

施工

中国における扁平大断面矩形状シールドの開発と試験施工

—寧波市地下鉄3号線引込み線—

(株)地域地盤環境研究所所長 橋本正
 寧波市軌道交通集團有限公司總工程師 朱瑤宏
 上海隧道工程有限公司總工程師 朱雁飛
 (株)地域地盤環境研究所事業推進部次長 早川清

1はじめに

ねいは寧波市軌道交通地下鉄4号線は、道路幅が狭く、周囲の建物が集中した旧市街区間を通過する。従来の円形シールド工法では既存の建物・構造物への近接度が高いため、これらに与える影響は必至である。このため、都市鉄道交通に向けた地下空間の高度利用および周辺影響を最小化に資するため中国初の矩形状断面シールドトンネル工法の確立を目指し、3号線引込み線部において試験工事を実施した。

超鋭敏な軟弱粘性土地盤における小土かぶり、平面縦断曲線の競合下の掘進という条件下で、縦横比0.6の扁平大断面矩形状土圧シールドによるトンネルの施工は、世界的に類を見ないプロジェクトである。

したがって、本プロジェクトを進めるにあたっては、マシン、セグメントなど事前の十分な設計検討および施工計画立案を行い、実施工に際しては慎重、細心の施工管理、不具合発生の兆候把握や対策施工に努めた。その結果、試験施工区間の100m間ではあるが、トンネルの変状や地盤沈下もほとんどなく、順調に掘進を行えた。

本稿では、矩形状の特殊シールドの開発経緯と試験工事結果について、その概要を報告する。

2概要

2-1工事概要

工事名称：寧波市軌道交通3号線一期工事出入り線工区

工事場所：中国浙江省寧波市鄭州区

工事内容(矩形状シールドトンネル工)：

シールド断面 $11.83m \times 7.27m$
 トンネル内空断面

$10,600mm \times 6,037mm$

掘進延長 $L = 390.3m$

土かぶり厚 $T = 2.5 \sim 10.46m$

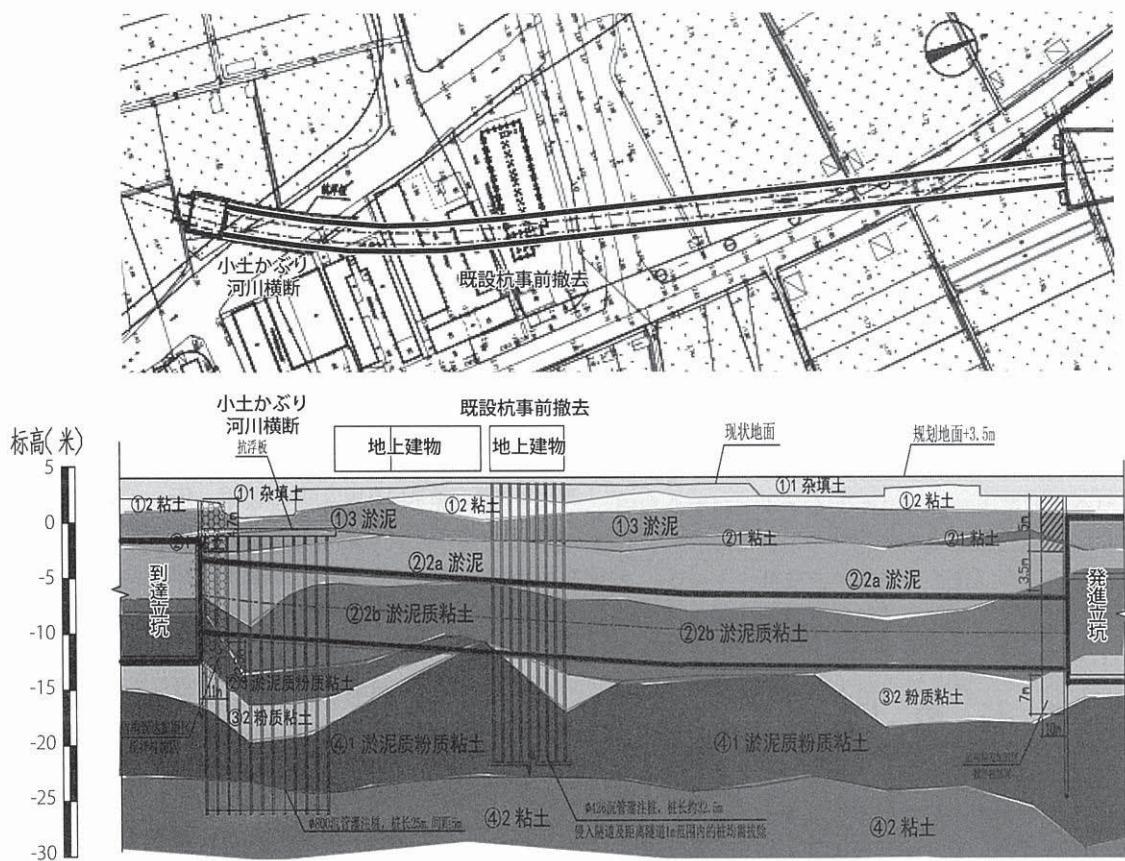
最大勾配 $i = 35.0\%$

最小曲率半径 $R = 400m$

2-2周辺環境・地盤条件

2-2-1周辺環境

当該工事の全体範囲は広徳湖南路(計画)の西側の田園地帯に位置し、現状では耕作地と商業地区、居住用地が混在している。路線上には、プラスチック包装工場やモーター工場などの建物や滞留河川がある(図-1)。



