

アポロカッター工法を用いた 2連矩形断面シールドの施工実績

新原亨¹・牧内勲²・猪又勝美¹・諸橋敏夫²・山本信也²・工藤耕一²・新川健二²・梶山仁¹

¹正会員 鹿島建設株式会社 東京土木支店土木部 (〒107-8477 東京都港区元赤坂一丁目 3-8)

²正会員 鹿島・西松・鉄建建設共同企業体 (〒150-0002 東京都渋谷区三丁目 25-21)

近年の鉄道工事や地下通路工事において、横方向に一定の広がりがある矩形や複合断面のシールドトンネルの適応が多くなっている。また、地盤改良など硬質な地盤の掘削に対応できるシールド機のニーズも増加する傾向にある。そのため、円形・矩形・馬蹄型など多様な断面に対応でき、また、硬質地盤や地中障害物切削に威力を発揮するアポロカッター工法を開発した。東横線渋谷～代官山間地下化工事のシールドトンネル工事に採用した。このシールド工事は、営業線である東急東横線の高架橋直下を低土被りで掘進するという厳しい施工環境であったが、平成22年1月に無事施工を終了し、アポロカッター工法の有効性を実証できたことからその特長と掘進実績について報告する。

キーワード: 2連矩形シールド, 泥土圧式シールド工法, アポロカッター, シールド掘進機,
高架橋直下, 低土被り, 急曲線, 急勾配

1. はじめに

円形・矩形・馬蹄型など多様な断面を掘削することが可能なシールドトンネル掘削のためのアポロカッター工法*を開発した。

アポロカッター工法は、

- ・三軸を偏心させた構造のため多様な断面を掘削できる
- ・カッターが高速で回転するために硬質な地盤に適用できる

等の特長を持っている。

掘削方法は、公転ドラムと呼ばれる土台部分が低速で回転し、その上で揺動フレームと呼ばれるアーム部がスイングし、さらに揺動フレーム上で円形のカッターヘッドが4.7min⁻¹で高速に自転し

ながら所要断面を掘削する機構を採用しており、今までに類を見ない掘削方法である。

従来の矩形断面の掘削工法としては、写真-2, 3のようなシールド掘進機のカッター部分の先端に伸縮カッターを使用した、WAC工法(ワック工法)やEX-MAC工法(イー・マック工法)等を適用してきたが、今回の工事では固結シルトや地盤改良体を通することから、硬質地盤においてより優れた切削性を発揮できるアポロカッター工法を開発するに至った。

*アポロカッター工法/APORO-CUTTER 工法 (All [あらゆる] Potential [可能性を秘めた] Rotary [回転式] Cutter [カッター])



写真-1 アポロカッター工法のシールド機

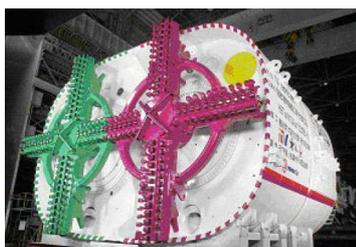


写真-2 WAC工法のシールド機



写真-3 EX-MAC工法のシールド機

2. アポロカッター工法

(1) 掘削メカニズム

アポロカッター工法の掘削機構は、公転ドラム、揺動フレーム、カッターヘッドの3点で構成される。公転ドラムと揺動フレームが公転しながらカッターヘッドが回転（自転）する。揺動フレームを動かすことによって、カッターヘッドの公転半径を変えることができ、任意の断面を掘削する。通常のシールド機がカッターヘッドの1軸回転機構であるのに対して、本工法は3軸の回転を制御させて全断面を掘削する。

