

多様断面に適合可能な掘削機構を持つシールド掘進機を用いた2連矩形断面シールド施工実績

新原 亨¹, 牧内 勲², 猪又 勝美³, 諸橋 敏夫⁴, 工藤 耕一⁵

¹ 鹿島建設(株)東京土木支店土木部担当部長(〒107-8477 東京都港区元赤坂 1-3-8)

² 鹿島建設(株)東京土木支店東急渋谷工事事務所長(〒150-0002 東京都渋谷区渋谷 3-25-21 渋谷N Tビル 3F)

³ 鹿島建設(株)東京土木支店東京港トンネル工事事務所副所長(〒140-0003 東京都品川区八潮 2-19)

⁴ 鹿島建設(株)東京土木支店新御茶ノ水駅工事事務所長(〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台 3-7-15 番地大場ビル 2F)

⁵ 鹿島建設株式会社東京土木支店小田急代田工事事務所工事課長代理(〒155-0033 東京都世田谷区代田 3-56-7)

E-mail:kudoko@kajima.com

近年の鉄道工事や地下通路においては、横方向に一定の広がりがある矩形断面のシールドトンネルのニーズがある。また、都市部における大深度法の適用に伴い、硬質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、東急東横線渋谷駅と代官山駅間のシールド工事に採用した。本稿では、営業線である東急東横線の直下を低土被りで掘進するという厳しい施工環境において、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。

Key Words : *Aporo cutter, double rectangular cross section, quick curve, steep slope, low overburden*

1. 工事概要

本工事は、東急東横線と東京メトロ副都心線の相互直通運転のため地下化する東横線渋谷駅～代官山駅間約1.4kmの内、渋谷側から約508mをシールドトンネルにて施工するものである。

トンネル断面は、高さ7.1m×幅10.3m、中柱を有する2連矩形断面である。シールド掘削方式は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]）を採用し、施工条件の厳しい中、東急東横線高架橋直下を低土被りで掘進した。

今回、東急東横線の列車運行を阻害させることなく、また、周辺地盤などへの大きな変状発生もなく工事を完了できたため、ここに、当工法の特徴と掘進実績について報告する。

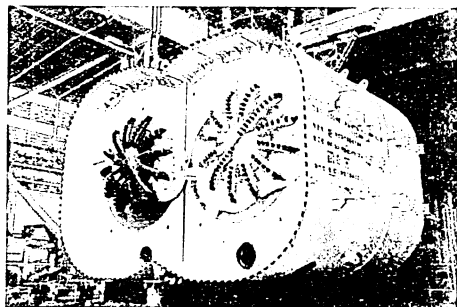


写真-1 アポロカッター工法マシン

2. シールド掘進工事における問題点

本工事におけるシールド掘進上の問題点として、以下の事項が挙げられる。

(1) 重要構造物の変状抑制

シールド掘進のルートは、明治通り→民地ビル→渋谷川→東横線高架橋など重要構造物の直下となっており、これらの健全性を保つため、変状を抑制する必要がある。変状抑制のための留意点は以下の通りである。

(図-2 参照)

- a) 土被りは、発進時立坑の15.4mから到達立坑付近では4.5m（1D以下）の低土被りとなる。
- b) 発進後290m～470mの範囲では、掘削断面の一部が地盤改良体であり、不安定なチャンバー内に対し、高度な切羽土圧管理が必要となる。
- c) 掘削土層について、発進後350m付近までは介在砂層を有する全断面上総層群固結シルト層（N値50以上）であるが、以降、到達側にかけては層厚約6.0mの砂礫層、軟弱粘土層へと変化する。（図-1 参照）