2-2-2 地盤条件

主たる掘進対象の②2a層、②2b層(淤泥)に関する土層は、鋭敏性、流動性が顕著で、土の骨格構造が容易に破壊されやすく、工事への影響があるとみられる軟弱土層である。

本件の掘進対象地盤は、低塑性シルト質粘性土層で液性指数 $I_L \geq 1.0$ であり、シールド掘進による地盤の攪乱によって、泥濘化、強度低下や圧密現象が著しく発生することが予想される(図-2)。

2-3 トンネル断面

トンネル内空断面($10,600\text{mm} \times 6,037\text{mm}$)は、地下鉄の建築限界(車両、設備、架線、パンタグラフ)とともに、施工誤差、測量誤差、不等沈下、構造力学的変位などを考慮して決定している(図-3)。

2-4 試験施工概要

2-4-1 目的

都市部地下鉄建設工事にあっては、土かぶりが

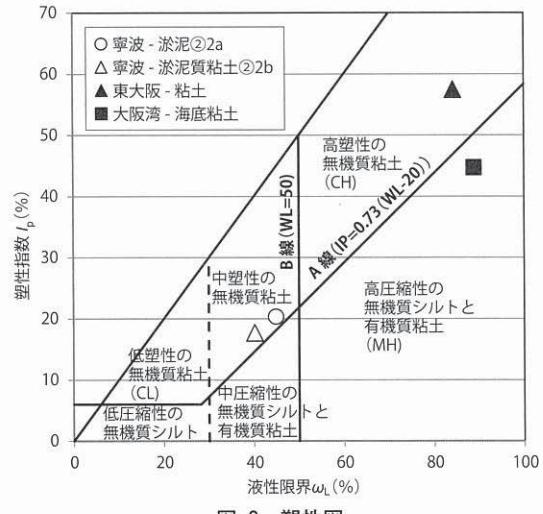


図-2 塑性図

比較的小さく、既存の地上建物や地下構造物が多いため、周辺環境への影響が懸念される。

シールドトンネル掘削による地盤沈下要因には、

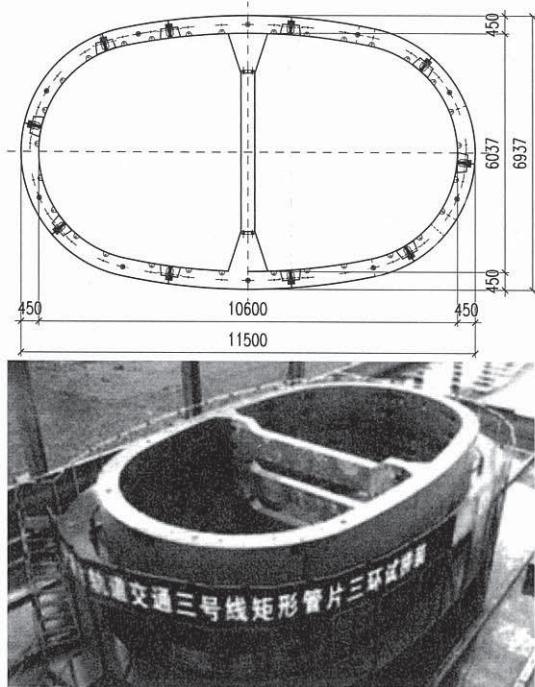


図-3 セグメント形状寸法

切羽圧力、シールドの姿勢やオーバーカッタによる余掘り、排土量、裏込め注入圧力・注入量などが複雑に関係する。

さらに、鋭敏粘土中の掘進に際しては、周辺地盤の攪乱に伴う後続沈下が発生し、地表面沈下量が過大となるとともに、トンネル自体の長期沈下や変形が発生する場合がある。したがって、現場計測データにもとづいて、施工中の掘進管理を十分に行うことにより地盤沈下を抑制する必要がある。

今回の試験施工の目的としては、扁平大断面矩形状シールド工法の実用化に向けて、地盤沈下を抑制しながら、シールドによる安定した掘進とセグメントの組立てが問題なくできるかどうかを確認するために、試験施工を計画した。