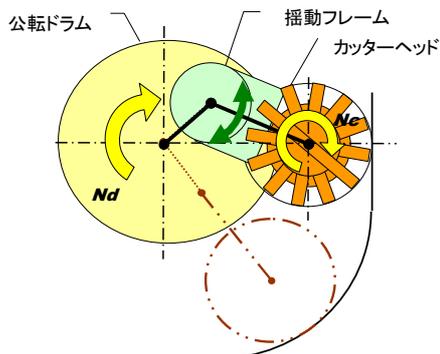


図-1 3軸制御の掘削概念

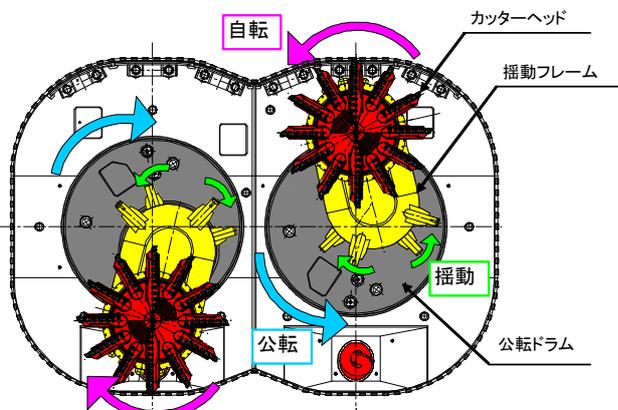


図-2 カッター配置（2連矩形断面）

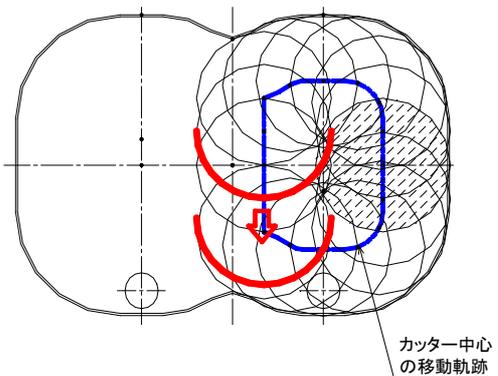


図-3 カッターヘッド掘削軌跡（2連矩形断面）

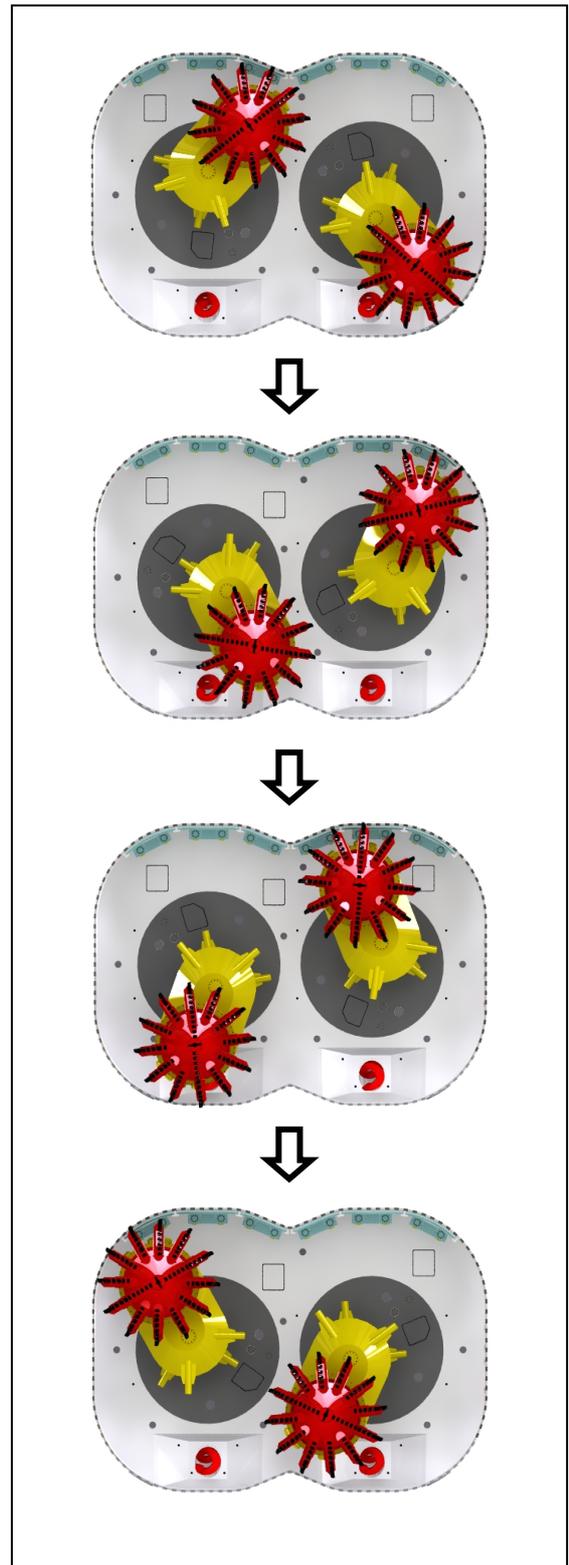


図-4 カッター回転イメージ

(2) 工法の特長

アポロカッター工法の特長としては、主として以下の3点が挙げられる。

a) 任意の断面を高精度に掘削可能

矩形をはじめとする任意の断面を掘削することができ、非円形・円形どちらにも適用可能である。カッター機構はリアルタイムに制御を行う高性能なカッター位置制御機構を持っており、精度の高い掘削を行うことができる。