(2) 線形管理

- a) 平面線形の約9割が曲線であり、最小曲線半径R160m、縦断勾配は起点側から4.0‰→25‰→35‰と、鉄道シールドとしては厳しい線形となっている。

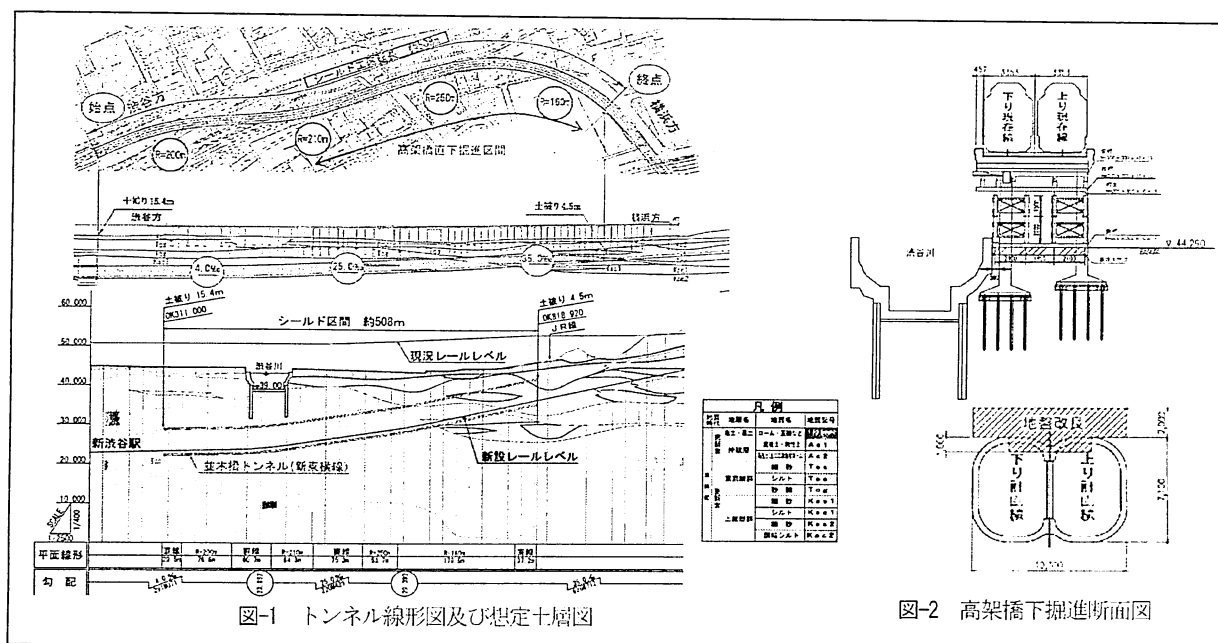


図-1 トンネル線形図及び想定土層図

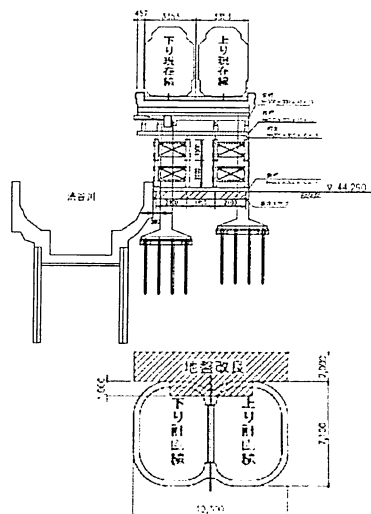


図-2 高架橋下掘進断面図

3. シールドマシン及びセグメント概要について

(1) アポロカッター工法の掘削機構

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）するとともに、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化させることで、計画任意断面を掘削する。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-3、4、5、6 参照）