2-4-2 検証内容

- ① 発進直後の100mをトライアル掘進の試験施工区間とし、地盤変位計測データにもとづき施工パラメーターを調整、最適化する。
- ② 掘進中はシールドの姿勢、推力、切羽土圧、カッタトルク、スクリュコンベヤ回転数、

裏込め注入圧・量などのマシンのモニタリングデータと地盤変形データの相関性を逐次分析して、最適な掘進管理が行えるよう掘進パラメーターの設定を行う。

- ③ 施工時および長期にトンネル覆工に作用する荷重、軸力、モーメントやトンネル変位を計測、分析し、セグメント設計の妥当性や継手、組立て方法について確認する。

3 矩形状シールドの製作と掘進結果

3-1 矩形状シールドの概要

シールドは、2連スポーク+偏心多軸併用カッタ式の泥土加圧式シールド掘削機で、横長断面の矩形状(11.83m × 7.27m)である。機長は11.46mで、全断面掘削方式となっている(写真-1)。

3-2 掘削・排土装置

左右2基の主回転スポークカッタに、両方の主カッタでは掘削されない中央部の背後に平行リンク運動が可能な偏心多軸回転方式カッタを併用装備した掘削カッタヘッドとなっている(図-4,5)。日本には実績のない形式である。

主カッタのカッタトルクは、瞬時トルク係数を16としている。日本のDOTより若干小さいが、軟弱地盤における小かぶりのシールドトンネルを掘進するには十分であった。

また、日本のDOTには一般的にコピーカッタが装備されているが、本件では、最小曲率半径250m(計画線形 $R_{min} = 400m$)とする中折れ装置を装備しており、本件の軟弱地盤においてはコピーカッタなしで掘進した。

スクリュコンベヤは2基を左右対称に設置し



写真-1 シールド全体

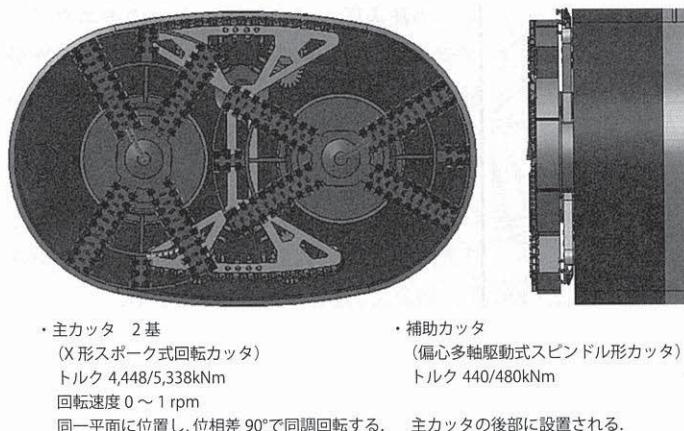


図-4 カッタヘッド

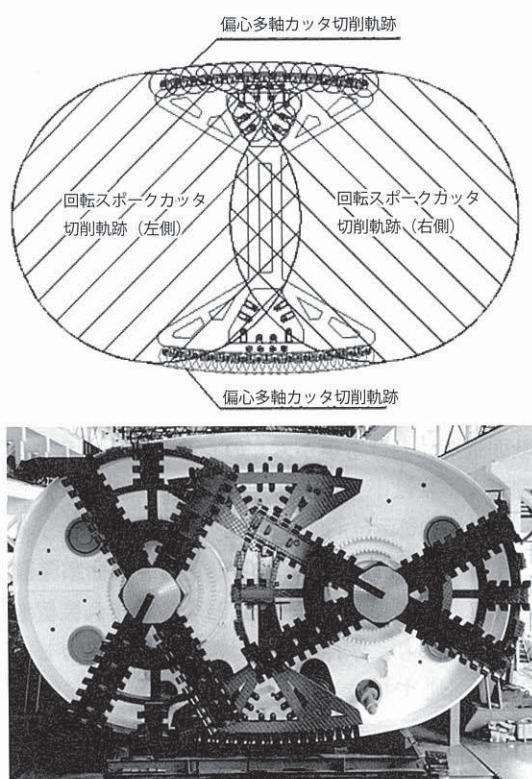


図-5 カッタ掘削軌跡

ている。掘進量と排土量のバランスをとることで、チャンバ内の圧力調整や止水を行った。軸付きタイプを用いることにより、掘削土砂の搬出効果を高めるとともに、止水効果を向上させている。

