

揺動カッタで掘る地下鉄複線断面 矩形シールドの計画と実績

溝田 正志¹・中尾 努¹・菅 一也¹・福田 昌弘²
永森 邦博³・川合 一成⁴

¹正会員 ²非会員 鹿島関西支店（〒550-0011 大阪市西区阿波座1-3-15）

³非会員 鹿島機械部（〒107-8388 東京都港区元赤坂1-2-7）

⁴非会員 コマツ地下建機事業室（〒923-8666 石川県小松市八日市町地方5）

京都市営地下鉄において、世界初となる複線断面の矩形シールド工事が行われた。よく締まった砂礫地盤中を760m掘進するもの。同工事では異型断面の掘削が行える工法として、揺動運動する回転カッタ（以下揺動カッタと略称）を装備した「Wagging Cutter Shield工法」が採用された。

本文では、密閉型で非円形シールドの実績・現況を紹介すると共に、今回採用された「Wagging Cutter Shield工法」の概要や京都地下鉄でのシールドの計画とそこでの課題や実際の対策を取りまとめた。また、同シールドは2002年 2月19日から掘進を開始し、同年11月28日に到達したが、この間の施工実績と評価等について取りまとめた。

キーワード： 鉄道トンネル、シールド、矩形断面、揺動カッタ、砂礫地盤

1. はじめに

密閉型シールドで扁平な矩形の断面を掘削した事例は少ない。地下鉄複線断面への適用は今回が初の事例¹⁾となった。本工事では、矩形であることに加え、中柱の無い渡り線部と中柱のある一般線路部とを一体施工すること、よく締まった砂礫地盤中を760m掘進すること、が主な特徴と言える。

今回京都地下鉄工事で採用された揺動カッタ方式のシールド（Wagging Cutter Shield）工法は、カッタヘッドを一定の角度内で揺動運動（＝Wagging）させながら掘進するもので、隅角部は余掘り装置（オーバカッタ）を用いる。

本報文では、密閉型で非円形シールドの実績を紹介すると共に、京都地下鉄工事の計画を通して揺動カッタ方式採用のメリットや課題への対処方法、その他矩形シールド特有の事象への対処方法などを報告する。

2. 工事概要

高速鉄道東西線・六地蔵北工区工事は、六地蔵駅の北端に発進立坑（延長21.21m）を構築した後、石田駅までの760.79m間を矩形シールドで施工する。シールド区間のうち渡り線部が57m、一般線路部は704mとなっている。トンネルは地下水の豊

富な沖積～洪積砂礫層中に位置し、土被りは8～14mである。地下水位は、GL-3～-6mに分布する。

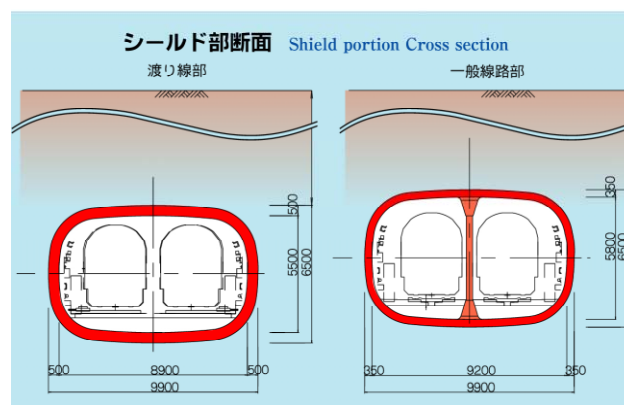


図-1 渡り線部及び一般線路部のトンネル形状

3. 密閉型で非円形シールドの実績

密閉型で非円形シールドの実績一覧を図-2に示す。

過去の事例は今回の京都市の事例を含めても18件で、扁平率が大きな事例は半分、扁平で中柱が無い事例は4件に過ぎない。これらは主に覆工に関する制約があるためであろう。

シールド工法は、「泥土圧式」の事例が多い。多軸、揺動、オーバカッタ、偏心カッタ、偏心多軸、

円筒ドラム等様々な掘削機構が採用されているが、「泥水式」では標準となっている面盤を配置することが難しく、結果スポークタイプのカッタで対応できる泥土圧式が主流となっている。一方で、泥土圧式では円形に比較して複雑となる掘削機構の信頼性やビット・カッタ類の磨耗対策が課題で、実績から見ても砂礫地盤での長距離掘進事例は無い。

