

矩形シールドの開発

Development of Rectangular Shield

川 合 一 成
Kazunari Kawai
南 敬
Takashi Minami

最近のシールド工事においては、コスト低減や合理化を目指した種々の工法が提案され、実用化されている。矩形断面シールドもそのひとつであり、円形断面に比べて掘削断面の縮小化やトンネル内空間の有効利用などが図れるため、様々な機構が開発され、実工事に適用されている。コマツにおいても3台の製作実績を有し、特に3号機は国内最大の矩形シールドである。本稿では新しく開発した矩形断面掘削機構やセグメントエレクタを中心に紹介する。

Various shield tunneling methods have been introduced and applied practically in recent years for reduction of cost and rationalization. The rectangular shield is one of the machines for those methods. Since a rectangular-section tunnel needs less boring area and the space in it can be utilized more compared to a circular-section tunnel, various mechanisms of the rectangular shield have been developed and applied to practical works. Komatsu has also manufactured three rectangular shields. The shield No. 3 is the largest rectangular shield in Japan. In this paper, the rectangular tunneling mechanism and segment erector which we have newly developed are mainly introduced.

Key Words: Rectangular Section, Rectangular Shield, Wagging Cutting, Overcutter, Erector, Position Control

1. はじめに

矩形断面シールドは、これまでに多円式、偏芯多軸式、偏芯2軸式、円筒式など様々な掘削機構が開発され、実工事に適用されている。コマツでも「揺動式カッタヘッド」と「オーバカッタ」を組み合わせた矩形断面掘削機構や、矩形セグメント対応多自由度セグメントエレクタを開発している。表1にコマツで製作した矩形シールドの実績を示す。製作にあたっては、実施工で判明した改善点の織り込みや、新機構の開発を行っており、順次進化を遂げている。以下、3号機を主体に矩形シールドの特徴を説明する。

2. 矩形シールドについて

矩形シールドは以下に示す施工費低減のニーズに対応させるために開発された。

- ① 工事上の制約(占有幅、土被りなど)下での施工
- ② 掘削土量の低減
- ③ トンネル断面利用の合理化(図1参照)

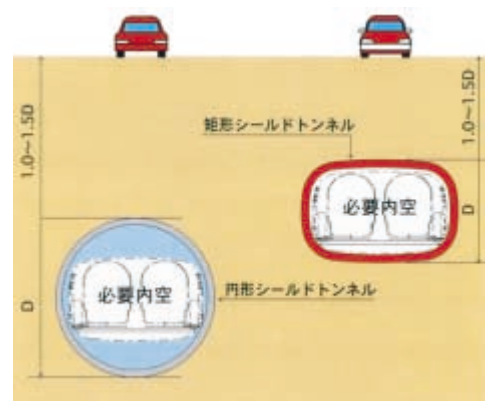
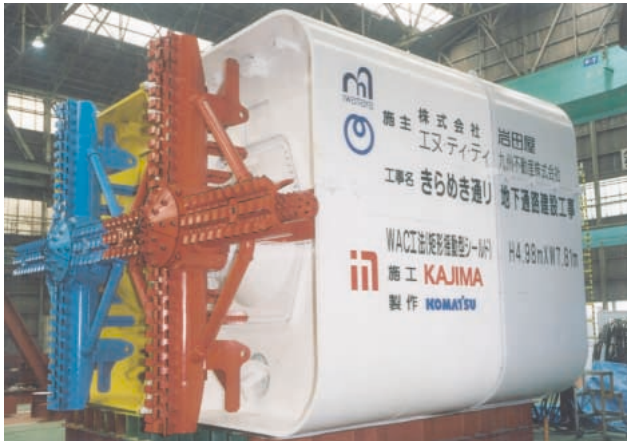