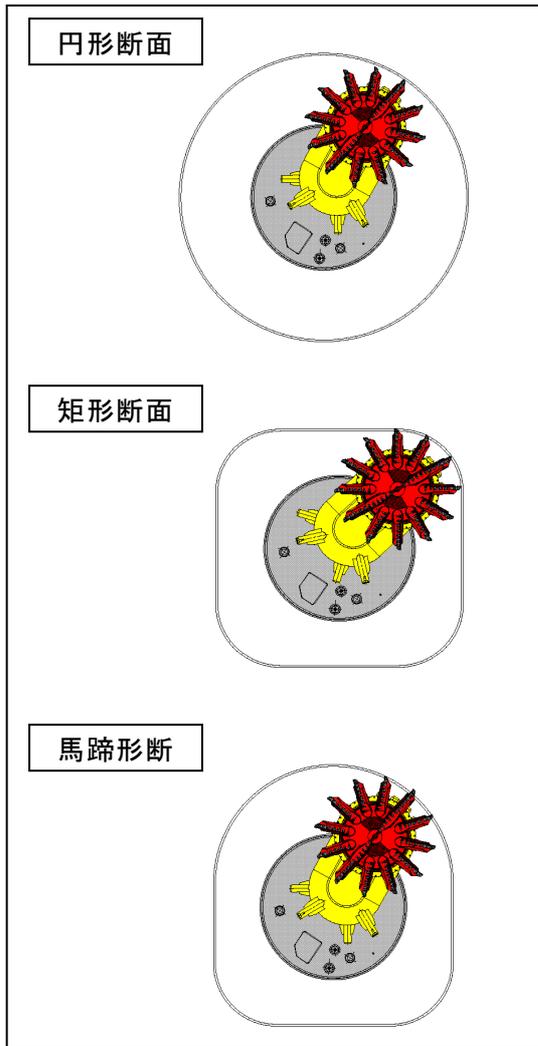


図-5 アポロカッター工法の適用例

b) 硬質地盤における優れた掘削性

従来の大断面シールドに比べて、カッター部分が小さく、高速で回転するため、硬質地盤においても良好な切削性を発揮する。そのため、掘進速度の向上が見込め、固結シルト・改良土等硬質地盤への高い適用性を持っている。



写真-4 硬質地盤掘削性能確認実験状況

c) カッター構成部を転用可能

カッターヘッド、揺動フレーム、公転ドラムからなるカッター機構部は、断面形状が異なるトンネルの掘削装置への転用が可能になるため、転用によるコスト縮減や環境負荷の低減が可能である。また、ベアリング機構が従来のものより小さいために、新規に製作する場合でも納期が短く、工期短縮につながることを期待される。

3. 施工実績

(1) 工事概要

東急東横線と副都心線は、2012年度の相互直通運転を予定している。そのため、現在高架橋上を運行している東急東横線渋谷駅～代官山駅までの1.4km区間を、地下化する事業が進められている。



図-6 ネットワーク図

この事業によって、東武東上線・西武池袋線から東京メトロ有楽町線・副都心線を経て、東急東横線及びみなとみらい線までがひとつの路線として結ばれ、首都圏の広域的な鉄道ネットワークのひとつが形成されることとなる。シールド工事は、掘進延長約 508m、トンネル形状はトンネル幅 10.3m、トンネル高さ 7.1m の 2 連矩形断面である。