状への適用が可能である。オーバカッタとの併用で更にカバーできる範囲が広がる。

京都地下鉄の事例で見た場合、当初の複円形断面¹⁾に比較して横幅や高さを任意に変更できる特徴がある。空間の制約がある場合に有利である。

幅の縮小例

高さの縮小例

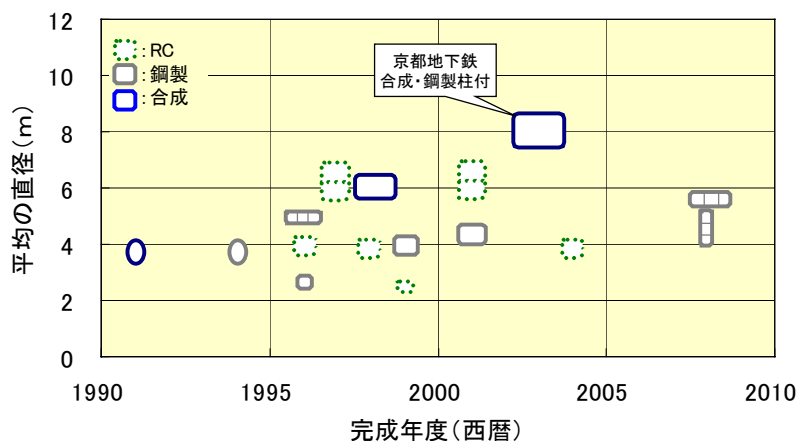


図-2 密閉型+非円形シールドの実績一覧

4. 揺動カッタ

Wagging Cutter Shield工法の概要

(1) 掘削機構

揺動式カッタの駆動には油圧ジャッキを使用する。この結果シールド機内の機器を簡素化でき機長も短くなる。更に非円形断面では各々の主カッタスポーク長を最適の長さにすることが可能で、主カッタでカバーできる範囲が広がる。これはオーバカッタへの負担軽減になる。

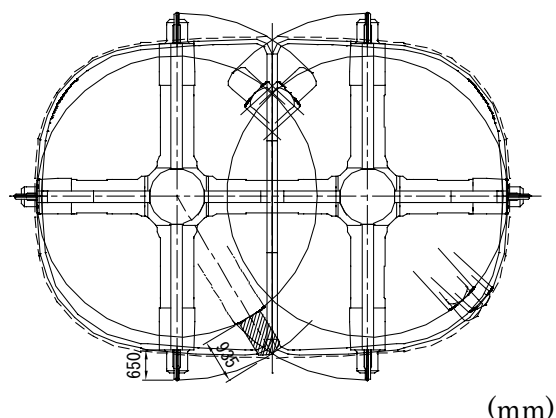


図-3 揺動一回転カッタの余掘り量比較

(2) 工法の適用範囲

同方式は、複数の回転カッタを平面に配置しても相互の干渉を防止できることから様々な断面形

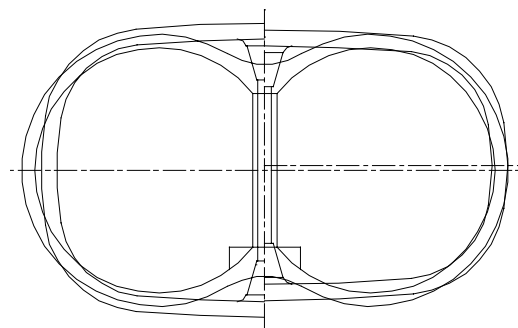


図-4 矩形-複円形の断面比較
鉄道トンネルの場合

一方で、主にセグメント組立の制約から円形ではセグメント外径φ2m程度、矩形ではセグメント外形2.5×2.5m程度が最小断面となる。土質に関しては泥土圧シールドで適用可能な地盤条件はおおむね適用可能であるが、玉石層や、軟岩ではオーバカッタにローラビットが配置できない等の理由から円形以外の断面への適用は施工条件の十分な検討が必要となる。

