

小田急小田原線 東北沢～世田谷代田間の 複々線化事業及び連続立体交差事業

ODAKYU ODAWARA LINE HIGASHIKITAZAWA AND SETAGAYA DAIDA
DOUBLE-LINED BUSINESS AND CONTINUOUS CROSSOVER BUSINESS

伊藤正樹¹・伊藤健治²・上野修彦³・高梨圭介⁴

Masaki ITO¹, Kenji ITO², Nobuhiko UENO³, Keisuke TAKANASHI⁴

The basement of the Odakyu Odawara Line Higashikitazawa - Setagayadaita Station interval (approximately 1.6km) wrestled by construction for 14 years. I introduce a shield tunnel, the excavation tunnel construction led by the Shimo-Kitazawa Station part this time.

Key Words : Subway, shield tunne, excavation tunnel, groundwater

1. 事業概要

小田急電鉄では，輸送需要に対応するため，列車の増発や長編成化をはじめとする輸送力の増強に努めてきた。こうした施策によって混雑率は若干緩和されたものの，従来の複線設備では輸送力に限界があった。
(最大混雑率200%)

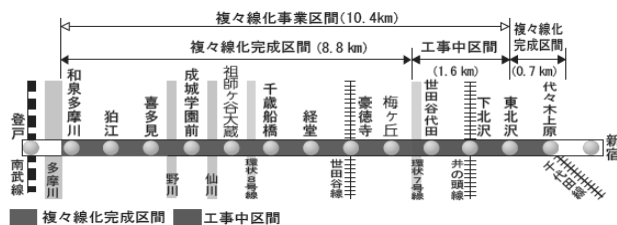


図-1 事業略図

このような状況を抜本的に改善し，快適な輸送サービスを実現するため「複々線化事業」を東北沢～和泉多摩川間（約10.4km）で実施している。

この複々線化事業は，東京都の「連続立体交差事業」と一体的に実施しており，関係者と協議のうえ，事業化の目処がたった個所から事業を進めてきた。このうち，狛江地区（高架式，2.4km）・世田谷地区（高架式，6.4km）については，すでに複々線化および立体化が完成しており，現在は，残る下北沢地区（地下式，1.6km）の工事を1日も早い完成を目指し進めている。本投稿では，下北沢地区の14年間にわたる地下化工事の取り組みについて紹介する。



図-2 代々木上原～梅ヶ丘駅間 事業区間縦断面図

キーワード：地下鉄，シールドトンネル，開削トンネル，地下水

¹～⁴ 非会員 小田急電鉄株式会社複々線建設部下北沢工事事務所 Odakyu Electric Railway, Multiple Double Track Construction Department
(E-mail: keisuke.takanashi@odakyu-dentetsu.co.jp)

(1) 地域特性

下北沢地区は、1日約200万人ご利用される小田急線の中でも最混雑区間（混雑率191%）である中で、周辺地域は世田谷区および渋谷区に位置しており、世田谷区の広域生活拠点である下北沢を中心に、世田谷区内でも特に住宅や商業施設が密集している。この区間にある9カ所の踏切は、ラッシュ時に50分以上遮断される開かずの踏切であったため、地域住民の日常生活や南北市街地の一体化の阻害要因となっていたほか、緊急時における消防・医療活動も妨げていた。（図-3）

(2) 構造形式

下北沢駅周辺では住宅や商店が密集している等の要因から下北沢駅付近は2線2層構造とし、下北沢から世田谷代田間の将来急行線はシールド工法にて構築。

下北沢駅シールドではホーム・地上通路を構築する関係からシールド切上げを行っている。

その他の駅部、駅間については開削工法による箱型トンネルにて構築としているが、下北沢～世田谷代田間についてはシールドトンネル上部を開削して箱型トンネル構築を行った。（図-4）