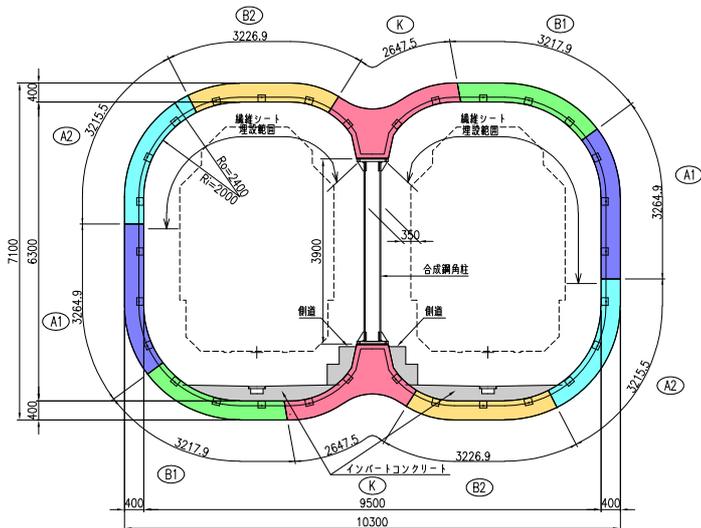


図-7 トンネル標準断面図

(2) 線形概要

図-8 に平面及び断面線形図を示す。今回の平面線形の約 9 割が曲線であり、最小曲線半径が 160m と矩形断面のシールド工事としては厳しい曲線となっている。

縦断線形も渋谷側から 4% → 25% → 35% となっている。シールド機はこの曲線の施工が可能な装備が必要となる。

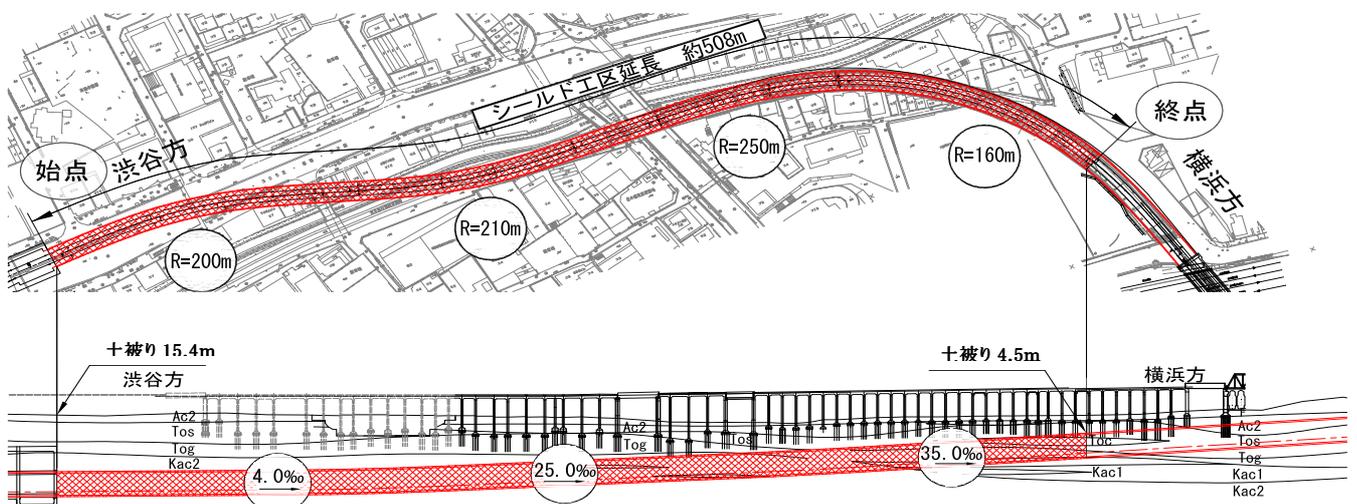


図-8 平面及び断面線形図

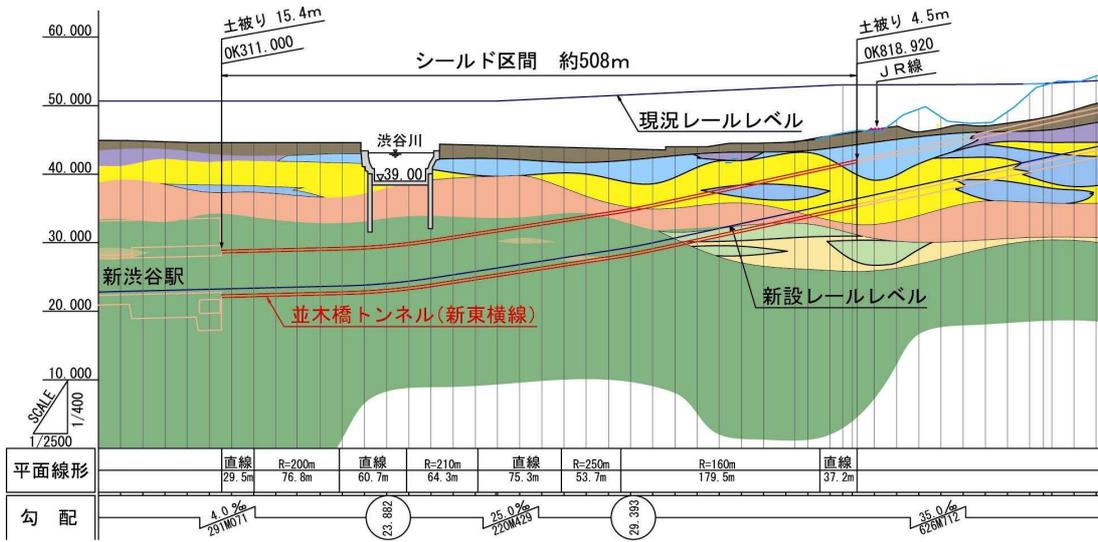
また、シールドトンネル直上は、明治通り→民地ビル→渋谷川→東急東横線高架橋と推移していき、その土被りは最大値 15.4m から最小値 4.5m (1D 以下) へと徐々に減少していく施工環境となっている。

