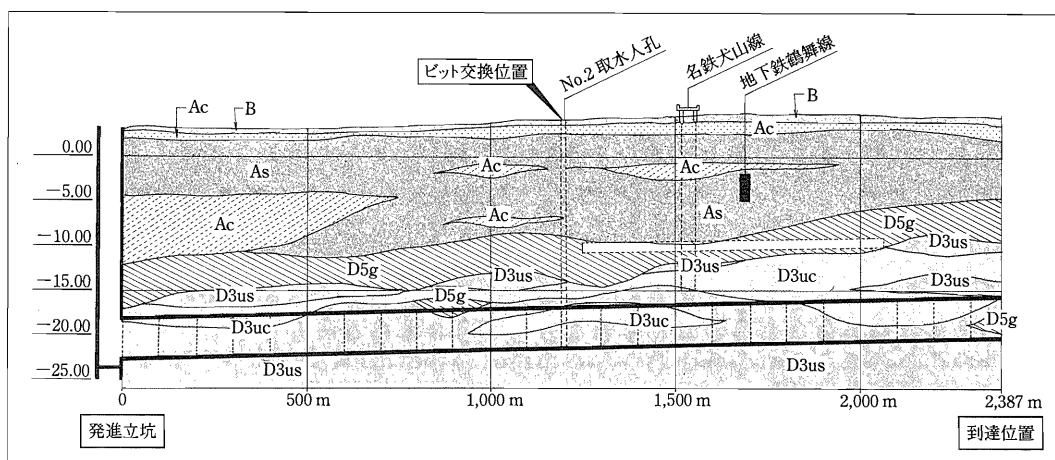


図-2 土質推定縦断面図

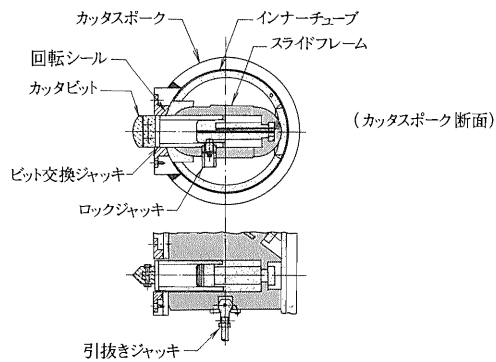
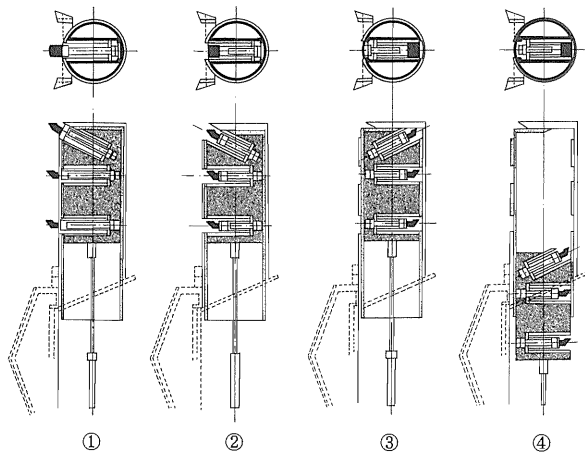


図-3 構造概念図



- ① 通常掘進状態
 - ② ロックジャッキ（縮み防止ジャッキ）解放，ビット交換ジャッキを縮めビットをスポーク内に引込む。
 - ③ インナチューブを180°回転，スポーク開口部を止水。
 - ④ 引抜きジャッキでスライドフレームをビット交換位置まで引込み，ビット交換を実施。
- ビット交換完了後④→①の工程で全行程完了。

図-4 ビット交換手順

表-1 止水シール供試体

供試体	略図(断面)	特徴
甲丸型		外部圧力に対しシールの弾性で止水。耐久性に優れる。
Oリング型		外部圧力に対しシールの弾性で止水。方向性を持たず複雑な形状に有利。
リップ型		外部圧力に対しリップ先端が圧力を受け接地圧で止水。高圧力に対し有利。

表-2 止水シール適性結果

供試体	結果	適性
甲丸型	開口部の面取り状態に関係なくシールの損傷は発生しない。摺動後の圧力も保持する。	◎
Oリング型	開口部の面取りをテーパ加工すれば損傷を防げるが、時間とともに圧力効果を認める。	△
リップ型	摺動面となるリップが開口部の面取りとは関係なく損傷する。	×

水シールを採用した。

(b) 機能性及び耐久性検証

表-3の条件で試験を行い、カッタビットに掘削抵抗を模擬した前面荷重及び、側面荷重を油圧ジャッキにて作用させ、清水にて1,000回、泥水にて19,000回の合計20,000回の負荷試験を繰返し実施し、耐久性を確認した。併せて、0回（大気中）、100回、1,000回、5,000回、10,000回、20,000回目にビット交換の一連の動作確認を実施し、耐久性と併せて機能性の確認をした。