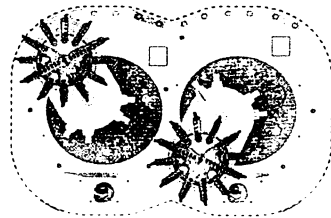
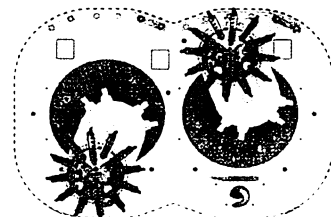
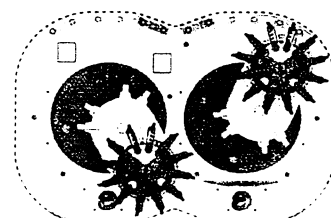
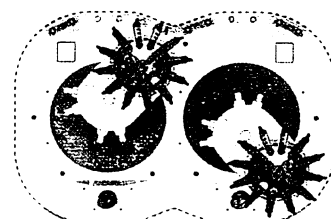
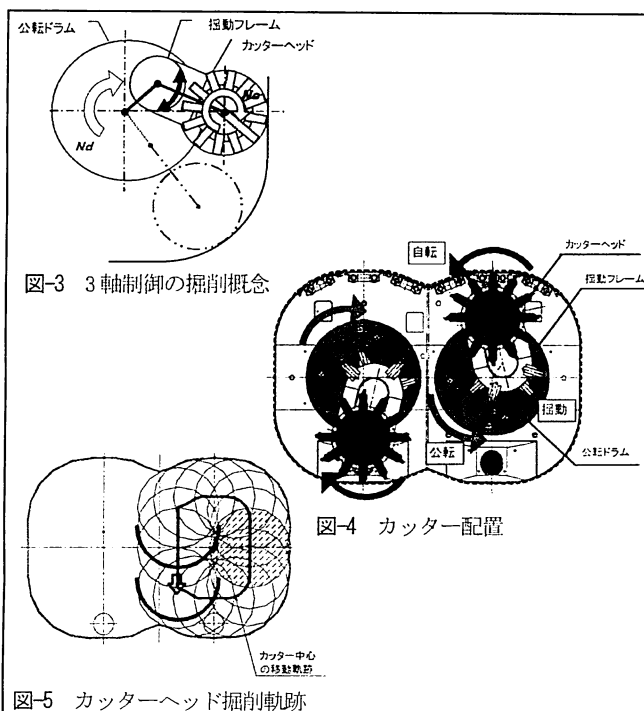


図-6 カッター回転イメージ

(2) アポロカッター工法の特長

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有しており、精度の高い掘削を行うことができる。(図-7 参照)

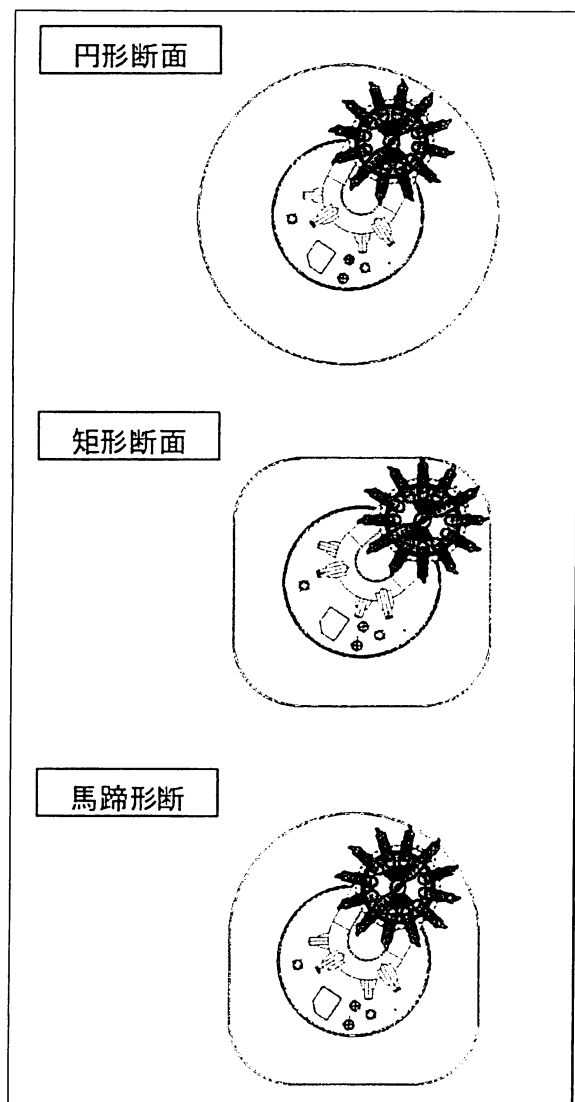


図-7 アポロカッター工法の適用例

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、硬質な地盤においても良好な切削性を発揮する。そのため、掘進速度の高速化が見込まれ、また、固結シルト、改良体など硬質な地盤への高い適用性を有している。(写真-2 参照)