図1 矩形と円形の比較

表1 コマツ製矩形シールド一覧



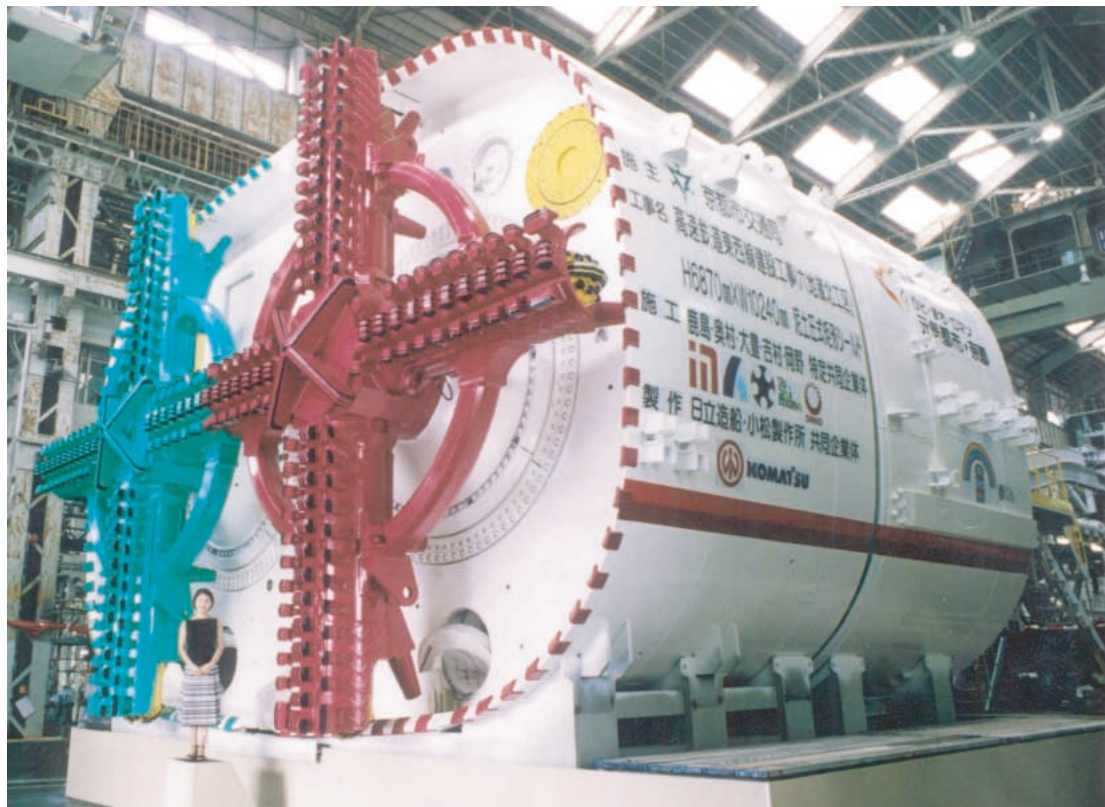
1号機 (TK781PMX-1)

シールド外径	幅 7810 mm × 高さ 4980 mm
工事場所/用途	福岡市 / 地下通路
掘進距離/土質	117 m / 砂質土
装備能力	総推力 41160 kN, トルク 2813 kN·m
稼動期間	1998.05 ~ 1998.08



2号機 (TK490PMX-1)

シールド外径	幅 4900 mm × 高さ 4300 mm
工事場所/用途	京都市 / 地下河川
掘進距離/土質	90.7 m / 礫質土
装備能力	総推力 26460 kN, トルク 4944 kN·m
稼動期間	2000.10 ~ 2001.01



3号機 (TK1024PMX-1)

シールド外径	幅 10240 mm × 高さ 6870 mm	装備能力	総推力 77450 kN, トルク 10025 kN·m
工事場所/用途	宇治市~京都市 / 地下鉄	稼動期間	2002.03 ~ 2003.03 (予定)
掘進距離/土質	759.6 m / 礫質土		

シールドが地中にトンネルを構築するために必要な工程は、概略以下の4工程になり、各々対応する機能(装置)を有する。(図2参照)

- ①掘削：地山を掘削する工程 …………… (カッターヘッド)
 - ②推進：シールドを地中で姿勢制御し、前進させる工程………… (シールドジャッキ、アーティキュレートジャッキ)
 - ③排土：掘削した土砂を機内に取り込み、地上まで搬送する工程 …………… (スクリュコンベヤ)
 - ④覆工：地山保持と推進反力受けの役割を果たすセグメントを組み立てる工程 …………… (エレクタ)
- 通常①～③は同時に行い、その後④を実施するサイクルを繰り返す。

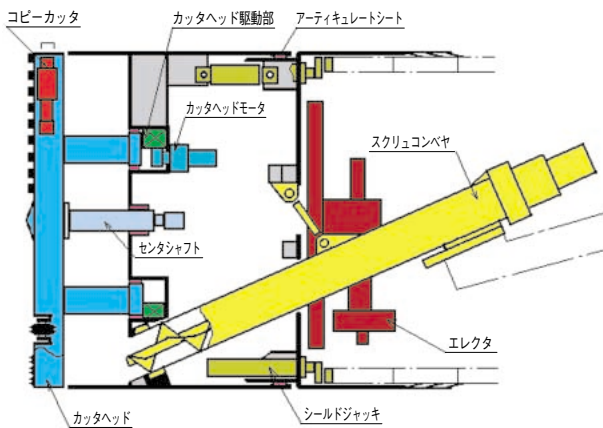


図2 シールドの装置構成

矩形シールドにおいては、従来の円形シールドに対し、①掘削、④覆工において異なる対応が必要であると考え、これらを矩形シールドの開発課題と位置付けた。

3. 矩形シールドの開発

3.1 矩形断面掘削

1) 揺動式カッターヘッド

〈考案の背景〉

土砂の掘削には回転運動を用いることが最も効率的である。しかし、矩形断面掘削において、図3-(a)に示す回転式カッターヘッド(=連続回転運動するカッターヘッド)を適用すると、広範囲に渡り掘り残し(斜線部)が生じる。これは、回転式カッターヘッドではスポーク長さが同一であることが条件となるためである。