(3) 地質概要

図-9 に地質縦断図を示す。発進後 350m 程度は全断面上総層粘性土層となるが、細砂層 (kas2) がレンズ状に分布し、被圧水とともに粒子が比較的均一なため、シールド掘進時には注意を要す。

その後、上総層粘性土層 GL-7.0m から層厚約 6.0m の砂礫層を掘削し始め、その砂礫層の透水係数は、回復法で 10^{-2}cm/sec と非常に大きな値を示しているため、シールド工事の施工には噴発に対する対策が必要である。

また、発進後 290~470m 程度の範囲は、直上の東急東横線高架橋を防護するための Superjet-Midi 改良体が、常にシールド掘削断面の天端に位置している。



凡例			
地質時代	地層名	地質名	地質記号
完新世	埋土・表土	ローム・瓦礫など	f
	沖積層	腐植土・粘性土	Ac 1
粘土質に二層羅ローム		Ac 2	
第四紀 更新世	東京層群	シルト	To c
		砂	To g
	上総層群	細砂	Ka s 1
		シルト	Ka c 1
		細砂	Ka s 2
		固結シルト	Ka c 2

図-9 地質縦断面図

(4) シールド機

シールド機は矩形断面、地質条件等から泥土圧式シールドとし、その掘削機構は断面形状、地質条件から、図-10及び表-1に示すアポロカッター工法を開発した。

矩形断面を考慮した特殊機構として、ローリングを抑制する可動ソリ、テールクリアを常に監視するテールクリアランス測定装置を装備した。

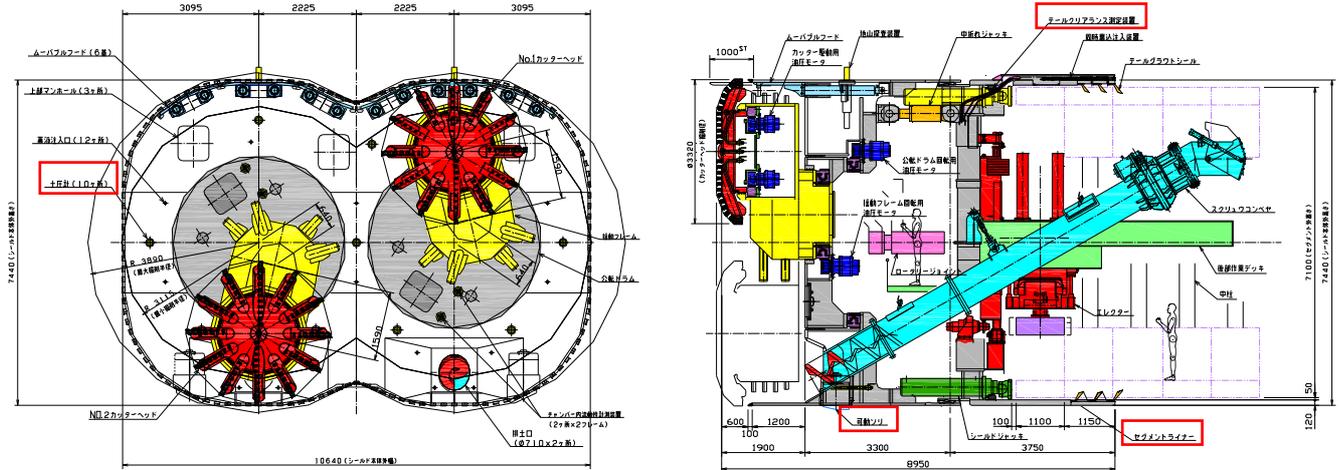


図-10 泥土圧式2連矩形シールド機 (アポロカッター)

表-1 泥土圧式2連矩形シールド機仕様一覧 (アポロカッター)