図-3 下北沢地区踏切部の様子（事業着手前）

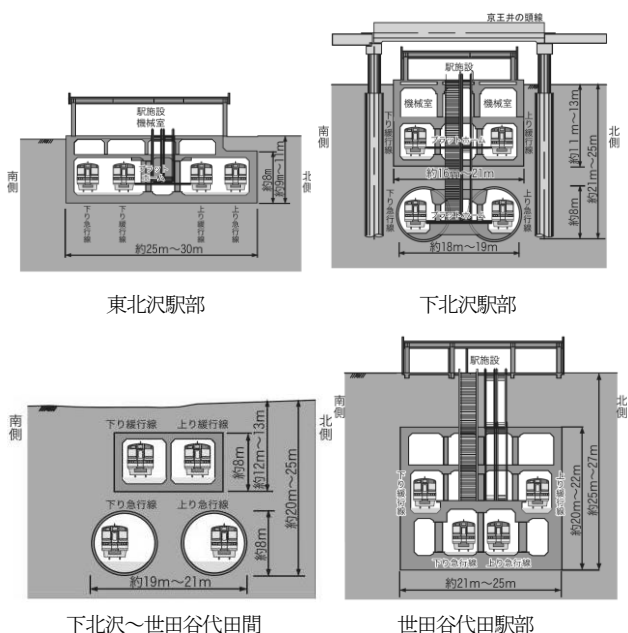


図-4 構造概要図

(3) 下北沢駅部の工事ステップ概要

下北沢駅部は商店・住宅密集地を考慮した2線2層（地下3層）構造で尚且つシールド・開削併用となる為、2通りの工事ステップとなった。（図-5, 6）

《Step-1》 開削用仮土留め・工事桁支持杭を作業構台より施工し、在来線工事桁化しつつ地下にてシールド掘進を行う。

《Step-2》 工事桁支持杭の支持力が確保可能な範囲まで開削を進めた後、本設中床版に工事桁を受替えを行い逆巻き施工に切替える。本設中床版はシールド間を貫く中間杭と両側仮土留めで支持する構造とした。