シールド掘進停止状態におけるチャンバ内土圧の低下を抑制するために土圧保持装置を装備している。バルクヘッドに設置されたシリンダーを



写真-2 排土状況

ジャッキによって伸縮させ、チャンバ容積を変化させることで、土圧の調整、バランス維持の機能を持つ。

3-3 チャンバ内土砂の塑性流動化

カッタヘッドおよびチャンババルクヘッドに注入孔を設置し加泥材を注入、掘削土と攪拌混合しチャンバ内を塑性流動化土で充満させることが重要である。

本件シールドの場合、回転スポークカッタと偏心多軸カッタとの干渉によって、チャンバ攪拌棒の取付け配置が制限され、不攪拌エリアが残存することで、土砂の固着や排土不良が発生することが危惧された。しかし、掘進対象地盤は、非常に鋭敏比の高い海成軟弱粘土であり、切削、掘進による乱れから泥濘化、流動化が生じやすく、カッタースポーク回転数やカッタトルク、スクリューコンベヤ排土量などの管理データにもとづいた無加泥掘進が可能であった。

写真-2に良好な排土状況を示す。

ただし、地盤改良区間などの比較的硬質の地盤が対象となる場合には、掘削土を流動化・排土させるために、加泥注入を実施した。

3-4 ローリング・蛇行修正

非円形断面は、シールドがローリングすることにより、内空断面確保が困難となり、セグメント組立てに支障をきたすことが考えられる。ローリング許容量については、円形よりも非円形の方が厳しく、とくに矩形断面では許容量が著しく小さ

いので、なるべく早い段階で修正操作を行っていくことが必要である。

本件シールドの基本的なローリング修正は、中折れジャッキ操作を基本としているが、機体のローリングを計測、監視し、初期兆候の微少値範囲での修正操作開始を心掛け、早い段階で以下の2方法によりローリングに対処し、良好な効果を上げた(写真-3)。

- ① マシンに錘オモリを置くバランス載荷による傾斜修正を行う。
- ② シールドの前胴底部からの注入材圧力によって調整する。

発進当初に約13/1,000のローリングが生じたが、①と②の対策により図-6に示すように比較的容易に修正が行えた。

シールドのローリング修正に加えて、セグメントリング自体のローリングが課題となった。マシンのコントロールがうまくいっても、セグメントリング自体がローリングを起こすことがある。これは組立て精度の問題で、一度傾き始めるとそれが累積していくため、セグメントの組立て精度をしっかりと確保する施工を行わなければならない。組立て時のセグメントリング継手接合ボ

ルト孔径の余裕代(6mm)を利用して修正する方法が効果的であった。

3-5 エレクタ装置

セグメントの組立てに用いるエレクタは、矩形シールドトンネルにおいては、多様(形状、重量)なセグメントに対応できる必要がある。本件にお

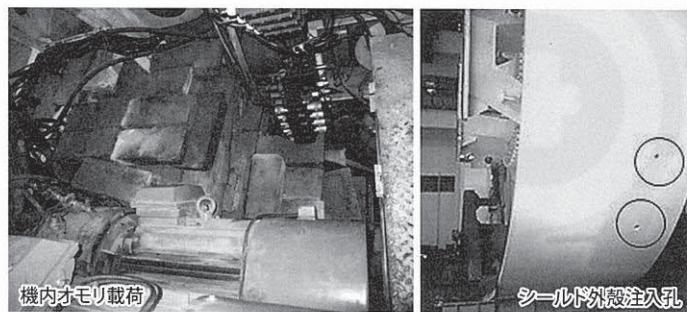
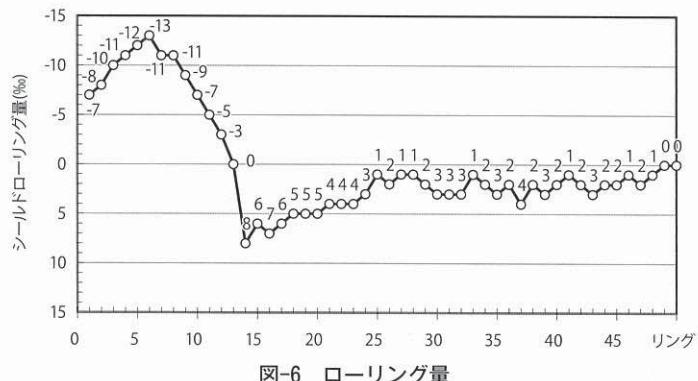


写真-3 ローリング修正



いては、実物大模型実験を実施し、セグメント組立て性能を確認している(図-7)。

セグメントリングの組立てでは、Kセグメント挿入前中柱建込み方式を基本とした。セグメント組

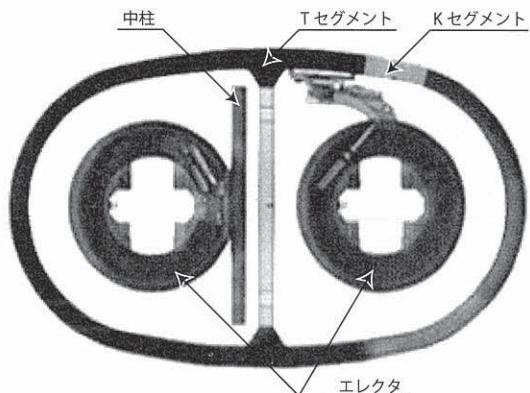


図-8 中柱建込み状況

立て手順において、Kセグメントは中柱建込み後に最終挿入し、外周リングを閉合する。

中柱建込み時のリング押上げ装置は特別には装備せず、エレクタ2基の連携による組立てを行う。図-8に示すように、中柱を挿入する前に上部Tセグメントをエレクタで把持した(図-9)。