表-3 試験条件

試験条件	
切羽状態	泥水（清水試験は止水性確認の為）
荷重作動状態	切羽圧力保持のため、荷重ジャッキは加圧、開放を繰返し、ストロークの伸縮は行わない。
荷重サイクル	加圧2秒、開放1秒の3秒サイクルを1回とする。

(c) 止水性検証

止水性の確認はカッタスポークとインナチューブ間及びインナチューブとスライドフレーム間の止水を確認するため、ビットを掘進状態とし耐久試験前、清水試験1,000回目、泥水試験5,000回目、泥水試験10,000回目に1MPaにて加圧封入し、時間の経過と保持圧の関係から止水性を確認した。経過時間による大幅な保持圧の変動を認めない結果を得た。

5. シールド機の概要

本工事で掘削に用いるテレスポークビット交換装置を搭載した泥土圧シールド機のシールド機外観とシールド機諸元を写真-1と表-4に示す。

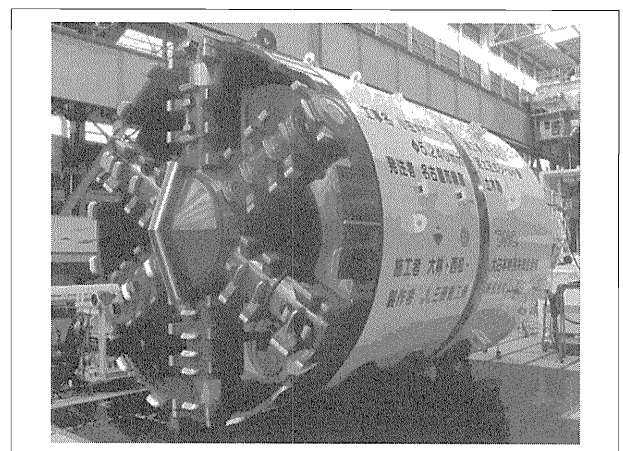


写真-1 シールド機外観

表-4 シールド機諸元

シールド機外径	φ5,240 mm
機長	6,910 mm
シールドジャッキ	装備能力：1,500 kN×16本 総推力：24,000 kN 全数伸び速度：0~7 cm/min ストローク：max 1,150 mm
中折れ装置	タイプ：後胴押し X 型球面中折 角度（テール視）：右 2.0°，左 6.5°，上下 0.5°
カッタヘッド	スポークタイプ：6本 開口率：50% カッタ支持方式：中央支持方式 駆動方式：電動駆動インバータ制御 (37 kW×10台) 駆動トルク：定格 2,835 kN・m MSD 機構（受入側） テレスポークビット交換機構 カッタ回転数：1.27 rpm

6. カッタビット交換装置の装備

本工事におけるビットの摩耗量とビット交換の必要性を土質、掘進距離、掘進速度より以下のように推定した。

(1) カッタビット摩耗量推定

摩耗係数を設定するにあたり、掘削路線の土質を均一な粘性土と砂質土の互層であると仮定し、設定摩耗係数表（表-5）より粘性土と砂質土の平均を本工事におけるビットの摩耗係数とした。

表-5 設定摩耗係数表

土質	摩耗係数* (×10 ⁻³)	掘進速度 (mm/min)
シルト・粘性土	12	30
砂質土	23	25

*土圧系掘削の場合、切羽添加材や切羽での攪拌具合により差が生じる。

ビットの推定摩耗量は摩耗量が最も大きくなると考えられる外周部のビットに対し下記の推定摩耗量計算式にて算出した。

$$\text{摩耗量 (mm)} = [\text{摩耗係数} \times \text{掘削距離 (m)} \times \text{最外周速度 (m/min)}] / \text{掘進速度 (mm/min)}$$

到達時における摩耗量推定を表-6 に示す。

表-6 摩耗推定量

施工距離 (m)	掘進速度 (mm/min)	最外周速度 (m/min)	摩耗係数 (×10 ⁻³)	摩耗量 (mm)
2,388	25	20.9 [#]	18	35.9