《Step-3》 逆巻き施工後は昼夜間での掘削・B2F緩行線躯体構築・シールド切上げ・接合を行い急行線開業設備工事を経て2013年3月に地下化となる。

《Step-4》 地下化後は、地上鉄道設備・作業構台撤去を行いつつB1F躯体構築を行った後、開業設備工事をB1F～B3Fにかけて行い複々線化となる。

《換気塔部Step-1》 地上橋上駅舎の移設は困難と判断しシールド構築を優先した。

《換気塔部Step-2》 シールド内より地中鋼管接続・止水を行い、下床版のみ切上げ・RC接合を行う。

《換気塔部Step-3》 地下化後に橋上駅舎・ホームを撤去した後、開削により箱型トンネル及びシールド上部切上げ・RC接合を行う。

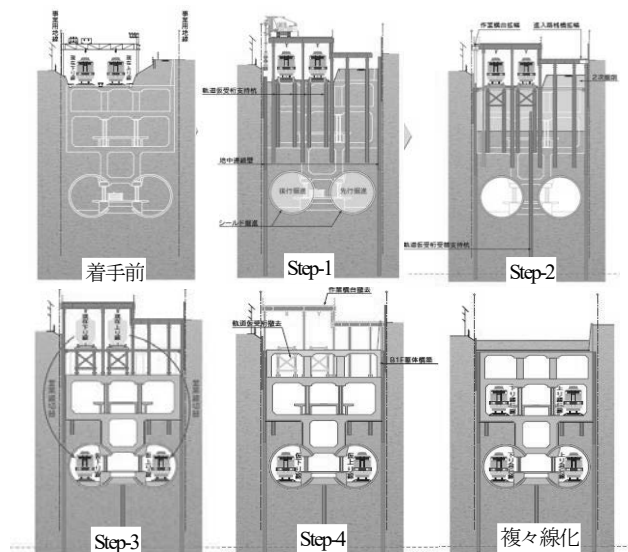


図-5 下北沢駅部工事ステップ図

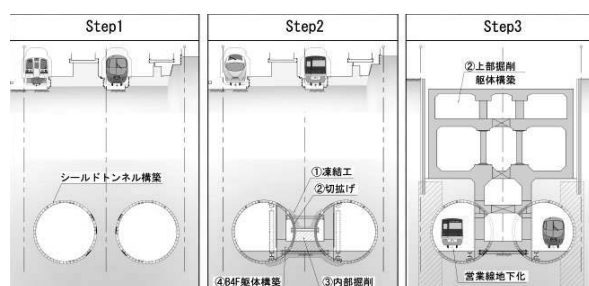


図-6 換気塔部ステップ図

(4) 下北沢地区の地層構成・地下水概要

事業区間の地層は地下10mまではN値＝0～5程度のローム層・粘土層で構成され、10m以深は砂層・礫層・上総層で構成されている。また、下北沢駅の東西地形には谷底低地部の、沖積層が介在しており全体的に地下水は浅く、豊富な地形である。（図-7、8）

上記の地層・地下水条件での大規模トンネル構築には、地下水流動保全対応が必須となるため、工事期間中及びトンネル構築後の2通りの検討を行い実施した。

《工事期間中の対応》

谷底低地部の沖積層地下水は、過去最低水位2.0m以上低下させると地盤沈下による家屋影響が生じる事が解析・有識者意見から判明した事を受け、工事期間中は沖積層を中心に仮設リチャージウェルを設置し上流から下流への地下水流動保全を実施した。

また、開削に伴う仮土留めについても地中連続壁により地下水低下工法は採用しない方針とした。

《トンネル構築後の対応》

トンネル構築後は恒久対応については、被圧地下水用及び不圧地下水用としてトンネル躯体の上部と下部に仮土留めを部分撤去し通水層を設ける事で対応した。

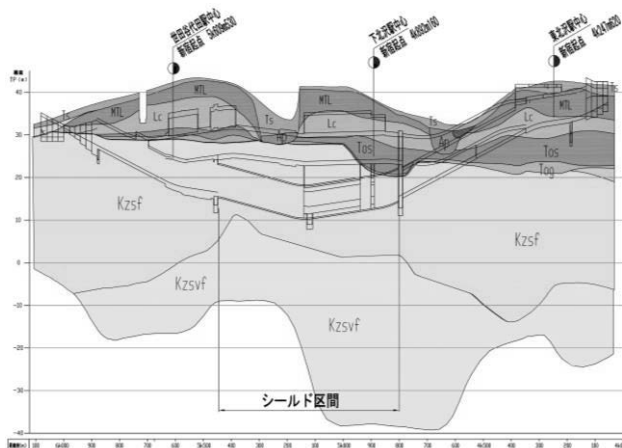


図-7 地層構成図

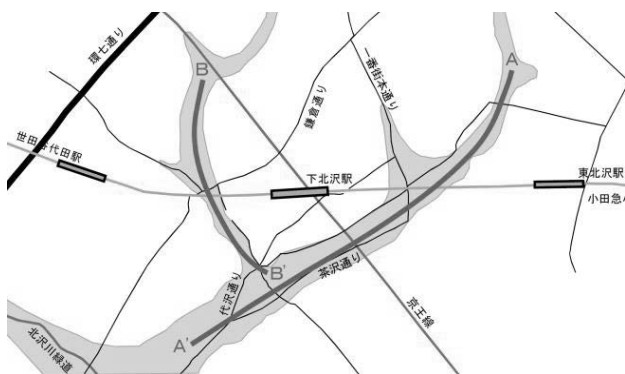


図-8 谷底低地部・地下河川図

2. シールドトンネル工事

下北沢～世田谷代田間はシールド工法は、在来線直下5m～15m、トンネル外径φ8,100mm、掘削延長1,290mを泥水式シールド工法により世田谷代田駅付近の立坑を発進し、下北沢駅付近の回転立坑でUターンして2本（上下線）のシールドトンネルを構築した。（図-9～11）