一方、揺動式カッターヘッド(=所定角度を揺動回転運動するカッターヘッド)を適用すると、スポークごとに揺動範囲に応じて長さを設定できるため、回転式カッターヘッドに比べて実用上問題ない程度に掘り残しが低減される(図3-(b)参照)。なお、掘り残し部は図4に示すオーバカッターで掘削する方式とした。

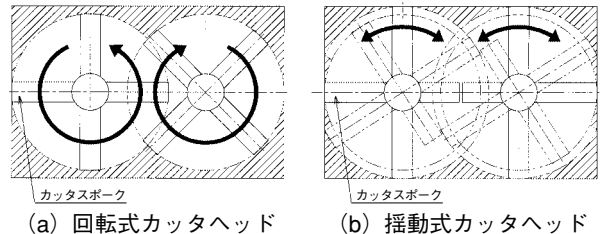


図3 掘削断面比較

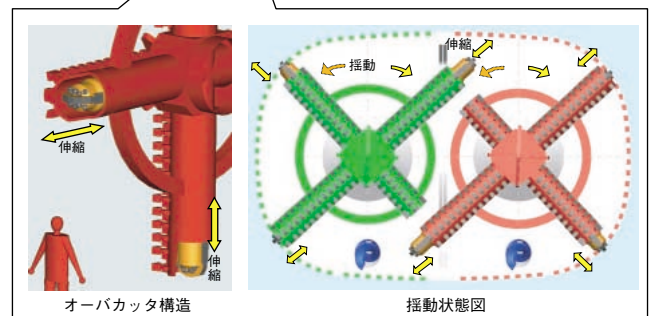
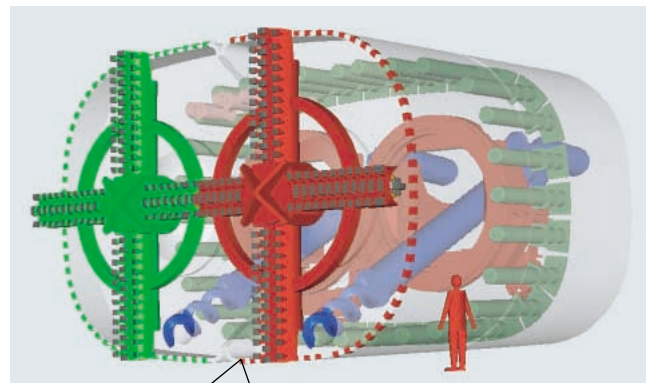


図4 3号機の揺動掘削状態

〈ジャッキによるカッターヘッド駆動〉

また、揺動式カッターヘッドではカッターヘッドを全回転する必要がなく、トルクアームを介したジャッキの伸縮による駆動が可能であり、従来の「モータ+ギヤ駆動」による高精度な構造に対し、ジャッキとピンで構成されるシンプルな構造とすることができる。(図5参照)

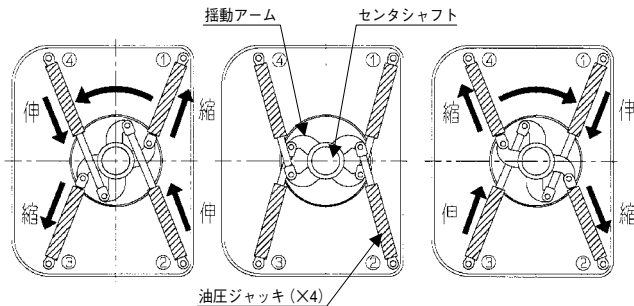


図5 揺動駆動状態

〈装備トルクの考察〉

しかし、回転式カッターヘッドが出力トルク一定なのに対し、揺動式カッターヘッドでは式1に示すように揺動角度ごとに出力トルクが変化する。

$$T = R \times F \cos \theta \dots\dots (式1)$$

$$(\theta = 90^\circ + (\beta - \alpha))$$

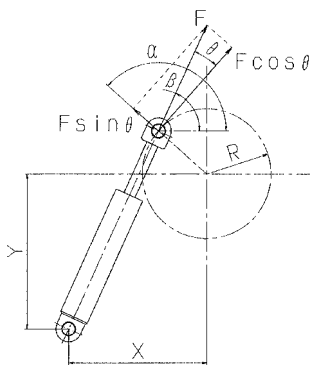


図6 揺動ジャッキトルク計算基本図

従って、図5に示すジャッキ配置では、図11に示すように揺動角度の増加に伴って発生トルクが低下し、揺動反転時に最小となる。一方、揺動角度の増加に伴い掘り残し部を掘削するオーバカッターのストロークが伸びるため、所要トルクは揺動反転時に最大となる。以上より、本ジャッキ配置では揺動反転時にトルク不足となる傾向があり、特に高トルクを必要とする土質では留意しなければならない。