シールド本体要目		カッターヘッド要目		エレクター要目		
外寸法	高さ7440mm×幅10640mm	形式	アポロカッター方式(2連)	型式	左側用	右側用
機長	8950mm	公転周期	4min/rev. (0.25rpm)	型式	リングドラム片腕式	
シールドジャッキ	上部 2500kN×1300stx34.3MPax26本	回転数	4.7min ⁻¹	押込力	200kN	
	下部 3000kN×1300stx34.3MPax8本	トルク	720kN-m	吊荷重	最大5t100kg	
総推力	8900kN	駆動方式	油圧:MS50-2x7台	回転数	最大5t100kg	
切羽面積当り推力	1236kN/m ²	揺動フレーム	回転数 0~0.9min ⁻¹		高速1.04min ⁻¹	高速1.04min ⁻¹
中折れ角度	右2.0°、左1.5°、上下±0.5°	トルク	1900kN-m		中速0.5min ⁻¹	低速0.5min ⁻¹
中折れジャッキ	2500kN×350stx34.3MPax28本	駆動方式	油圧:MSE05-0(減速機付)x7台	伸縮ストローク	max. 1490mm	
可動ソリ	2500kN×1300stx30MPax2基	公転ドラム	回転数 0~0.9min ⁻¹	傾き制御ストローク	max. 950mm	
ムーバブルフード	500kN×1000stx21MPax6基	トルク	2200kN-m	前後摺動ストローク	前 100mm、後 150mm	
スクリュウコンベヤ要目	スクリュウ羽根径×ピッチ φ700mm×P600mm	回転数	0~12min ⁻¹	左右スライドストローク	右 50mm、左 50mm	
		トルク	常用 70.3kN-mx2基	引込みストローク	max. 100mm	
		油圧モータ形式	ME 2600x2台x2基	角 押付ストローク	max. 900mmx2	
		排土量	141m ³ /Hx2基	装置 前後摺動ストローク	前100mm、後150mmx2	
カッター	超硬チップ付カッター	コピーカットストローク	20~max. 70mm	装置 スライドストローク	右50mm、左50mmx2	
エレクター	超硬チップ付カッター	20~max. 70mm		立 把持固定ストローク	max. 80mmx2	

(7) 高架橋防護・仮受工事

シールド工事に先立ち、現東横線高架橋直下を掘進する区間では、東横線の安全運行確保を目的に、以下の3ブロックに分けて防護工事を実施した。①シールド通過部が硬質な地盤で、かつ土かぶり大きいところでは、既存高架橋の地上部に連続した基礎スラブを構築し、その上部に高架橋荷重を支持する仮受鋼材（ベント）を設置して高架橋を補強した。②礫層が存在する箇所では上述の基礎スラブ・仮受鋼材に加え、礫・砂層の崩壊を防ぐため、シールド通過上部に地盤改良を連続的に実施した。③到達立坑付近は土かぶりが小さく、仮受杭打設用地の確保が可能であるところでは、仮受杭を打設し、その上部に添え梁を構築し、仮受を行った。

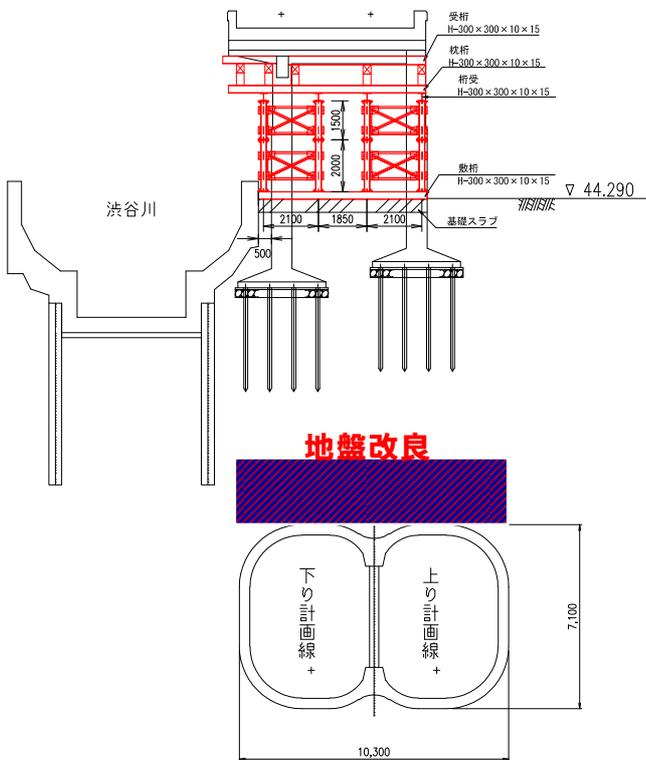


図-13 高架橋防護②（基礎スラブ・仮受鋼材
+ 地盤改良）

(8) 施工実績

a) 切羽土圧管理

掘進時の切羽管理土圧の範囲は、静止土圧に間隙水圧と予備圧（20kN/m²）を加えた値を上限値とし、主働土圧に間隙水圧と予備圧を加えた値を下限値として、各土質条件により区間ごとに設定した。切羽土圧計測はシールドチャンパ内に設置した10個の土圧計のうち、揺動フレームの移動の影