(1) シールドセグメント選定

シールドセグメント選定には、複雑な工事手順を解析・検討を行い2種類を使い分けする事とした。

1種類目は、下北沢駅ホーム部での切抜きの為、強度・施工性を考慮したスチールセグメントを採用。

（図-12）

2種類目は、在来線地下化後にシールド上部を開削し緩行線トンネル構築時に生じるセグメント応力等を考慮して、ダクタイルセグメントを採用した。（図-13）



図-9 泥水式シールドマシン



図-10 シールドUターン状況

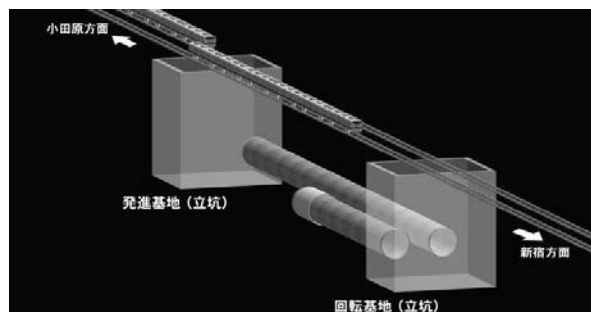


図-11 シールド工事概要

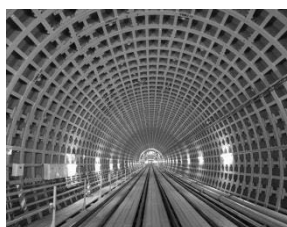


図-12 スチールセグメント



図-13 ダクタイルセグメント

(2) シールド掘進

シールド掘進を進めるにあたって課題となった事は、当該区間は小田急線の最混雑区間であり、工事影響による鉄道抑止が発生した場合、1日約200万人のお客様に影響を与える事となる。さらに住宅密集地の中、過去に

例が少ない在来線直下を並行してシールドマシンを掘進することとなる。

シールド掘進に伴う地表面沈下量は解析値最大4.6mmと軌道管理基準値内であったが、24時間体制で計測監視できるよう層別沈下計・トータルステーション・人力による軌道監視（糸張り計測）等の各計測管理を行うなど、異常時における対応計画を基に万全の体制を整えた。さらに鉄道輸送の安全と工事の安全を確保すべく、学識経験者などで構成する技術委員会にて安全面・技術面の検証を行いながら工事を進め、結果として地表面沈下量は2～3mmに留まり、鉄道・周辺地盤に影響を与えることなくシールド掘進を完了させることができた。

（図-14）

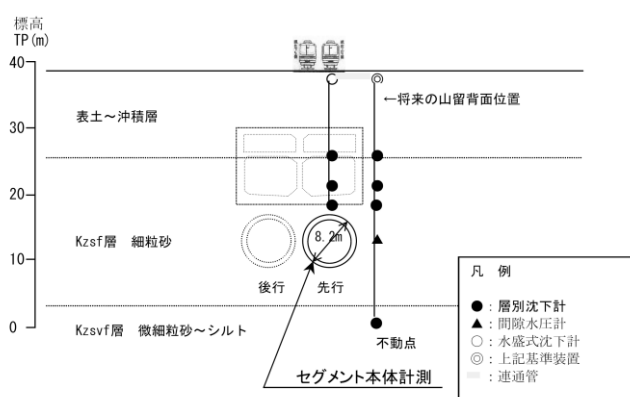


図-14 計測機器配置図

3. 下北沢ホーム部での開削準備工（仮設工事）

下北沢駅部は2線2層構造で特に狭隘な作業環境下で1日約12万人利用者の安全を確保した開削準備工（仮設工事）が求められた為、下記の取組みにて対応した。

《課題①》

下北沢駅ホーム部では夜間線路閉鎖でなければ、仮土留め杭・工事桁支持杭等の打設が出来ず、搬入出時間を考慮すると実作業が1時間程度しか無い。

《課題②》

杭打ち重機は大型な為、狭隘ホーム部内を搬出入することが困難であり、重機の小型化が求められる。

上記課題は工期・工費共に問題があったため抜本的解決策として、在来線直上に作業構台を設置することで、仮土留めは昼間作業を可能にでき、工事桁支持杭は線路閉鎖間合い1本/日を可能にする事ができた。（図-15）

各支持杭施工が完了した後は、在来有道床軌道を線閉・停電時間内の一晩でホーム部の受け替える。桁架設は下北沢駅部62連の工事桁を50t軌陸ラフタークレーンによって3連/週のペースで架設を行い、約6ヶ月に渡り施工を行った。（図-16）