〈アシスト方式考案の背景〉

上記問題を解決するために、2号機以降はアシスト方式による揺動システムを採用した。3号機のジャッキ配置を図7に示す。

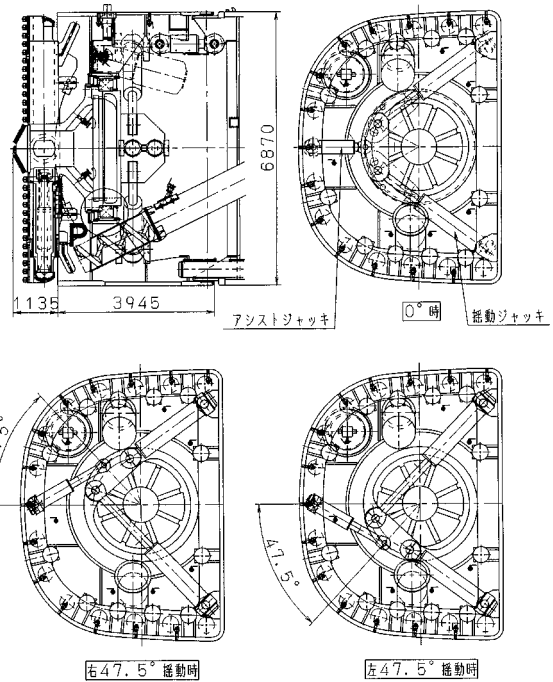


図7 3号機の駆動部

本方式では揺動ジャッキを2本とし、新たに揺動角度中立時にジャッキ中心線がカッターヘッド回転中心を通るアシストジャッキを複列配置とした。アシストジャッキによる発生トルクは揺動中立時に0、揺動反転時に最大となる。ジャッキの制御方法を以下に示す。(図7参照)

- ① 揺動中立から左右に所定の揺動角度(例えば±15°)以内では揺動ジャッキのみでカッターヘッドを揺動させる。(アシストジャッキは油圧回路上は中立状態)
- ② 上記揺動角度を超えた範囲では、アシストジャッキに加圧し、揺動ジャッキによるトルク低下分をアシストする。3号機では2本のアシストジャッキの加圧を2段階で行い、揺動角度の増加に伴いトルクが増加する特性とした。

なお、左右のカッターヘッド干渉防止のため、揺動角度が5°以上ずれた場合は停止するインタロックを設けた。

〈装備トルクの計算〉

アシスト方式による3号機のトルク特性を図8に示す。

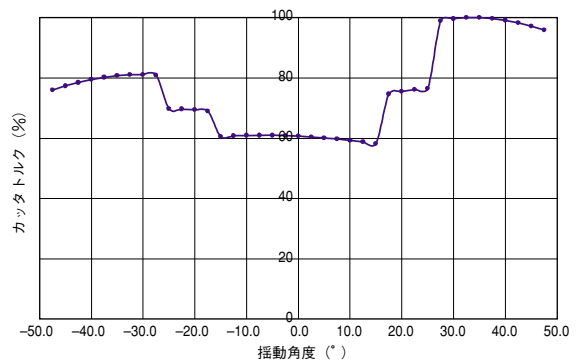


図8 トルク特性(3号機)

なお、参考として1号機、2号機の駆動部を図9、図10に、トルク特性を図11、図12に示す。

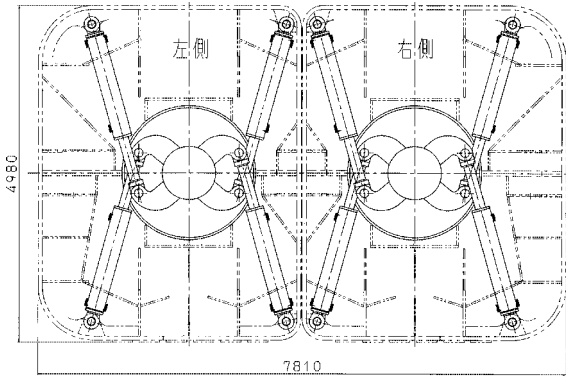


図9 1号機の駆動部

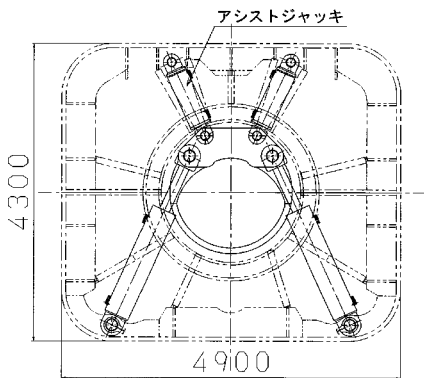


図10 2号機の駆動部

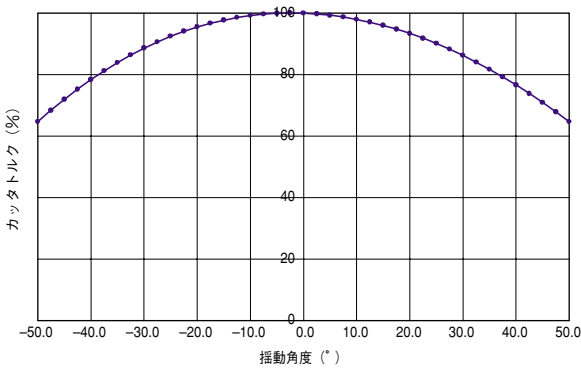


図11 トルク特性 (1号機)