*カッタ回転数：1.27 rpm

限界摩耗量を 20 mm に設定したが、これに対して推定摩耗量が 35.9 mm となり、1 回の交換を要する結果となった。

(2) ビット交換装置の配置

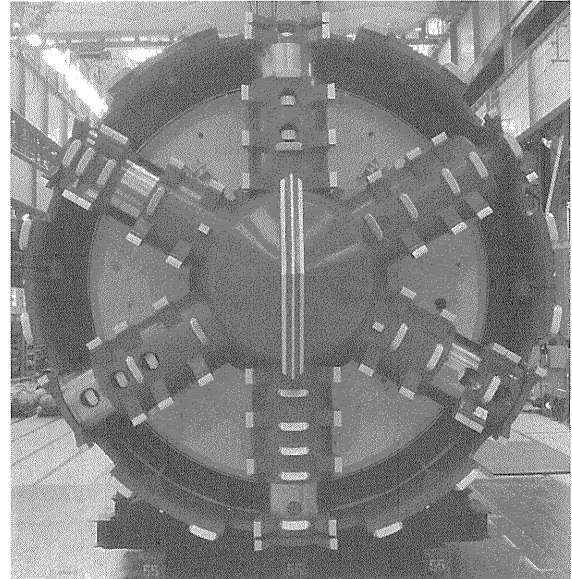


写真-2 テレスポークビット装置配置状況

当シールド機に写真-2のように奇数番号のスポークにテレスポークビット装置を配置し、No.1 および No.3 スポークに各3個、No.5 スポークに2個、合計8個の交換型ビット（写真白丸）を配置した。

7. ビット交換実績

(1) ビット交換工

ビット交換作業（写真-3）は、表-7 に示すように3日間（5.5方）にて実施し、人員配置は、カッタヘッド内で行う交換実作業に1名、道具の搬入・搬



写真-3 ビット交換状況 (No.1 スポークスライドフレーム引抜き、ビット交換時)

表一七 テレスポーク交換工程

	1日目		2日目		3日目	
	昼	夜	昼	夜	昼	夜
配線確認	●	●				
加泥管取外		●●				
ビット格納		●●				
No.3 ポークビット			●	●		
No.1 ポークビット				●	●	
No.5 ポークビット					●	●
ビット押出						●●
加泥管復旧						●●

出のために1名と、作業責任者1名の合計3名で実施した。直接的な交換時間は約37時間で、スポーク1本当たり約12時間程度で交換作業が完了した。

交換作業に多くの時間を費やした項目としてはスポーク引抜きジャッキの盛替え作業であり、スライドフレームの引込み、押出しに約9時間を要している。その他の作業は、ほぼ順調に行うことができた。

(2) ビットの摩耗

各ビットの摩耗状態は、表一八に示すように最外周を掘削するNo.1スポーク外側(トリムビット)で0.7mm、摩耗量が大きかったのはNo.5スポーク外側で4.0mmであった。

表一八 テレスポークビット摩耗係数実績

項目		平均摩耗量 (mm)	ビット取付け径 (mm)	摺動距離 (km)	摩耗係数 (×10 ⁻³)
No.1 スポーク	外	0.7	2,630	700.3	1.0
	中	0.3	1,780	474.0	0.6
	内	1.1	1,430	380.8	3.0
No.3 スポーク	外	1.6	2,305	613.8	2.6
	中	1.4	1,955	520.6	2.7
	内	1.0	1,605	427.4	2.3
No.5 スポーク	外	4.0	2,480	660.4	6.1
	内	2.9	2,130	567.2	5.0

No.1スポーク「外側」の摩耗量が少ない理由として、カッタ最外周には十分な高低差(60mm)をつけた12条の特殊先行ビットを採用したため、最外周の交換型ビットによる一次掘削が行われず、ほぐれた地山の二次掘削による摩耗であったと推定することができる。

比較的摩耗量が大きかったNo.5スポーク「外側」に関しては、この円周上を掘削する特殊先行ビットが一条掘削であり、かつ先端部でチップ量が他のビットのに比べて少ない(トリムビットと同様な斜め配置としている)ため先端部の一次摩耗によって他のビットと比較すると摩耗量が大きかったものと考えられる。

全般として実績摩耗係数は0.6~6.1×10⁻³となり、当初計画の18×10⁻³に対し約1/3の値となった。これは特殊先行ビットの配置と適切かつ十分な加泥注入の効果であると推測できる。



写真一四 ビット摩耗状況

8. おわりに

約1,250mの掘進後、テレスポークビット交換工事を予定通り完了したが、この装置ゆえの比較的太いスポークを有するカッタ装置による掘進もほぼ順調に安定した状況であった。今回はコストおよび環境面からテレスポークビット工法を採用したが、工程面あるいは数字となって表れない安全面において大きく寄与できたものと考えられる。

交換回数に制限のない機械式ビット交換装置は種々考案され、実証されているが、テレスポークビット工法は当工事のように機械式地中接合法(MSD工法)との併用が可能というメリットがある。今後更に長距離化されてくるシールドトンネルの構築や、土質条件の厳しいシールド工事などの問題解決策として採用の機会が増えるものと期待する。



【筆者紹介】



磯村 繁樹 (いそむら しげき)
株式会社大林組
名古屋支店
小田井シールドJV工事事務所
副所長



山本 裕三 (やまもと ゆうぞう)
株式会社大林組
東京本社
土木技術本部
技術第二部