響を受けない土圧計の平均値で土圧管理を行った。土圧管理は、発進時は間隙水圧を下回らないように行い、また上総層粘性土層を通過する明治通りでは、管理土圧範囲の中間値から上限値の間で土圧管理を行った。明治通りを通過した後の切羽土圧は、民地ビルや東横線高架橋等の重要構造物の直下を掘進することから、各変状計測結果に基づき沈下等を抑制するように管理土圧を設定した。

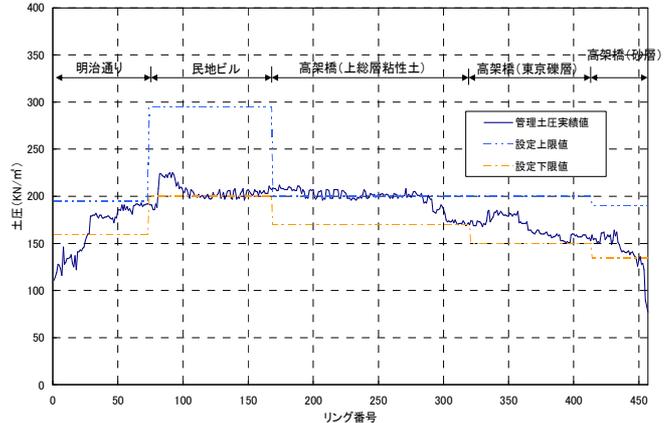


図-14 土圧管理結果

b) 排土管理

初期掘進区間（88m）の排土量管理は、ベルトスケール及びダンプスケールによる重量型管理を採用した。本掘進からは、トンネルの上昇に伴い土層が変化するため、レーザースキャナによる容積型計測管理も併用することとした。掘進開始当初20リングまではベルトコンベアを積む後続台車をS字状に配置していたため、ベルトスケールの計測誤差が発生していたが、後続台車がシールド坑内に入り直線状になるにつれて、安定した計測結果が得られるようになり、計測排土量を理論排土量で除した値は平均1.03となった。また、ダンプスケールの同値も平均1.02といった結果となり、良好な排土管理を行うことができた。

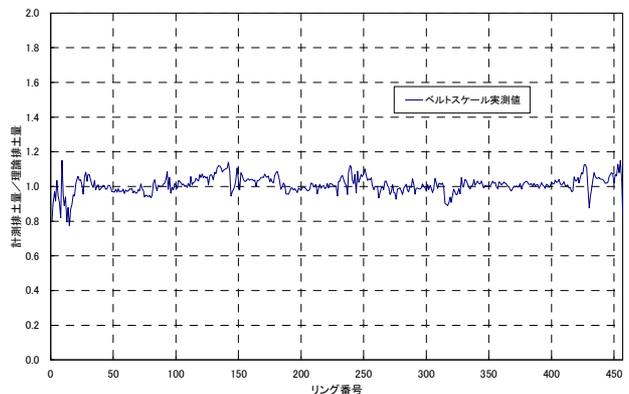


図-15 排土管理結果

c) 裏込注入

今回のシールド機には、沈下抑制のため同時裏込注入装置を採用している。注入量管理としては、オーバーカット量 20mm のテールボイドを考慮して上総層粘性土層は 100%以上、東京礫層・砂層では 110%以上の注入率を確保した。注入圧は裏込注入入口横に装備した土圧計で計測し、圧力制御を行った。