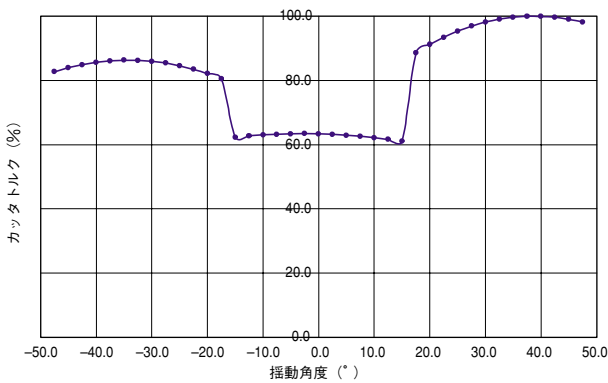


図12 トルク特性 (2号機)

2) オーバカッタ
〈オーバカッタの機構〉

前述したように、揺動式カッタヘッドは回転式カッタヘッドに比べて掘り残しは少ないが、同部を補助装置により掘削する必要がある。新しく開発した掘削機構では掘り残し部はオーバカッタ(図13参照)にて掘削を行うこととした。オーバカッタは、カッタヘッドの揺動角度に合わせて油圧ジャッキを伸縮させ、その先端部のカッタにより矩形断面の外形線に沿って掘削する方式とした。

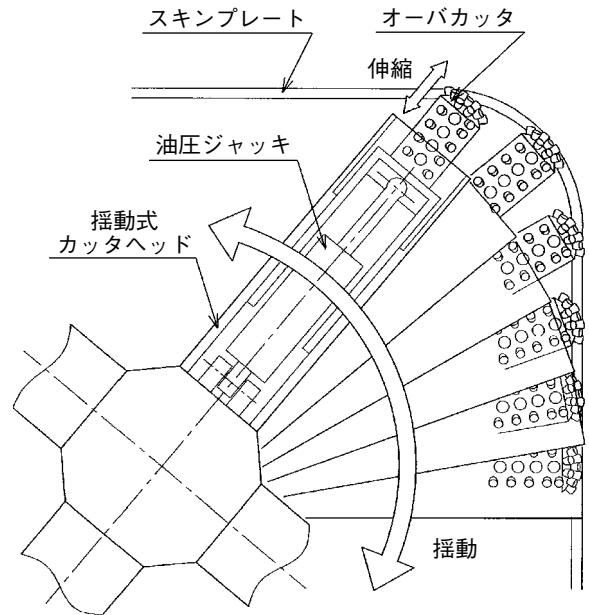


図13 オーバカッタ作動状態

〈オーバカッタのストローク制御〉

ストローク制御は、油圧ジャッキ伸縮量を揺動角度に連動させて自動制御する方式とした。この制御部の構成を図14に示す。

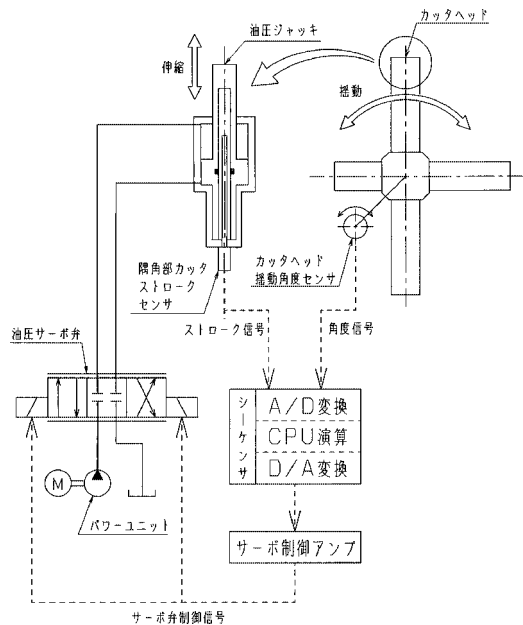


図14 オーバカッタ制御部構成

制御部は、オーバカッタストロークセンサ、カッタヘッド揺動角度センサ、シーケンサ、油圧サーボ弁、サーボ制御アンプなどから構成されている。オーバカッタストロークは

- ① 揺動角度に応じたストローク目標値
- ② オーバカッタストローク計測値

のデータと油圧サーボ弁によるフィードバック制御とした。なお、ストローク目標値の設定方式としては

- ① 逐次計算方式(揺動角度からリアルタイムで計算)
- ② マップ方式(揺動角度に対応する値を読取り)