写真-2 硬質地盤掘削性能確認実験状況

c) カッター構成部の転活用

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活用が可能になるため、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コンパクトなために、新規に製作する場合でも納入期間が短く、工期短縮につながる事が期待される。

(3) シールド機の仕様

シールド機は矩形断面、地質条件など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-8、表-1 に示す仕様とした。

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。

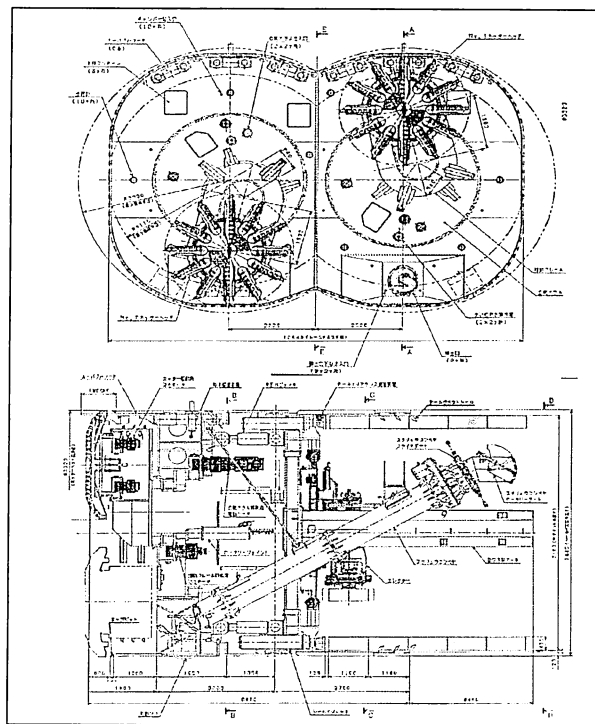


図-8 シールドマシン概要図

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	アブトロカッター方式(2連)	左 側 用		
機 長	8950mm	公称回転数	4r/min/rev. (0.25rpm)	右 側 用		
シールドジャッキ	上部 2500kN×1300sbx34.3MPax26本	カッターヘッドNo. 1, No. 2	回転数	リンクトラム片腕式		
	下部 3000kN×1300sbx34.3MPax8本		トルク	200kN		
総推力	89000kN	駆動方式	720kN・m	吊 荷 重	最大5t100kg	最大5t100kg
切刃面積当り推力	1236kN/m ²		油圧:MS50-2x7台		高速1.04r/min ⁻¹	高速1.04r/min ⁻¹
中折れ角度	右2.0°、左1.5°、上下±0.5°	回転フレームNo. 1, No. 2	回転数	回 転 数	中速0.5min ⁻¹	低速0.05min ⁻¹
中折れジャッキ	2500kN×350sbx34.3MPax28本		トルク		max. 1490mm	
可動ノリ	2500kN×70sbx30MPax2基	公称トラムNo. 1, No. 2	駆動方式	伸縮ストローク	max. 950mm	
ムーバブルフード	500kN×1000sbx21MPax6基		油圧:MS E05-0 (減速機付) x7台		前後移動ストローク	前 100mm、後 150mm
スクリュウコンベヤ要目		カッター	回転数	左右スライドストローク	右 50mm、左 50mm	
スクリュウ羽根ピッチ	φ700mm×P600mm		トルク		引込みストローク	max. 100mm
回転数	0~12r/min ⁻¹	コピーカストローク	2200kN・m	角 押付ストローク	max. 900mmx2	-
トルク	常用 70.3kN・mx2基		駆動方式		装柱前後移動ストローク	前100mm、後150mmx2
油圧モータ形式	ME 2600x2台x2基	超硬チップ付カッター	電動:37kwx4p (インバータ) x6台	置組	スライドストローク	右50mm、左50mmx2
排土量	141m ³ /Hx2基				立 把持固定ストローク	max. 80mmx2
						-