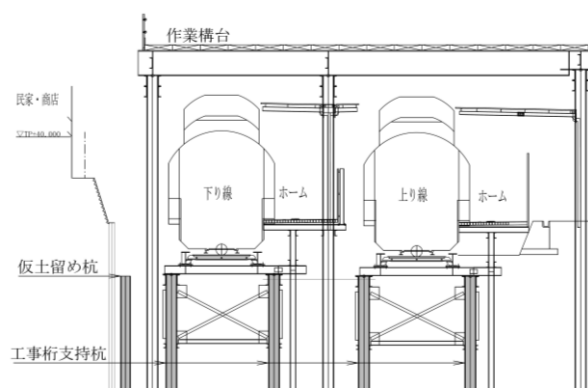


図-15 作業構台・各支持杭断面図



図-16 下北沢ホーム内の工事桁化工事

4. シールド切上げ

(1) 下北沢駅部シールド切上げ

下北沢駅周辺地域は商店・住宅密集地になり用地取得等が困難な事から、2線2層構造とならざるを得なく最深部急行線ホーム部では210mの連続シールド切上げを行いホーム幅員を確保すると共に、地上までの昇降設備等も設ける必要があった。その為、シールド切上げはシールド底版までシールド間を掘削し、スチールセグメントのスキンプレートの切断・撤去後に上・下床版のRC構造との接合を施工した。（図-17, 18）

切上げの為のシールド間掘削は、地下水流入・盤膨れ・側土圧によるシールド変位・変形等のリスクが想定されたので、下記対応をとった。

《シールド変形への対応》

変形内部支保工による変形制御する方針としたが、切上げ・接合施工に妨げず、変形量が最小限になるよう数パターン配置の解析を行い設置した。（図-20, 21）

《シールド変位への対応》

シールド上部掘削による荷重バランスが崩れて生じて変位するので、シールド直上土荷重を可能な限り残しつつ、切上げ・接合させる必要がある。その為、仮土留めを行い可能な限り土荷重を確保した。（図-20）

《地下水対応》

地下水流入・盤膨れ対策としては、シールド以深の難透水層である上総層（Kzsvf）まで仮土留め・止水壁を延長し土留め内をDWにより地下水流入の事前確認を行った後に掘削を行うことで、シールド変位・変形量を最大5mmに抑制させる事ができた。



図-17 シールドスキムプレート撤去完了

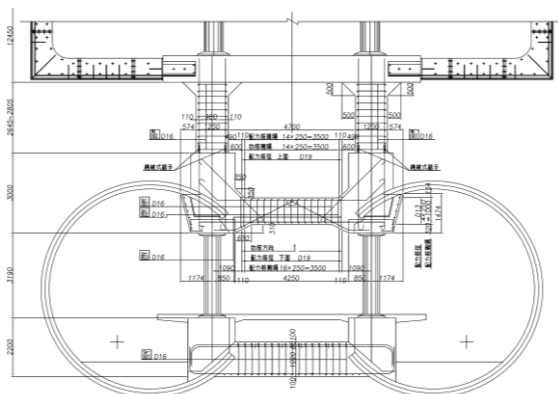


図-18 セグメント上部接合構造図

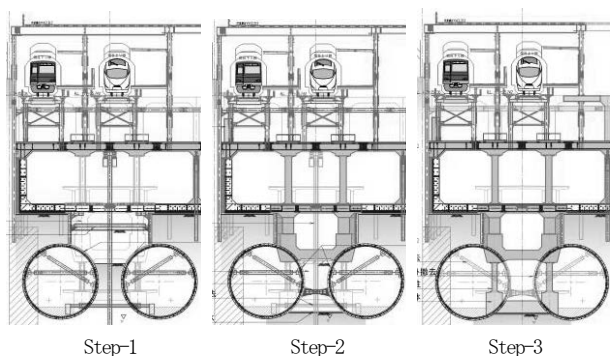


図-19 シールド接合ステップ図



図-20 シールド変形防止工



図-21 シールド切上げ完了

(2) 換気塔部凍結工法によるシールド切上げ

下北沢駅付近に位置する換気塔部は、1期工事において地上に営業線があることに加えて、既存の橋上駅舎が直上に位置していることから開削工法による上部ボックスカルバートの構築およびシールドトンネル間の切上げができない。