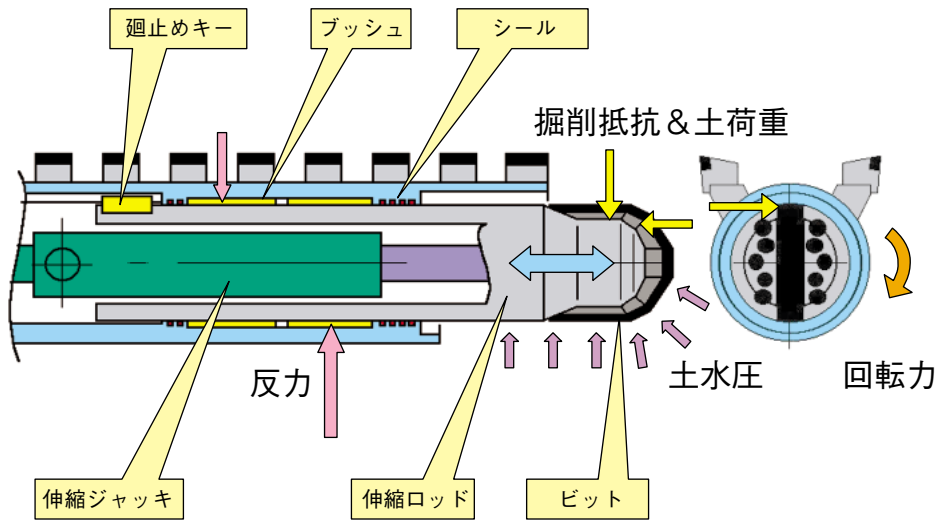
があるが応答性向上の観点から②マップ方式を採用して

おり、オーバカッタストロークは目標ストローク値に対し、20mm 以内の精度に抑えることが可能である。

<長距離掘進対応>

3号機の掘進距離は、1,2号機に対し、約7倍であり、オーバカッタの総伸縮回数は8万回にもなる。このため、実機製作に先立ち、ロッド摺動部や土砂シールについて実寸モデルによる耐久試験を実施した。試験では土砂と水を充満した圧力容器内で模擬スポークに想定荷重を負荷して10万回の摺動を実施し、摺動部や土砂シールの損耗について異常のないことを確認した。

(図15, 図16 参照)



$$\text{オーバカッタ荷重} = \text{切削} \cdot \text{貫入抵抗} + \text{ずり掻上げ力} + \text{土圧摩擦抵抗} + \text{玉石掘起し力}$$