5. Wagging Cutter Shieldの計画、課題と対策

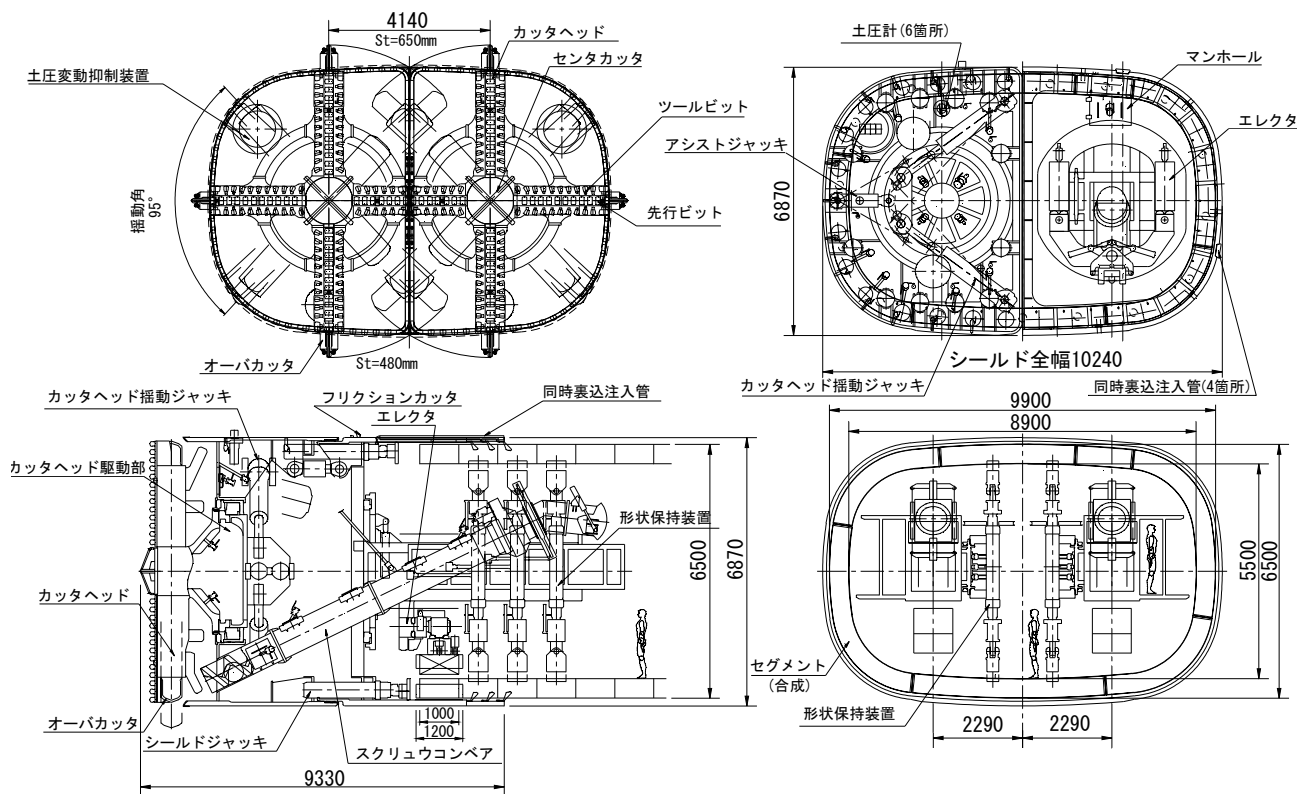
使用したシールドの全体組立図と仕様を図-5、表-1に示す。

(1) 揺動カッタのトルク

一般に砂礫地盤を対象にした外径7mクラスでの円形泥土圧シールドのカッタトルクは、トルク係数 $\alpha = T/D^3 = 20 \sim 25$ (T : カッタトルク・kN・m, D : シールド外径) であるが、矩形で揺動方式の場合は以下の配慮が必要となる。

- ① カッタ反転時の起動トルクが作用する
- ② オーバカッタの伸縮でDが変化し、更に伸びる際の切削反力がかかる
- ③ 揺動エンド（反転前）近傍で出力トルクが低下する

①については、反転時ビットの切込み深さが最小となる（トルクが低下する）ため考慮せず、②、③についてアシストジャッキ（図-5）を採用することでピーク時のトルクを上げることとした。



図－5 京都地下鉄矩形シールドの全体組立図

表－1 矩形シールド仕様一覧

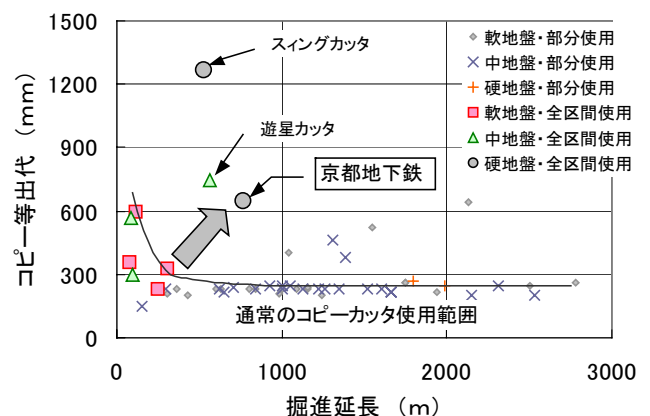
本体形式	泥土圧式矩形シールド, Wagging Cutter Shield 工法
外形寸法	高さH6,870×幅W10,240×機長L9,330mm
推進装置	総推力77450kN {7900tf (125.4tf/m ²)} = 2940kN×8本 + 2450kN×22本
中折れ装置	シールドジャッキ後胴支持方式, 上下中折れ型, 中折れ角度±1度
カッタ構造形式	ツインカッタ方式 面板部…開放形, 支持部…センタ支持方式
カッタ駆動部	油圧揺動駆動式, 揺動角: 95° 揺動ジャッキ (3432kN) × 2本 + アシストジャッキ (1961kN) × 2本, 常用時 4865～8020kNm ($\alpha = 19.4 \sim 26.4$)
オーバカッタ	490kN { 50tf } × 650st 2基 (上下用), 470st 1基 (左右用)
スクリュコンベヤ	リボンスクリュ, 羽根径×ピッチ×スクリュ長=φ700×650×9000mm
エレクター	旋回, 昇降, 前後揺動, 左右揺動, 屈曲, 微揺動, 振止
形状保持装置	上下拡張式×2本組・3列拡張力, 拡張量: 1961kN {200tf} × 500mm
同時裏込注入装置	A・B液先端混合 (2ショット) 方式4基 (上部2箇所 + 左右各1箇所)