3-6 裏込め注入

軟弱土層部の小土かぶり掘進における地表面沈下発生を抑制するために、テール中心部左右対称に各4か所の自動同時裏込め注入管を設けた(写真-4)。

同時裏込め注入システムについては、テールボイド全周にできるだけ均等圧で早期に充填でき、しかもテールスキンプレートの変形が生じないよう、注入材、注入方法、注入位置・個数を決め

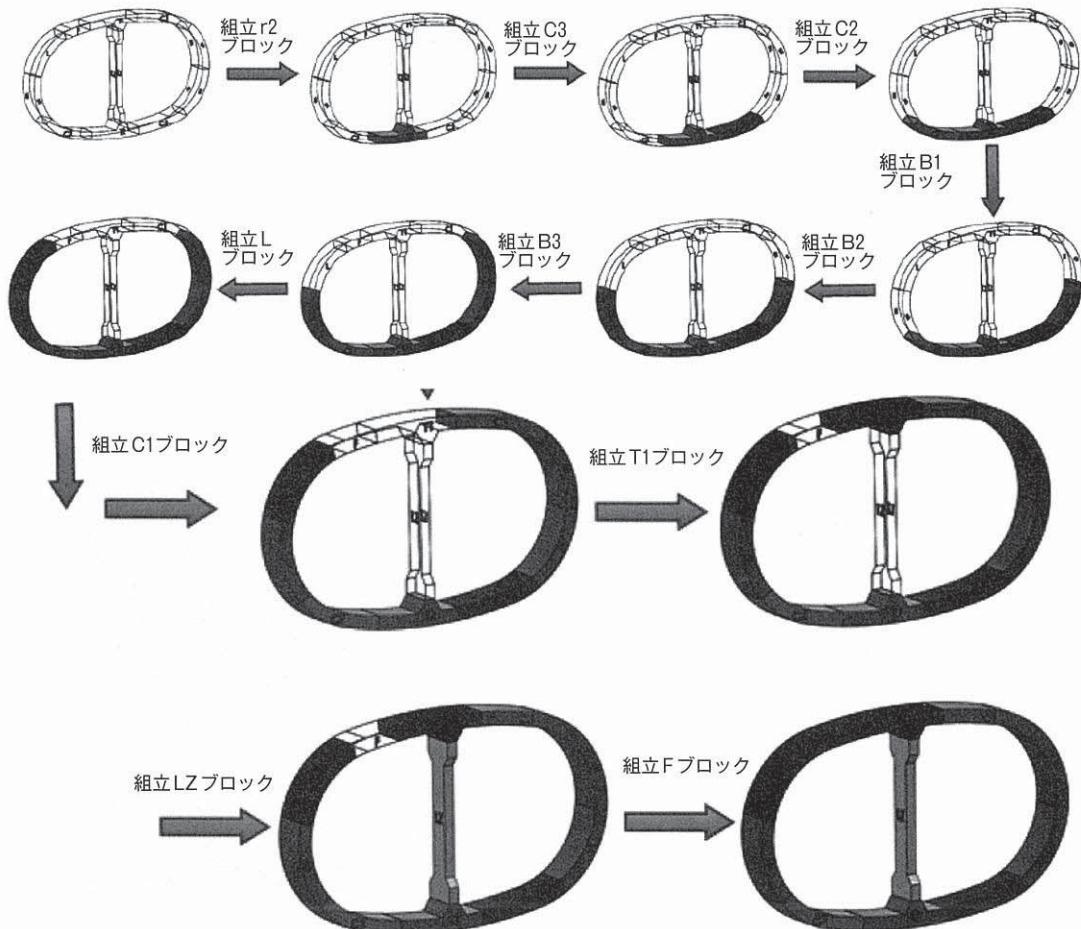


図-9 セグメント組立て順序

た。注入制御は、シールドテール部に取り付けた土圧計の値をフィードバックする注入圧力制御、および掘進速度に同調できる注入量制御を選択できる方式とした。さらに、掘進開始時、一時停止時、終了時あるいは配管洗浄時などのシーケンス制御はシールドジャッキ操作とリンクされることにより自動化した。

裏込め注入の目的は、シールド掘進時に発生するテールボイドを即座に充填し、地山の変位、崩落を抑止し、セグメントを固定することであり、所要の初期強度が求められる。裏込め材の強度発現が遅い場合、シールド後方のセグメントを地山に固定することができないため、曲線施工時にセグメントの安定が確保できず、方向制御に悪影響を及ぼすことが考えられる。