図15 オーバカッタの想定負荷

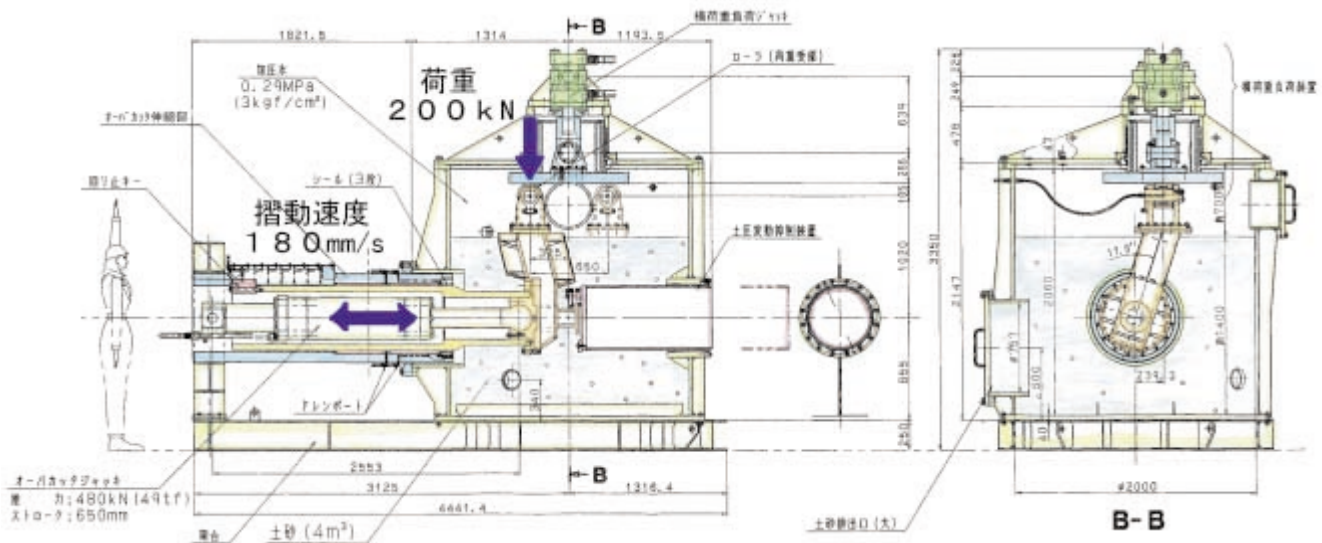


図16 オーバカッタ試験装置

結果を図17、図18に示す。ブッシュ、ロッドの摩耗や土砂シールの耐久性は問題ないことが確認できた。また摺動部の潤滑油循環システムを図19に示す。

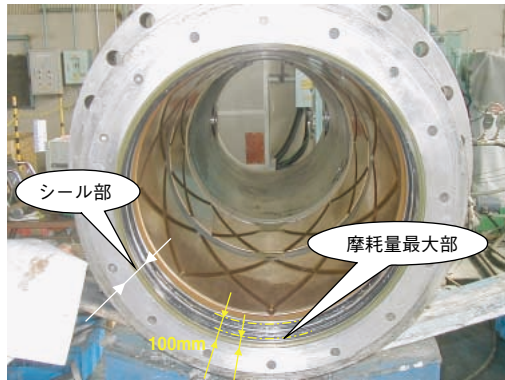


図17 10万回摺動後のブッシュ

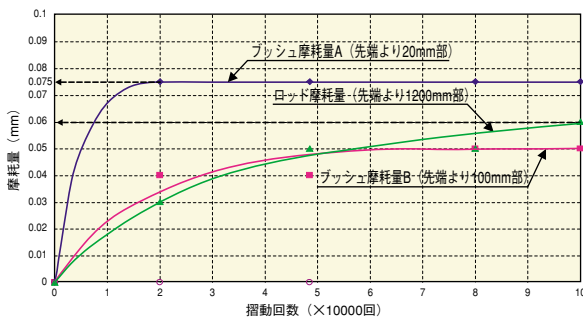


図18 摩耗量グラフ

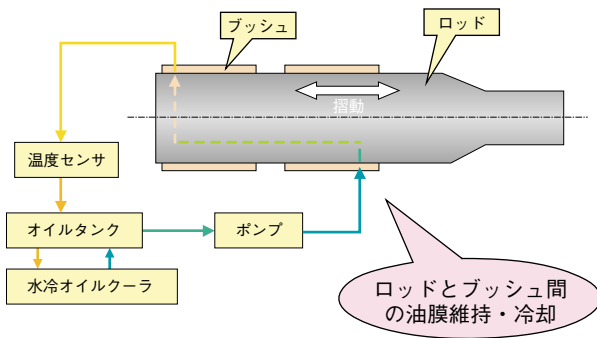


図19 摺動面の潤滑油循環

3.2 覆工 〈左右摺動と屈曲の追加〉

円形シールドではセグメントが円弧状であることから、エレクタの自由度は①旋回、②半径方向伸縮(図20参照)の装備が基本となる。しかし、矩形シールドではセグメントがコーナ部のL字形、平坦部のフラット形など部位によって異なるため、上記2自由度だけでは組み立てできない。さらに、3号機では1ピース当り質量は最大7tにもなり、エレクタ剛性、強度を十分に確保する必要があった。

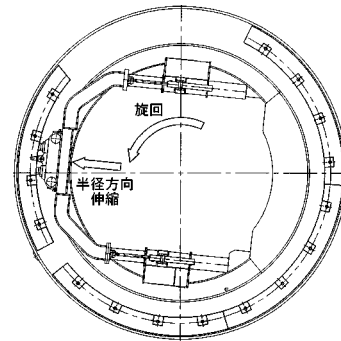


図20 円形セグメントの組立

そこで、通常エレクタに対し3号機では、

- ① エレクタヘッドを門型フレーム上で左右に摺動、屈曲できる機能
- ② 前後摺動と左右微摺動の微調整機能
- ③ 直動軸受けによる剛性向上と摺動抵抗低減

を織り込み、次ページ図23に示す6自由度を有する構造とした。

〈覆工試験実績〉

シールドの工場組立完了後、実工事用セグメントを用いて組立試験を実施した。(図21参照)

組立時間は2時間/リングであったが、事前のサイクルタイム検討結果と現場での作業習熟度向上から30~40%の時間短縮が可能と考えている。



図21 セグメントの組立試験 (図24の手順11に相当)

〈1, 2号機のエレクタ〉

1, 2号機で組み立てたセグメントは軽量である(3号機の約1/7)ため、エレクタは装置の小型化が可能な片持式を採用した。(図22参照)

1号機は1時間/リング以内、2号機では40分/リングで組立可能なことが確認できた。

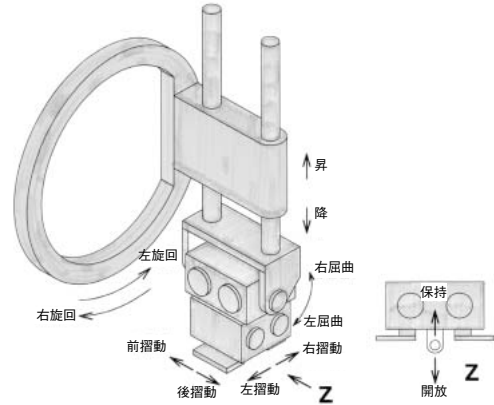


図22 1, 2号機のエレクタ (片持式)