(2) 隅角部のオーバカッタ構造

切羽中央付近でのオーバカッタの計画伸び量は650mmとなった。

過去ストロークの長いオーバカッタ類の実績は少なく, 更にオーバカッタを砂礫地盤で長い区間使用した事例はほとんど皆無の状況にあった。(図－6 参照)

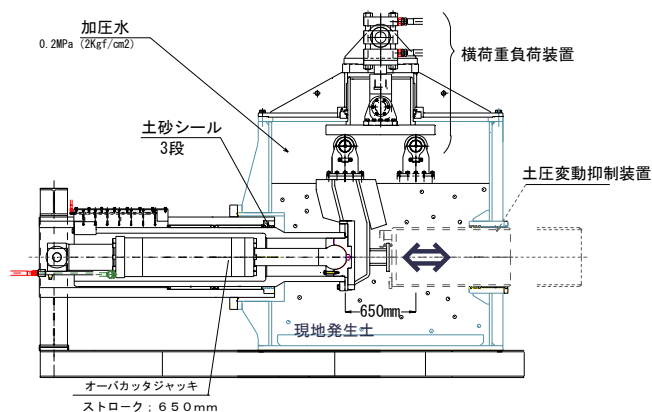
このため実績を基にオーバカッタを設計・試作²⁾し, 実工事に近い環境下で耐久性確認実験を実施した。実験条件と判定基準を表－2に, 装置の全景を図－7に示す。



図－6 長尺のコピー・オーバカッタ実績

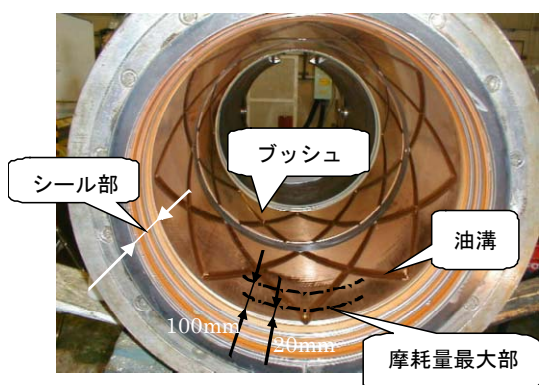
表－２ オーバカッタ耐久性確認実験条件

項目	試験条件	判定条件
作動の雰囲気	0.29MPa 加圧泥土	①ブッシュ部 へたり 1mm 以下 土砂進入無し ②キー部へたり 3mm 以下
地山切削時の横荷重	196 kN	
摺動ストローク	0～650mm	
摺動速度（設計）	180mm/s	
耐久回数	8～10×10 ⁴ 回	