また、営業線が地下化した後の2期工事において、シールドトンネル間の切上げを行うことは、営業線間を切上げることとなるため作業時間の制約や列車近接での施工といった難工事となりリスクが高い。そのため、1期工事中に凍結工法による止水性の確保・パイプルーフによるシールドトンネルの安定性確保を行い、シールドトンネル間の非開削切上げ施工を実施した。施工にあたっては、凍土の融解による漏水、凍土造成・解凍に伴う地表面の凍上・沈下、シールドトンネル断面力・変形への影響等様々なリスクが想定されたが、対策および施工時の計測管理を確実にを行うことで、無事にシールドトンネル間の切上げ施工を完了することができた。(図-22～25)

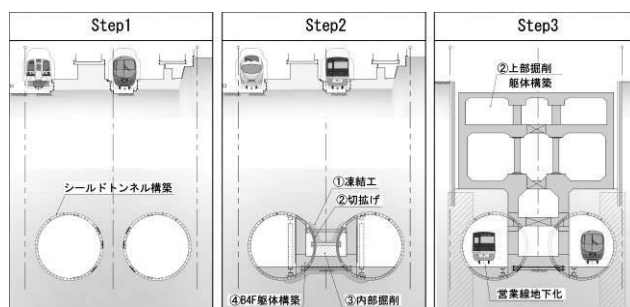


図-22 換気塔部切上げステップ

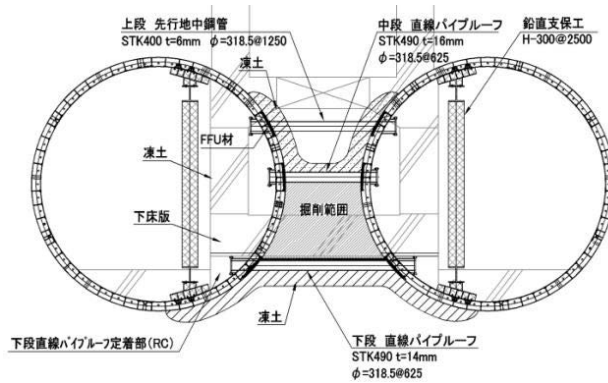


図-23 凍結工法による非開削切上げ概要



図-24 シールド間掘削状況

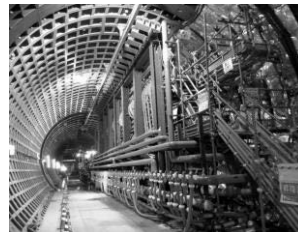


図-25 プラント設置状況

5. 下北沢駅部開削工法

(1) 逆巻きスラブによる工事桁受替え

下北沢駅ホーム内への工事桁架設完了後の開削トンネル構築までは、2ー(3)工事ステップ概要で述べた通り、工事桁支持杭根入れ長がシールドトンネルにより不足していることから、本設中床版に受替えを行い逆巻き施工にせざるを得なかった。

中床版受け杭は両側仮土留め（H-300×300@800 mm）と中間杭（H-700×700@3m）にて支持する構造としたが、中間杭荷重分担量が大きいため中間杭沈下量が解析値＝15 mmとなり、許容軌道管理値 8 mm以内への制御・管理が必要となった。