矩形状大断面で鋭敏軟弱粘土という条件下では、姿勢制御、沈下防止、均一な圧力分布などを考慮すれば、注入直後から沈下抑制機能は持たせ、またマシンの姿勢制御の反力を得ることができるよう、所要の早期強度が発現する注入材が適している。基本的には以下ののような性質が求められる。

すなわち、

- ① 圧送可能な流動性を有すること
- ② 目的とする空隙部分に充填できること
- ③ 裏込め材が硬化するまでに材料分離やブリーディングが生じないこと
- ④ 早期に均一で地山相当強度が得られること



写真-4 同時裏込め注入管

⑤ 硬化後の体積の減少が少ないこと

である。このため、寧波の高鋭敏軟弱地盤と矩形状シールド施工の特徴に対して、周辺地盤の強度、性状に適合し、かつ無公害で安価な注入材を目指して、砂、フライアッシュ、消石灰などにある種の植物繊維を加えた配合で、流動性と強度(せん断降伏強度)や所要特性(分離抵抗性や非体積収縮性)を備えた1液性注入材料を開発した。

仕様基準は以下のとおりである。

- ・脱水率≤5 %,
- ・スランプ12~14cm
- ・20hr 降伏強度 800Pa
- ・7日圧縮強度 0.15MPa
- ・28日圧縮強度 1.0MPa

3-7 滑材注入機構(背面注入装置)

矩形状シールドは背面面積が広く、掘進時に上載土砂を引きずるおそれがある。このため、シールド外殻頂部からベントナイト系の滑材を注入し、泥膜を形成することで地盤との摩擦低減を図り、土砂の引きずり、攪乱を防止した。滑材注入口は上半部だけでなく、全周に配置し、滑材が背面に広く展開し、かつチャンバへの逸走を生じないような配置と形状とした(図-10)。

3-8 テールシール

矩形状シールドにおけるテールシール技術は、円形シールドのテールシール技術の延長上にあるが、直線部分のテールブラシは、押え付け力(締

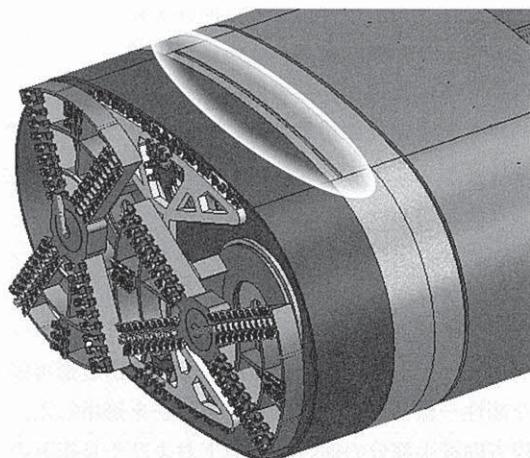


図-10 胴体部土砂引きずり防止装置

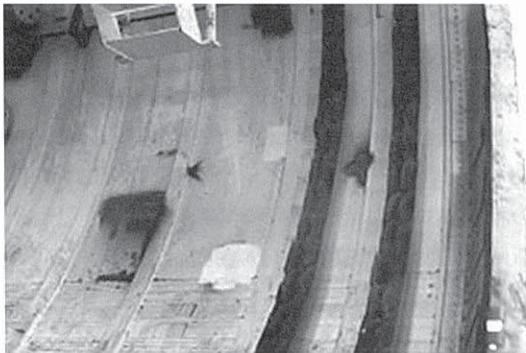


写真-5 テールシール

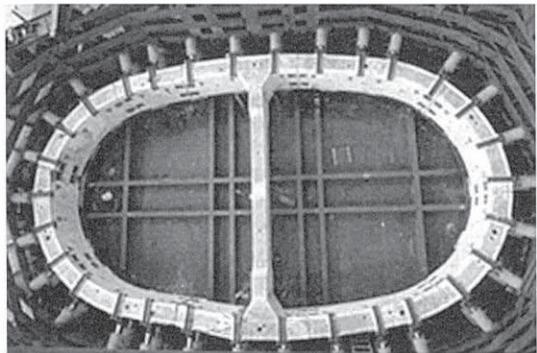


写真-6 リング載荷試験状況

付け力)が円形シールドのものに比べて劣り、テールクリアランスの偏りや裏込め材の注入圧によりテールブラシが反転し、シール目的を達し得ないことになる。このため、3段シール方式を採用した(写真-5)。

最外1段は鋼板($t = 0.5\text{mm}$, 35層)シール、内側2段はワイヤブラシシールである。鋼板シールは、ブラシシールより長寿命で信頼性、地盤適用性が高い。