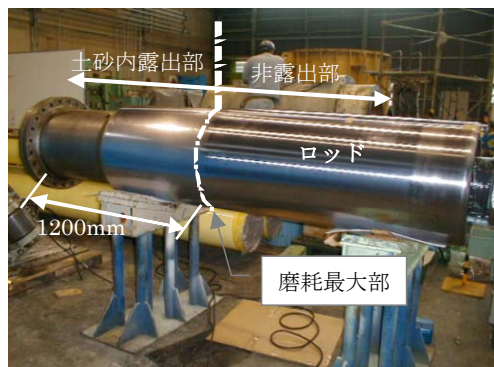


図－７ オーバカッタ耐久性確認実験装置

実験が終了した後のジャッキ摺動部の磨耗状況を写真－１，２に示す。



写真－１ ブッシュ部分の磨耗

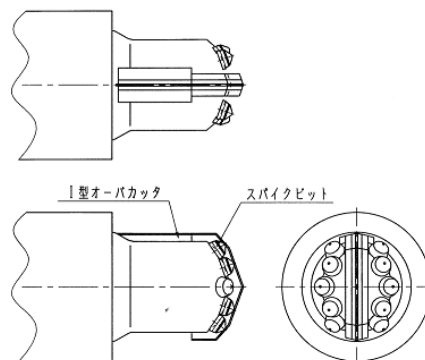


写真－２ ロッド部分の磨耗

予想を超える磨耗やシール損傷も無かったため、給脂方式をオイルバス方式に決し製作に着手した。

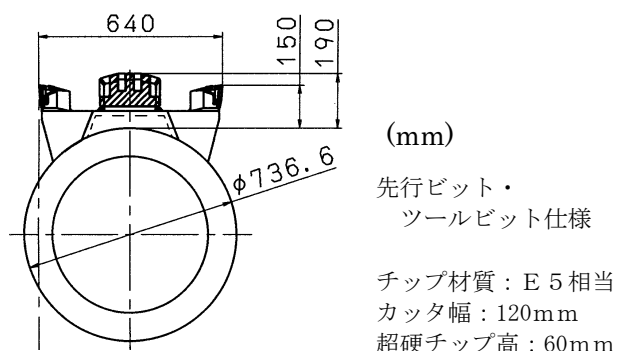
(3) カッタビット

揺動カッタ方式では、カッタスポークが各々単独で１つの領域を掘削する。更にオーバカッタ部分では伸縮作動に伴い、掘進方向、揺動方向、半径方向の３次元的な掘削を受け持つ。オーバカッタでの各ビットの配置と形状を図－８に示す。



図－８ オーバカッタ先端のビット配置

主カッタでは先行ビットとツール（シールド）ビットを１パスで組合せ、オーバカッタでは側方と先端部にビットを、その周囲にビットを配置した。各ビットは砂礫層中での磨耗を考慮し、大型にしている。

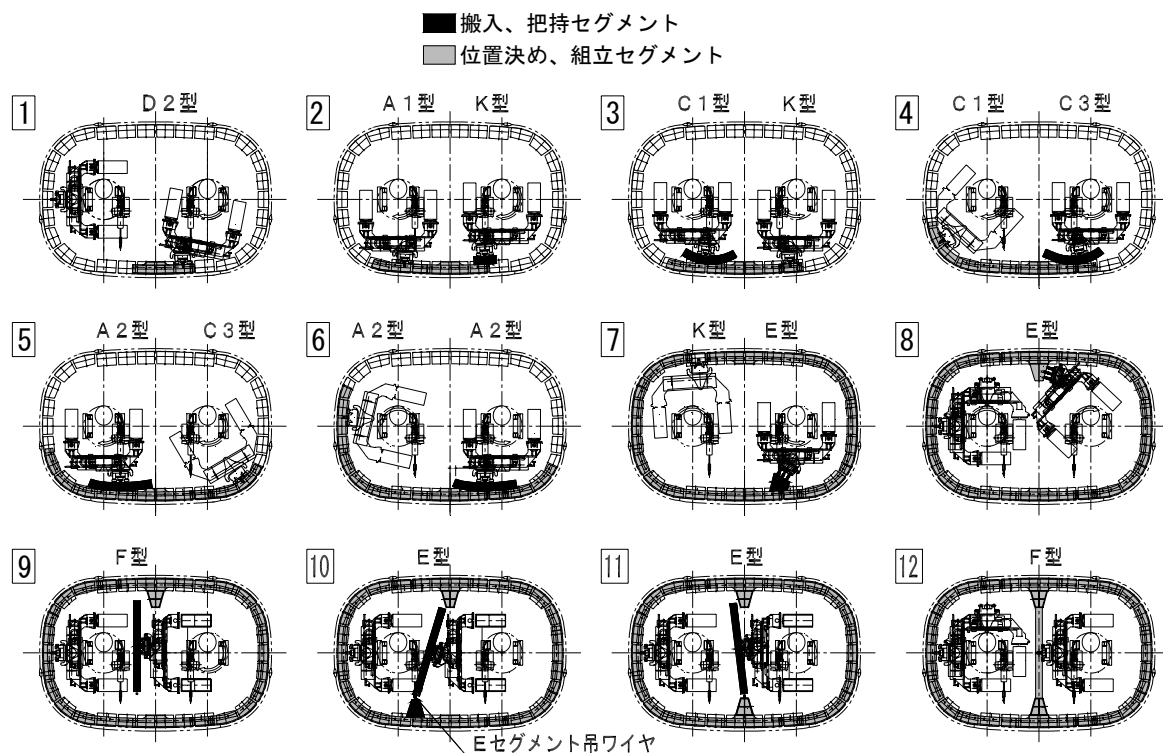


図－９ 主カッタでのビット配置

(4) エレクタ

渡り線部、一般線路部と形の異なる２種類の矩形セグメントに対処するため、６軸を制御できるエレクタを新たに開発した。隅角部のセグメントに対し「左右摺動」、「ローリング屈曲」などの機能を付加している。

比較的複雑なDCセグメントの組立手順を図－１０に示す。



図－１０ DCセグメント組立手順図

(5) 形状保持装置

中柱の無い合成セグメントでは裏込めなどの施工時荷重による初期変形を抑え、更にその後の変形（中央部での設計つぶれ量が25mm）を形状保持装置6基で馴染ませる計画とした。仕様を表－１に記載した。

(6) 添加材の注入

揺動カッタ方式では、カッタスポークが各々単独で1つの領域を掘削することになるため、添加材注入口もカッタスポークに各々1個所ずつ設置した。注入系統もカッタ中央部とスポーク部とを各々独立させ、スポーク部では切り替える事で、定量注入を実現した。加泥材は、カッタへの負荷軽減も考慮しプラグ系の注入材「アルカゲル」を使用した。