表-1 マシン仕様

(4)セグメント

a)セグメント構造

使用するセグメントはRC及びSRCで製作した。形状は、幅 10300mm、高さ 7100mm、桁高 400mm、セグメント幅 1100mm、分割数 10 分割で、合成鋼角柱の中柱を有する。また、将来的なセグメントの「割れ・欠け」による剥落を確実に防止するために、EXP セグメントを上部5ピースに採用した。

EXP セグメント (Exfoliation Prevention Segment) は、製作時に繊維シートをあらかじめセグメント型枠内表面に敷設しコンクリートを打設することにより、セグメント内表面が繊維シートで覆われるため、コンクリートにクラックが生じた場合でもコンクリート片の剥落を確実に防止することができる。(図-9、写真-3 参照)

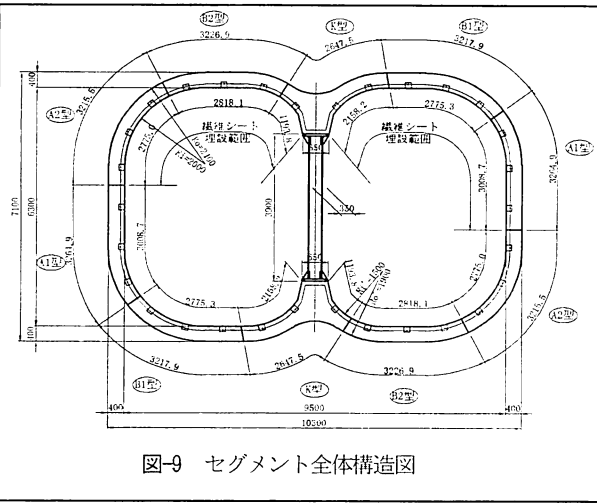


図-9 セグメント全体構造図

b)セグメント組立

セグメントは、2 連矩形断面であるため左右二基の片アーム式エレクターにて組立を行った。セグメント組立順序は、左右それぞれのエレクターにより、互いの干渉を回避しながら、下部から左右上部へと組み上げた。全てのセグメントピース組立完了後、左エレクターに装備した把持装置で合成鋼角柱つかみセグメント中央部に挿入して、固定を行った。(図-10 参照)

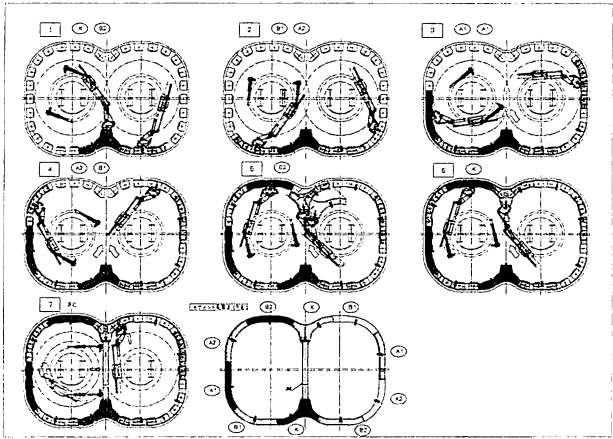


図-10 セグメント組立順序 (甲組)

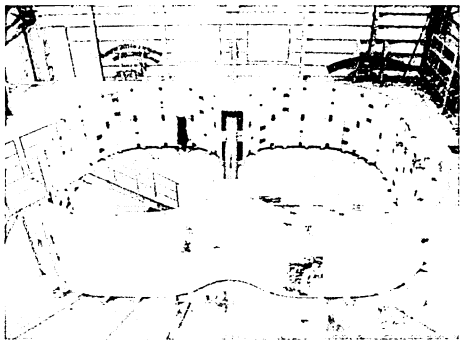


写真-3 セグメント仮組状況

(5)設備概要

シールド工事の設備は、明治通りに設置する発進立坑に、路上と路下に分けて配置した。主要設備の配置を図-11に示す。

シールドのカッターヘッドで掘削した土砂は、スクリュウコンベアを経由し切羽バルコンで後続台車後端へ搬出して、さらに連続バルコンへと積み替え、立坑部まで運搬する。立坑部では、垂直コンベアで路上の防音ハウス内土砂ピットに搬出し、ピット上部に設置したバックホーでダンプに積み込み場外へ搬出する。