4 セグメント設計

4-1 作用荷重

軟弱地盤中のシールド掘進における姿勢制御は非常に困難を伴うと想定され、本体、継手の設計では、通常より大きな競り荷重が作用する可能性を見込んでおく必要があり、さらに、中柱に関しては、地山からの偏荷重や裏込め注入圧など局部荷重、エレクタ組立て時荷重など不均等な荷重が作用する場合を考慮して、中柱に発生する曲げモーメントやバックリングに留意した余裕を持つ設計を行っている(写真-6)。

4-2 解析方法・解析モデル

セグメントリングの構造解析は、自由変形可能な剛性一様リングとして修正慣用法を適用した。周方向継手部分の曲げ剛性低下および千鳥組みの効果による曲げモーメントの分配を考慮し、 $\eta-\xi$

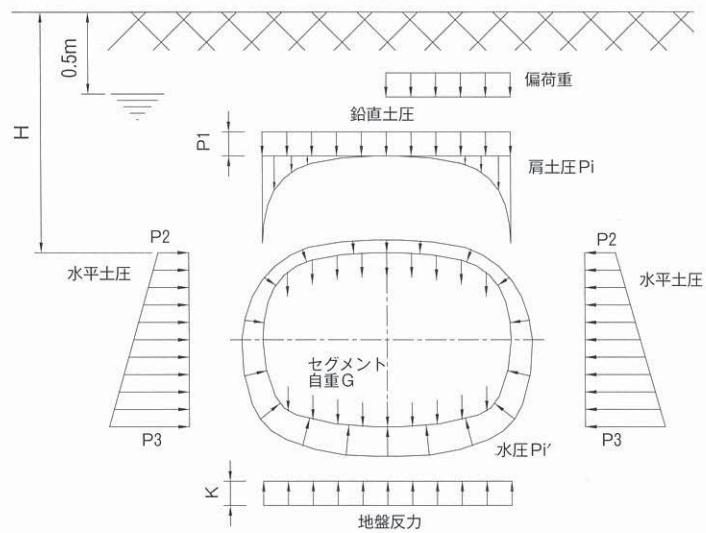


図-11 作用荷重図

表-1 継手形式

ピース間継手	リング間継手
直ボルト	斜めボルト シールド進行方向

法を採用し解析を実施している。

- ・リング全体の曲げ剛性： ηEI ($\eta \leq 1$ 、曲げ剛性有効率)
- ・セグメント本体曲げモーメント： $(1 + \xi)M$
- ・継手曲げモーメント： $(1 - \xi)M$ (M ：リング曲げモーメント、 ξ ：割増し率)

矩形状トンネル構造応力解析におけるパラメー

ター選定は、地質・水文条件、土かぶり深さ、構造形式、施工条件(施工時裏込め注入圧も考慮している)、隣接影響などを考慮して適切に行った。

また、本件では修正慣用法以外に、継手、リング載荷試験を実施し、算出した継手剛性率を用いて梁ばねモデルによるチェックを行っている。さらに、耐震設計においても応答変位法や慣性力法、特殊構造では動的解析など、中国の『地下鉄設計基準』に従って実施した。

4-3 継手形式

継手形式は表-1のようである。

- ・ビース間：M36ボルトナット×4本(ボルト2本／箇所×ダクタイルボックス2か所)
- ・リング間：M30斜めボルト(埋込みナット)×30本

5 試験施工結果

扁平大断面矩形状土圧シールドは2015年12月始めに発進し2016年1月末の約2か月で100m間の試験掘削を無事に終了した。試験掘削の結果は、大きなトラブルもなく、軟弱鋭敏粘性土地盤の小土かぶり条件下にもかかわらず図-12に示すように地表面は最大2cm以内の隆起傾向で、有害な沈下の発生を制御することができた。

掘進リングごとの総推力の変化状況を図-13に示す。地盤改良域を抜けた後の総推力は20,000kNで、装備能力の約24%であった。なお、このうち切羽土圧に相当する推力は15,000kNである。