標準配合と配合試験結果を表－３に示す。

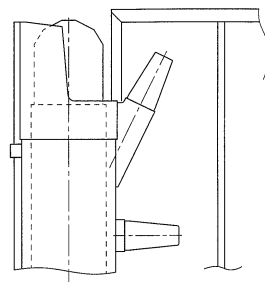
表－３ 加泥材の標準配合と配合試験結果

材 料 名	アルカゲル－M	アルカス－パーロック	アルカゲル－S
	加 泥 材	増 粘 材	プラグ材
主 成 分	アルギン酸 ナトリウム	エマルジョン系 高分子	天然塩鉱物 塩化カルシウム
標準配合	10kg/m ³	7kg/m ³	35%溶液
添加率(地山)	10～15%		0.5～1.0%
スランプ値	24cm※-1)		2cm※-2)

〔注記〕 1) 地山と加泥材を混合した場合の値
2) 上記にプラグ材を添加した場合の値

(7) 攪拌翼

攪拌翼も添加材注入口と同様の理由で各カッタスポークに1～2本、隣接するカッタスポークの攪拌翼と軌跡をずらして配置した。スポークの外周側についてはオーバカッタ部があるため、L形の攪拌翼を設けることで攪拌効果を高めた。



図－１１ L型攪拌翼

(8) 土圧変動抑制装置

密閉状態にあるチャンバ内で大型のオーバカッタを伸縮させるため、切羽土圧が影響を受ける。この変動(0.54m³=チャンバ容積の0.56%に相当)を抑制するため隔壁上部の左右に土圧変動抑制装置を装備した。これはカッタ揺動角度（＝オーバカッタ出代）に応じてピストン（φ850mm×720mmST）を前後させることで容積変化分をキャンセルするものである。

(9) 裏込め注入

裏込めは、シールドの頂部と側部各2箇所選に装備した注入管から各々2箇所を選択し、同時注入する。注入孔横には注入管理のための土圧計を配置した。

裏込め注入材は2液式で可塑状ゲルとなる「BS工法」を採用した。標準配合と配合試験結果を表-4に示す。

表-4 裏込めの配合と物性

A液 (926L)				B液
BSパック	BSサンド	BS安定剤	水	急結剤
241kg	32 kg	4 kg	832 リットル	74 リットル
試験項目	ゲルタイム(秒)	圧縮強度 (N/mm ²)		
		σ 1時間	σ 1日	σ 28日
試験値	5~7	0.06~	0.6~0.7	2.3~
基準値	4~12	0.05>	0.5>	2.0>

(10) 掘進管理システム

全ての掘進記録は掘進管理システムにて収集し、表示或は分析に供した。掘進記録の表示画面を図-12に示す。

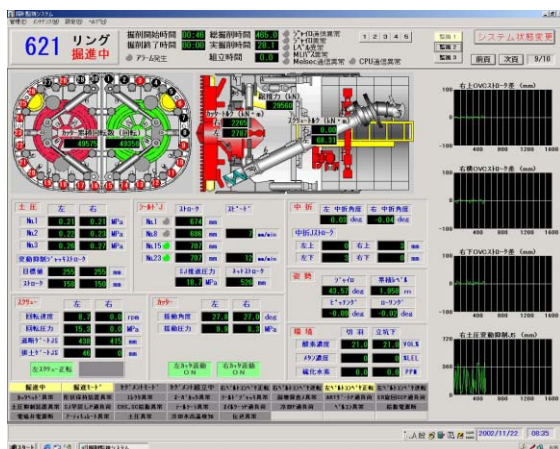


図-12 掘進管理画面

6. 施工実績と評価

(1) 掘進実績

シールド掘進は2002年2月19日から開始し、同年11月28日に到達した。

合成セグメント(初期推進)区間での掘進実績は稼働日で1.72Ring、段取り替え後のDCセグメント区間では4.26Ringとなった。掘削時間は50~70分、セグメント組立時間(DC)は60~80分であった。発進基地面積が1,100m²と狭く、残土搬出やセグメント搬入に制約を受ける結果、日進5 Ring (6 m/日) が上限であった。