《プレロード対応》 中間杭と中床版間にジャッキを設け受替え前にプレロード導入する事で中間杭初期沈下を行い数mmの沈下を促進させた。

《計測管理》 掘削による周面支持力損失による中間杭沈下に対しては、中床版への水盛沈下計設置、中間杭への軸力計設置等により 24 時間即時検知できる体制とした。

上記対応により、2 本の支持杭軸力抜けが生じたが、再プレロード対応により鉄道運行に支障なく、掘削完了させることができた。（図-26～28）

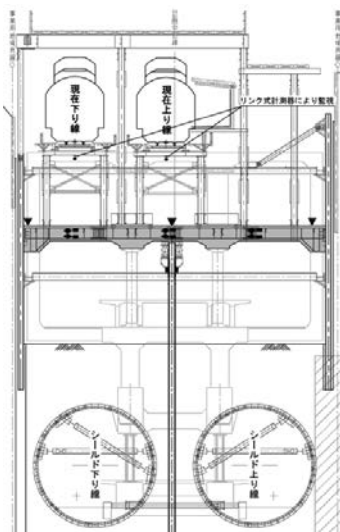


図-26 計測配置図

	計測項目	使用機器
▽	工事桁変位	リンク型変位計
▽	中床版沈下	連通管式沈下計
◆	中床版応力	鉄筋計
■	中床版応力	表面ひずみ計
■	中床版軸力	表面ひずみ計

図-27 計測機器凡例



図-28 施工状況図

(2) B2F 緩行線トンネル構築

下北沢駅部への主要道路は幅 6 m と狭く、商店街と住宅街を通過せざるを得なく、度々苦情が寄せられていた。工事桁受替えまでは主に仮設工事であり多台数の工事車両はなかったが、周辺環境が車両台数増加を許容できない状況にあった為、B2F 緩行線トンネル構築時には車両制限による工期遅延が想定された。

その為、工期短縮及び車両台数低減を図る対応として、RC トンネル構造から工場製品を現場組立する工法変更

を行った。B2F トンネル構造はホーム区間で躯体幅が徐々に縮小し、昇降設備・換気設備等の開口を多く複雑な構造となるので RC プレキャスト化の対応は困難と判断し、鋼殻セグメントを用いた。（図-29～35）

異種接合ではある中床版 RC と鋼殻セグメント接合部では、ずれ止めとして PBL ジベル構造としたが、これほどの大規模採用が過去に無かったため、実寸大 1/2 試験を行い設計・解析との整合性を確認した。

結果として、鋼殻セグメント採用による車両台数の上限制限をしつつも 2 ヶ月の工期短縮となった。

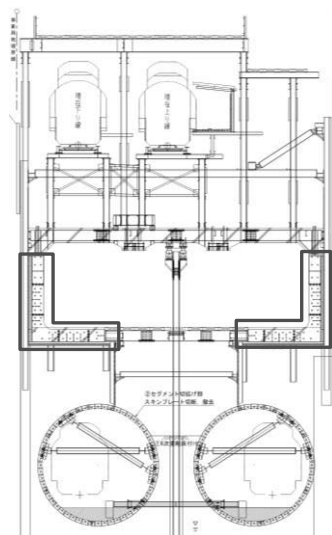


図-29 躯体配置図

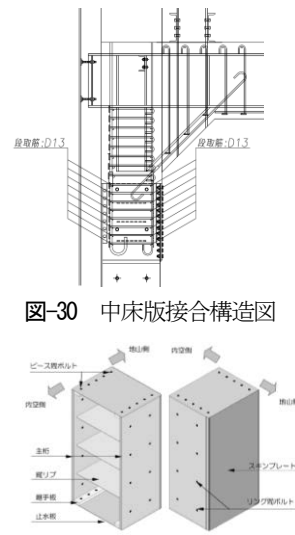


図-30 中床版接合構造図

図-31 鋼殻セグメント

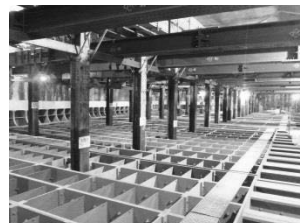


図-32 鋼殻セグメント設置状況



図-33 鋼殻セグメント設置状況



図-34 中床版接合施工状況



図-35 鋼殻セグメント設置完了

6. 地下化後の主な工事概要

地下化後、京王井の頭線交差部（以下、京王交差部とする）を含む下北沢～世田谷代田間の緩行線箇所の箱型トンネルを構築するとともに、3 駅の駅舎を地上部に構築している。以下では、営業線直上での工事について紹介する。