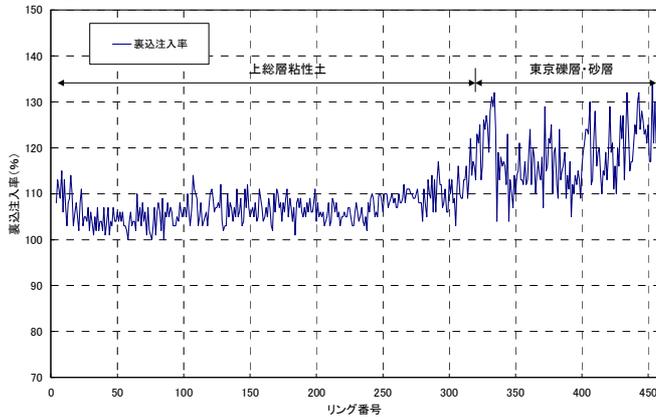


図-16 裏込注入実績

e) 加泥注入

切羽安定のためには、チャンバ内の塑性流動性の確保が重要になる。上総層粘性土の掘進時は気泡材を 30%添加する予定であったが、地山の粘性が想定以上であったため、気泡材の使用と併用して加水を実施した。東京礫層・砂層においては、ベントナイト系加泥材とポリマー系加泥材を使用し、設計注入率を 27%と設定した。実際に掘進すると、上総層粘性土では加水が寄与し、また東京礫層では地盤改良体部の掘進に伴う粘性の増加により実績注入率約 20%で塑性流動性を確保できた。

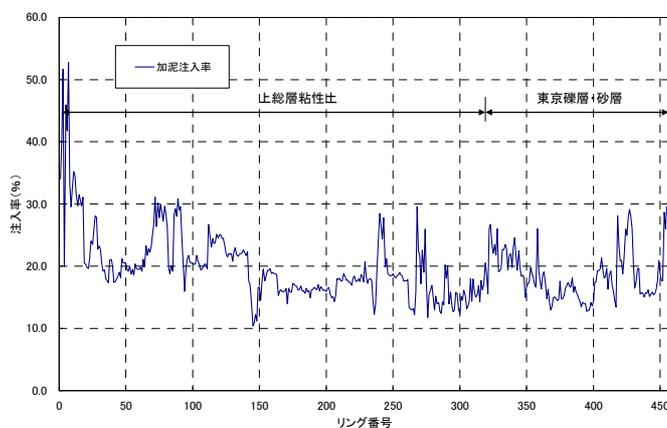


図-17 加泥注入実績

f) カッタートルクと推力管理

設計カッタートルクは 450kN・m で装備カッタートルクに対して 1.60 の安全率を有している。掘進時のカッタートルク平均値は 272 kN・m であったが、東京礫層の地盤改良部では礫の影響により想定以上のカッタートルクが掛かり掘進停止することもあった。

設計ジャッキ推力は 61,048kN で装備ジャッキ推力に対して 1.46 の安全率を有している。掘進時のジャッキ推力平均は 20,374kN であった。ジャッキ推力平均が設計値の 1/3 程度と小さかったのは、設計時に民地ビルの上載荷重を考慮してその荷重を見込んでいたが、実際には上載荷重が想定よりも作用していなかったためである。

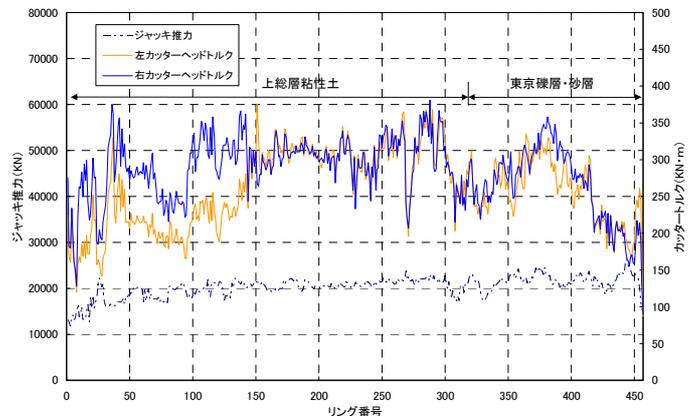


図-18 カッタートルクとジャッキ推力

g) シールドの姿勢制御

今回のシールド機には、ローリング対策として前胴斜め下方向(左右)に可動ソリを装備した。曲線施工時に、ローリングが最大 0.1° 程度発生したが、可動ソリを使用することで良好に修正することができた。

4. おわりに

本シールド工事は低土かぶり・急曲線等の条件下での施工であったが、地盤及び路上等に大きな変状を発生させることなく施工を終了した。また、最も重要な東横線の高架橋直下での掘進についても、列車の運行に影響を及ぼすことなく無事到達することができた。これはアポロカッター工法の高性能なカッター位置制御と硬質地盤の掘削の優位性に寄与することが大きいと考えている。今後、多様な断面、硬質地盤等の同種工事に展開したいと思う。