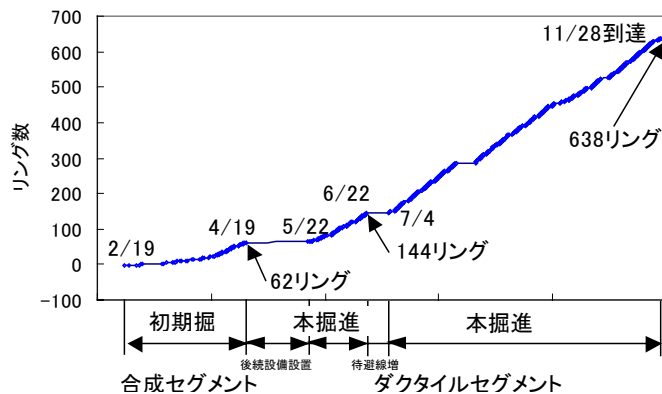


図-13 シールドの掘進実績

(2) 切羽土圧

地盤沈下の懸念があったため、切羽土圧の上限を水圧+主動土圧+変動幅(50kPa)、下限値を水圧以上として掘進した。土質の変動などで多少の変動はあったが、おおむね範囲内での掘進ができた。当初懸念した掘進中の土圧変動は僅か(±20kPa以内)で、土圧変動抑制装置が効果的であったと判断している。

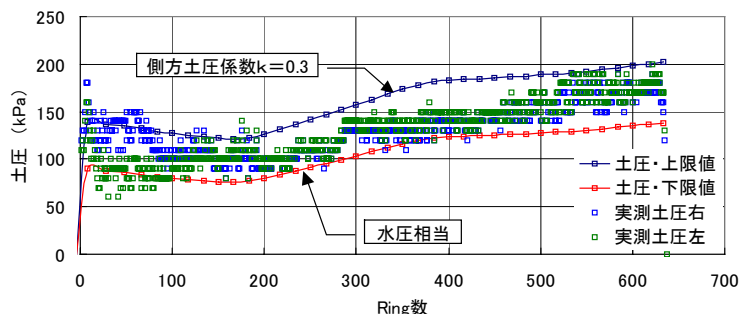


図-14 シールド切羽土圧の推移

(3) シールドジャッキ推力, カッタトルク

総推力の予測値と実績値とを対比し、図-14に示す。総推力は円形シールドと同様の方法³⁾で予測したが、実績値は予測値を20%程上回っており、刃先貫入抵抗や摩擦抵抗(摩擦係数 $\mu=0.3$)が予測値を上回っていたことが原因と想定している。

カッタトルクは、装備トルク4,865~8,020kN-mに対し実測のピーク値が3,500~6,500 (平均5,000) kN-m前後と装備トルクの70~80%に収まった。

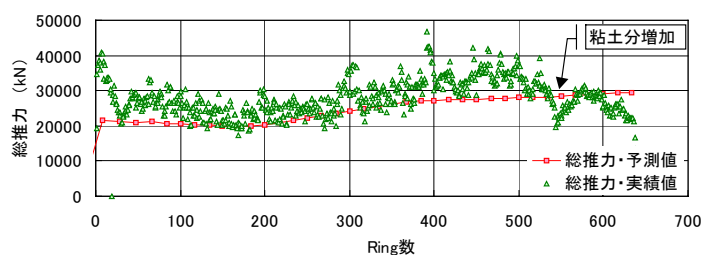


図-15 シールドジャッキ推力の推移

(4) オーバカッタの軌跡制御

オーバカッタの軌跡制御は、ストローク差（出代の計画値と実測値との差）を確認している。オーバカッタの制御誤差は±10mm程度であり、実績値はおおむねこの範囲内に収まっている。

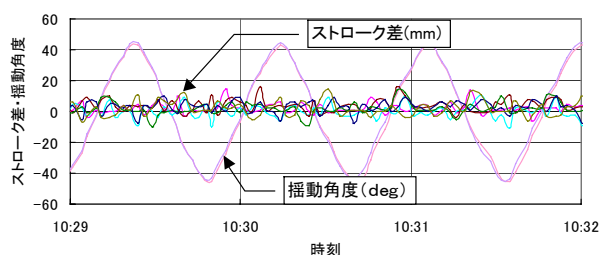
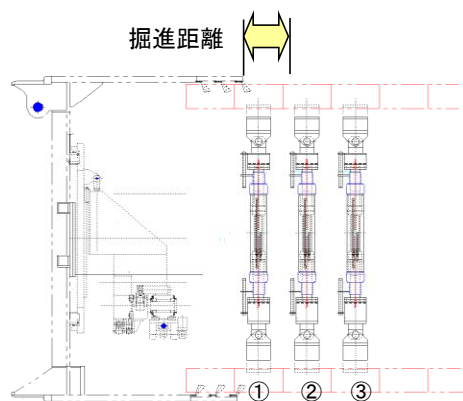


図-16 オーバカッタの軌跡制御事例

(5) セグメント組立

合成セグメントは7分割、1ピースの最大重量が70kN（7.1t）と重いのにに対し、DCセグメントは中柱も含めると15分割と多く、一方で1ピースの最大重量は27.8kNと合成の約40%に止まる。このため合成からDCへの段取り替え時にエレクタの作動油圧を下げ、旋回速度を若干上げるなどの調整を行った。