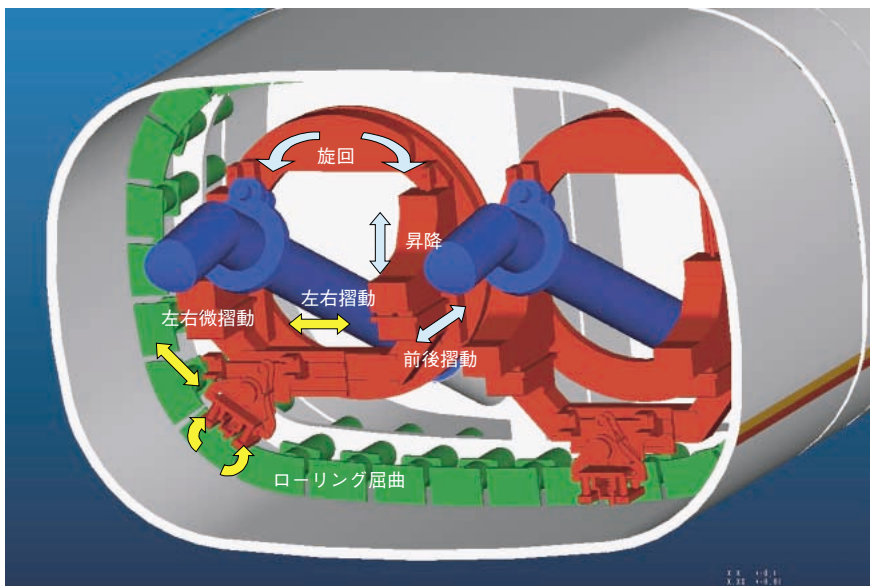


図23 3号機のエレクタ (門型)

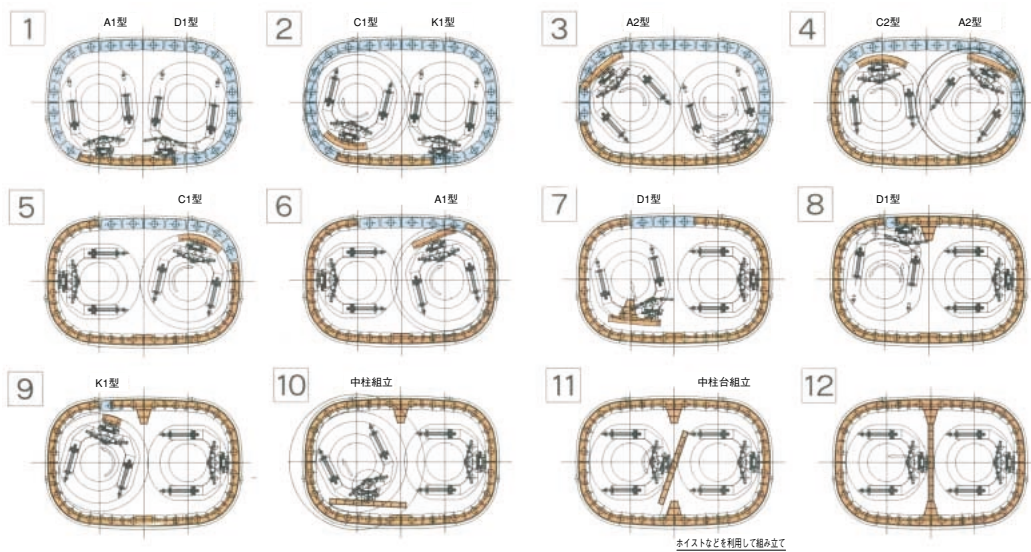


図24 矩形セグメントの組立手順例 (3号機, 分割数15の場合)

4. おわりに

本稿で紹介した3台の矩形シールドは、1号機と2号機はすでに工事を完了し、何れもユーザより高い評価を得ている。また、3号機は現在現地組立工事が順次進行しており、来春から施工予定である。今後とも、これまでの経験や技術を生かして、工事条件やユーザ要望に合致したシールドを提案、提供できるよう努めていきたい。

筆者紹介



Kazunari Kawai

かわい かず なり

川合一成

1982年、コマツ入社。

現在、地下建機事業本部トンネル機械事業部技術部所属。



Takashi Minami

みなみ たかし

南敬

1992年、コマツ入社。

現在、地下建機事業本部トンネル機械事業部技術部所属。

【筆者からひと言】

このようなプロジェクト物件の受注開発は、お客様のニーズに対する技術提案や、それを支える先行要素開発などが受注の武器となります。また、限られた開発期間の中での取り組み、加えて一台ごとの損益管理などしんどいところもありますが、完成・到達した時の達成感はシールド屋冥利につきます。これからも施工方法を含めた技術提案、開発を行っていきます。