切羽チャンバ土圧の掘進リングごとの変化状況を図-14に示す。切羽土圧も安定してほとんど静止側圧200kPaに近い状態を維持している。

深度分布も図-15に示すように直線的で、深度に対する土圧増加の勾配は掘削土の単位体積重量に近似している。最下部の土圧がやや大きいが、

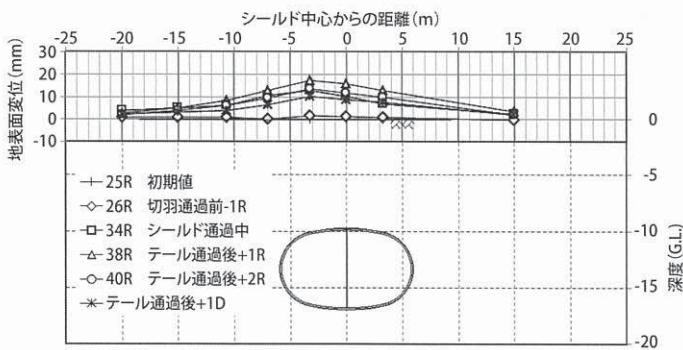


図-12 地表面変位

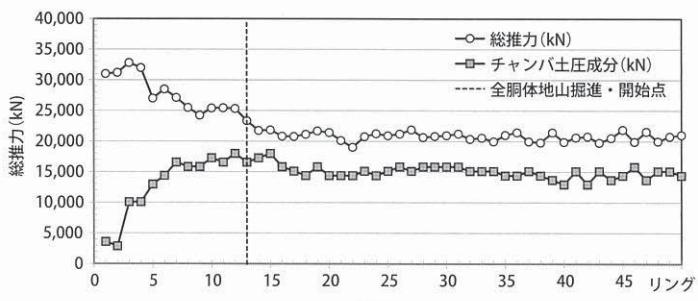


図-13 総推力

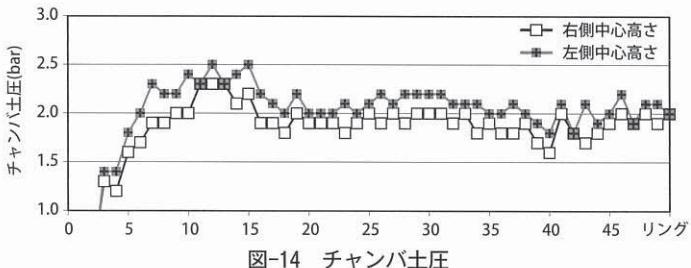


図-14 チャンバ土圧

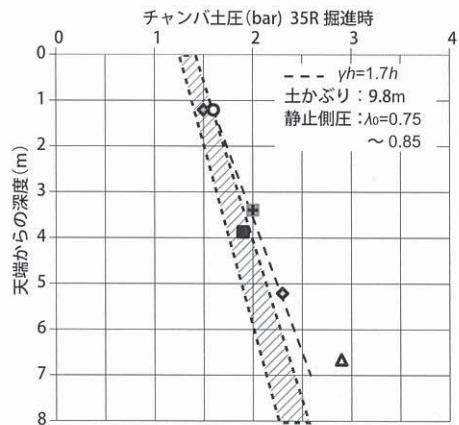


図-15 チャンバ土圧深度方向分

これはチャンバ内の下部掘削土の攪拌・排土状態が若干不良であることによると思われるため、今後、より流動化させるための工夫を必要とする。

裏込め注入量に関しては、全周圧力分布が均一になるように上・下半を6:4の比率で注入し、注入率はおおむね130%（オーバーカット分をも考慮した実注入率で120%）としている。

6 おわりに

近年都市部においては、地上だけでなく地下空間の利用も進んでおり、新たな地下空間利用のためには、従来の円形状トンネルだけでなく、矩形状などの非円形トンネル技術が重要となる。

ここでは、寧波市地下鉄3号線建設において扁平大断面矩形状土圧シールドを開発し、試験施工を実施した結果、軟弱鋭敏粘性土地盤での小土かぶり条件下において、地盤沈下も少なく順調な掘削を行うことができた。今後、曲率半径350mのカーブ掘進や4号線でのやや硬質な地盤の掘進に向けてシールドや施工法の改良、改善をしていく予定である。

また、今回の鋭敏粘性土地盤中にシールド施工

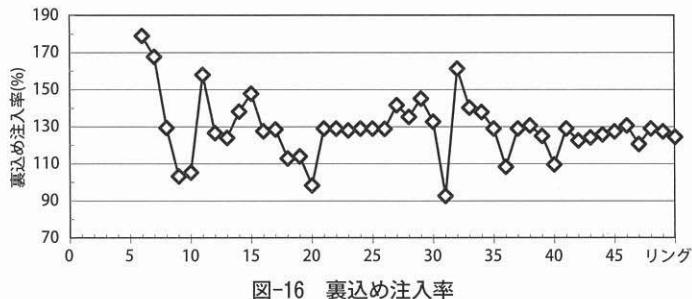


図-16 裏込め注入率

では、地盤の攪乱要因による圧密沈下が長期的に発生する可能性がある。さらに、構築された地下鉄トンネルは、シールド施工時の影響による地盤沈下のほかに、以下に示すような長期的なトンネルの沈下変状が想定される。

- ① 開業後の車両走行振動による地盤沈下
- ② 周辺工事による地盤変形などの近接影響
- ③ 近傍における揚水による地下水位低下に伴う圧密沈下
- ④ セグメントのクラックや目地などからの漏水に伴うトンネルの沈下

従って、鋭敏粘性土地盤でのシールド工事では、より慎重に施工管理を行いながら、高品質のトンネルを建設する必要がある。この試験施工区間ににおいても以上の目的のために長期的な地盤やトンネルの変形を観測していく予定である。