また、セグメントはトレーラで防音ハウス内に搬入し、発進立坑上の開口から天井クレーンにて地下に投入し、バッテリーロコで運搬し組立てを行った。

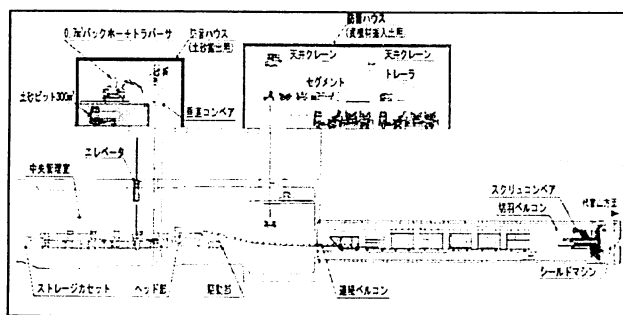


図-11 シールド設備配置図

4. 工事実績について

(1)重要構造物の変状計測結果に基づく切羽土圧管理

掘進時の切羽管理土圧は、静止土圧に間隙水圧と予備圧（20kN/m²）を加えた値を上限値、また、主動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。

アポロカッター工法によるシールド掘削機構においては、揺動フレームが土圧計前を通過する際にチャンバー内の土砂が大きく移動し、土圧の測定値に影響が出る。よって、シールド掘進時の切羽土圧計測はシールドチャンバ内に設置した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を自動的に検出するように設定して土圧管理を行った。

土圧管理において、発進時は間隙水圧を下回らないように、また、固結シルト層を掘進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。明治通りを通過後の切羽土圧は、民地ビルや東横線高架橋など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を抑制するよう設定した。（図-12 参照）

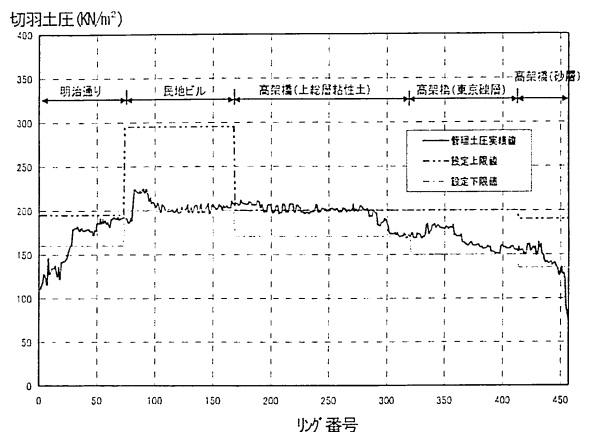


図-12 土圧管理結果

(2)排土管理

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とレーザースキャナによる容積型計測管理を併用することで、良好な排土管理を行うことができた。

初期掘進区間（88m）の排土量管理は、ベルトスケールおよ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であった。また、ダンプスケールの同値も平均1.02といった結果で、良好な排土管理を行うことができている。（図-13 参照）

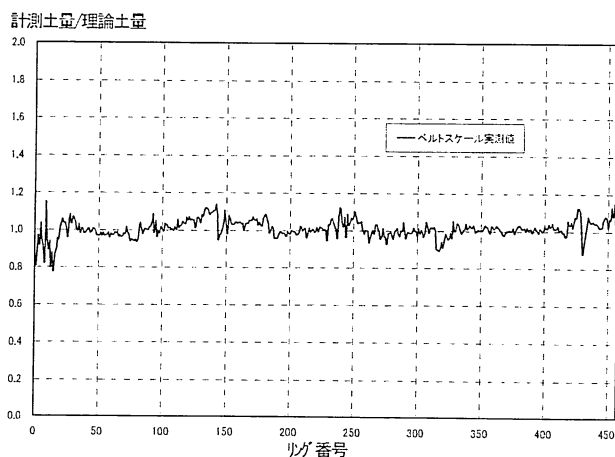


図-13 排土管理結果

(3)裏込注入率

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固結シルト層では 100%以上、東京礫層、砂層では 110%以上の注入率を確保した。注入圧は裏込注入口横に設置した圧力計で計測し圧力制御を行なった。(図-14 参照)