合成セグメントのボルトはM36、M33と太径のため締結トルクは1.0～1.2万N・mとなり、油圧レンチを使用した。

合成セグメント区間では形状保持装置を使用した。油圧ジャッキのロック機構は有効で荷重が変動してもストロークが変わることは無かった。

図-17に示すように、荷重は裏込め注入圧が直接作用する切羽側を中心に増加し、その後方では余り変化しなかった。当初ストロークに差を付けて、数ミリずつなじませる計画であったが、盛り替え時セグメント自体が思ったような変形を起こさず、結果的には荷重制御で盛り換えを行うこととなった。

(6) 加泥材と裏込め注入

今回使用した加泥材は排土時に流動性を落とせるため、チャンバ内での土砂を高流動状態としてカッタへの負荷をなるべくかけぬようにした。一方プラグ材で改質された排土はスランプが2～10cm程度となった。

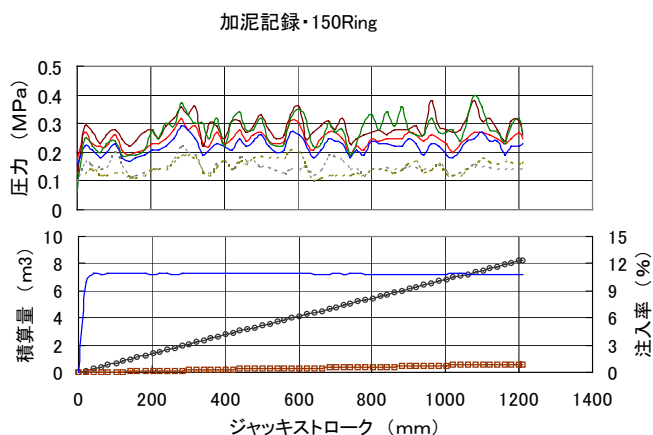


図-18 加泥材注入実績例

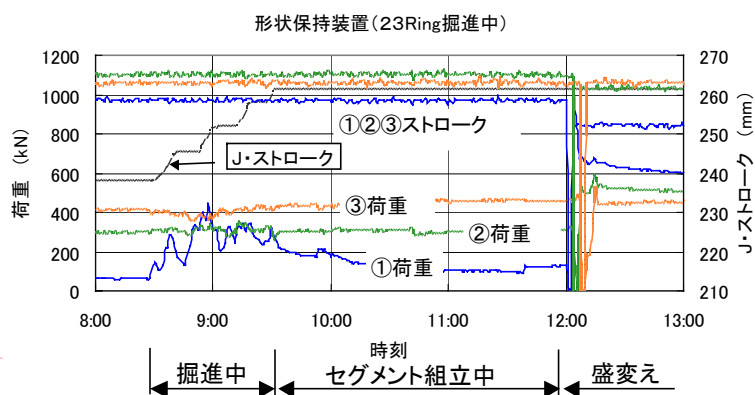
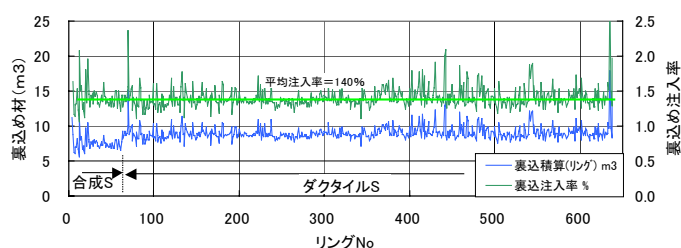


図-17 形状保持装置の作用荷重とストローク変化実績

裏込め注入は、圧管理（上限：土被り圧+0～50 kPa）で行ったが、注入率が140%前後となった。



図－１９ 裏込め注入量・注入率の推移

7. あとがき

地下鉄のトンネルでは初めてとなる大断面矩形シールドについて計画から現在までの実績を紹介した。シールドは当初工程通り11月末に到達し、トンネルも良好な仕上がり状況にある。(写真－3, 4) また、到達したシールドカッターヘッドの磨耗も予想より少なめで、健全な状況を維持できている。(写真－5, 6)



写真－３ 坑口及び合成セグメント区間



写真－４ 接続部（合成からDCセグメント区間を望む）



写真－５ 石田駅に到達した矩形シールド



写真－６ 掘進を終えたオーバカッタ先端部

最後に本工事に関しご指導頂いた、「京都市高速鉄道東西線六地蔵～醍醐間建設技術委員会・同矩形シールド検討ワーキング」を始め関係者各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 山崎糸治：大断面矩形シールド工法の概要について（京都市高速鉄道東西線六地蔵北工区），SUBWAY，2001年1月
- 2) 中村 浩，中川嘉博，岡本直久，溝田正志，中尾 努：大断面矩形シールドの実用化検討，第11回トンネル工学研究発表会，2001年11月29日
- 3) 土木学会編，トンネル標準示方書シールド工法編・同解説，P131,132，土木学会，1997年7月8日