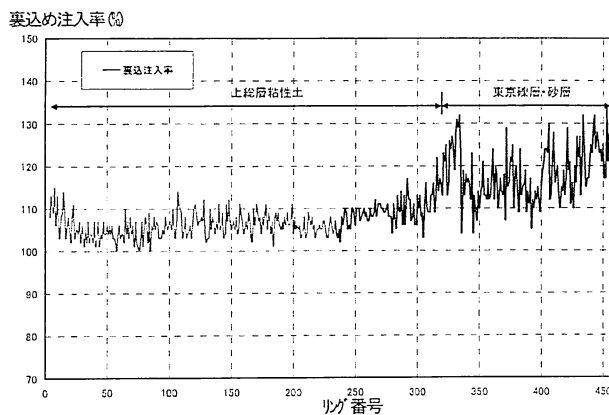


図-14 裏込注入実績

(4)加泥注入材の選定

切羽安定のためには、チャンバー内の塑性流動性の確保が重要になる。固結シルト層では気泡材を 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。

結果として、固結シルト層では加水が寄与し、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ている。(図-15 参照)

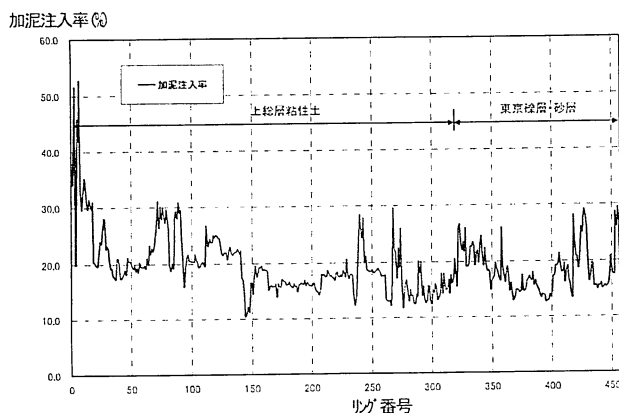


図-15 加泥注入実績

(5)カッタトルクと推力管理

設計カッタトルク 450kN・mに対して、装備トルクは 1.60 の安全率を有している。掘進時のカッタトルク平均値は 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カッタトルク高で掘進停止することもあった。

設計ジャッキ推力 61048kN に対し、装備ジャッキ推力は 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 20374kN 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、実際には切羽土圧を上限値まで上げる必要がなかったためと推定される。(図-16 参照)

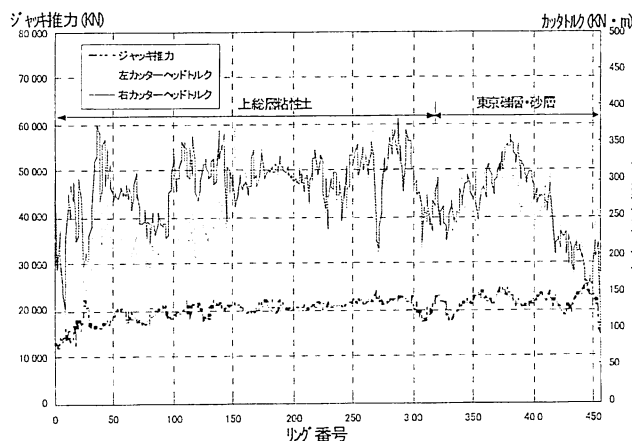


図-16 カッタトルクとジャッキ推力

(6) シールドの姿勢制御と線形管理

シールド機には、ローリング対策として前胴斜め下方(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。(写真-4 参照)

また、蛇行量についてもコピーカッターと中折れ装置を併用することで、上下左右とも管理値内に収めることができた。

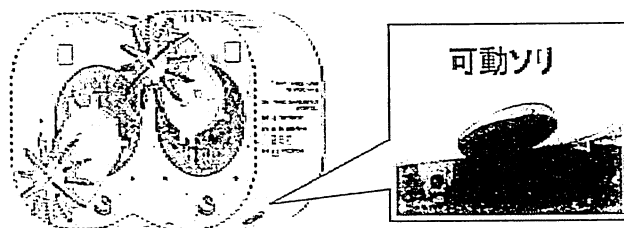


写真-4 可動ソリ概要

5. 工事結果と今後の考察

本シールド工事は、低土被りおよび急曲線など厳しい条件下での矩形断面シールド施工であったが、周辺地盤や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。（写真-5, 6 参照）また、最も重要な東急東横線の高架橋直下での掘進に於いても、列車運行に影響を及ぼすことなく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への掘削の優位性によるところが大きいと考えている。

今後、多様な断面や硬質地盤など、同種工事に展開したいと考えている。

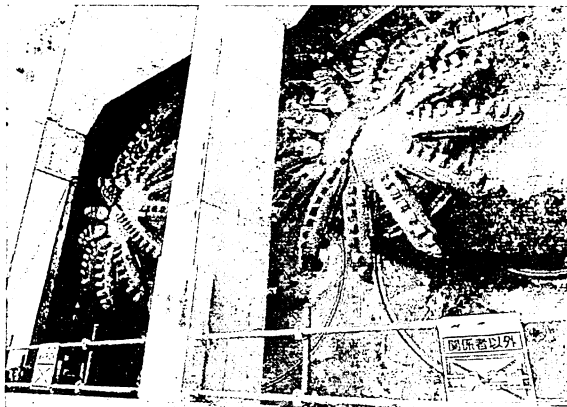


写真-5 シールド到達状況

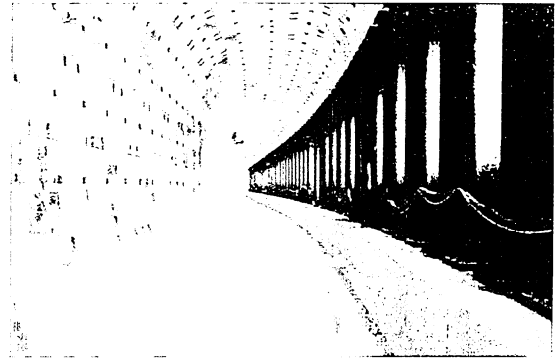


写真-6 坑内全景

6. 過去の発表経緯

- 1) 猪又勝美：多様断面に適合可能な掘削機構を持つシールド掘進機＝アポロカッター工，建設オピニオン，P18～P19，2010.02
- 2) 津守澄男，角田貴昭，山崎仁，新原亨：鉄道直下を2連矩形シールドで掘進－東急東横線 渋谷～代官山－：トンネルと地下，P31～P38，2010.05
- 3) 新原亨，牧内勲，猪又勝美，諸橋敏夫，山本信也，工藤耕一，新川健二，梶山仁：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：土木学会「土木建設技術発表会 2010」，P249～P256，2010.11
- 4) 猪又勝美：アポロカッター工法を用いた2連矩形シールド：日本土木工業協会 新技術・新工法講習会，P5～P10，2010.12

Construction report of the shield tunnel with a double rectangular cross section that uses the Aporo Cutter Drilling Method

Toru Niihara, Isao Makiuchi, Katsumi Inomata, Toshio Morohashi, Koichi Kudo

In the recent shield tunnel work for the railway and underground passageway, the adjustment of the rectangle and the compound circle section has increased from the viewpoint of effective use in the section. On the other hand, needs of the shield machine that can adjust to digging up a stiff ground are increasing. The Aporo cutter drilling method can correspond to digging up various sections like the circle, the rectangle, and the horseshoe shape, etc, and effective for digging the stiff ground. It has adjusted to the shield construction in "Tokyu-Toyoko-Line Shibuya-Daikanyama Section Underground Construction" this in cutting method. It was safely completed in January, 2010 though proceeding to dig was a severe condition of doing an existing bridge right under by a quick curve, a steep slope, and a low overburden.