(1)緩行線箇所の箱型トンネル区間

京王交差部を除く箱型トンネル区間は、営業線が運行するシールドトンネル直上部を開削工法により箱型トンネルを構築した。この構築にあたって特徴は、営業線直上を約 460m 並行に最大掘削深さ 15mの工事事例が少なく、またシールドトンネルと箱型トンネルとの最小離隔で約 700mmである。

上記条件での施工において、下記の課題が考えられた。
 《課題①》 シールドトンネル上部の掘削により、地中応力が解放され地盤が隆起するリバウンド現象が生じ、それに伴って地盤内のシールドトンネルも上方に変位することが想定される。(図-36)

《課題②》 上方の土圧が除荷されることで、元々等方から作用していた土圧が偏荷重状態となり、シールドトンネルに変形が生じることも想定される。(図-36)

シールドトンネルの変形を出来る限り抑制し、営業線に影響を与えない検証・施工方法が求められた。

《対応① FEM 解析による事前変位変形予測》

既往の論文^{1) 2)}を参考に、横断方向と縦断方向の二次元弾性FEM解析を重ね合わせて、三次元効果を評価することで最大リバウンド量=19mmを導き出し、更にシールド変位量から軌道高低狂い量 4mmを導き出す事で軌道管理値内であることを確認した。(図-37, 39)

《対応② 計測管理体制》

安全な鉄道運行確保のため、計測管理体制を整えた。

- ・シールド変位が大きい両立坑付近には、セグメント変位を測定できるようトータルステーションを設置。
- ・軌道変位測定にはリンク式計測を両立坑付近に設置。
- ・セグメント内部には応力計・目開き計を設置

上記計測機器を設置することで、変位と応力の多角的な管理を行い掘削方法等に反映させる事で、ほぼ解析値通りの変位で完了させる事ができた。(図-38)

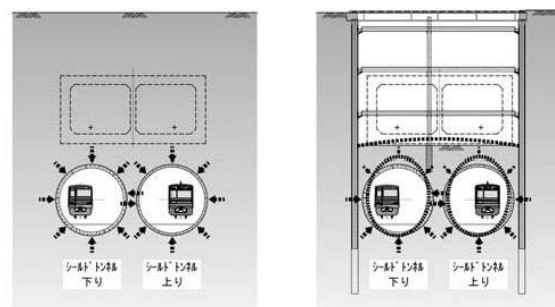


図-36 上部掘削により想定されるリスク

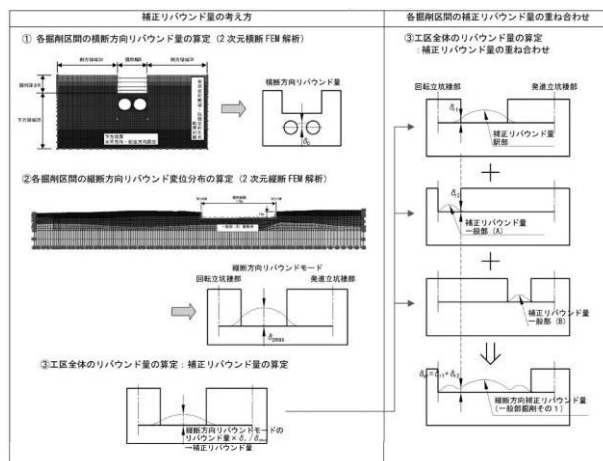


図-37 事前解析 検討手法概要図

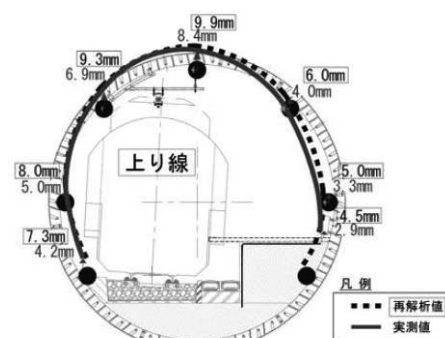


図-38 上部掘削時のシールドトンネル横断方向変位計測結果-再解析結果比較

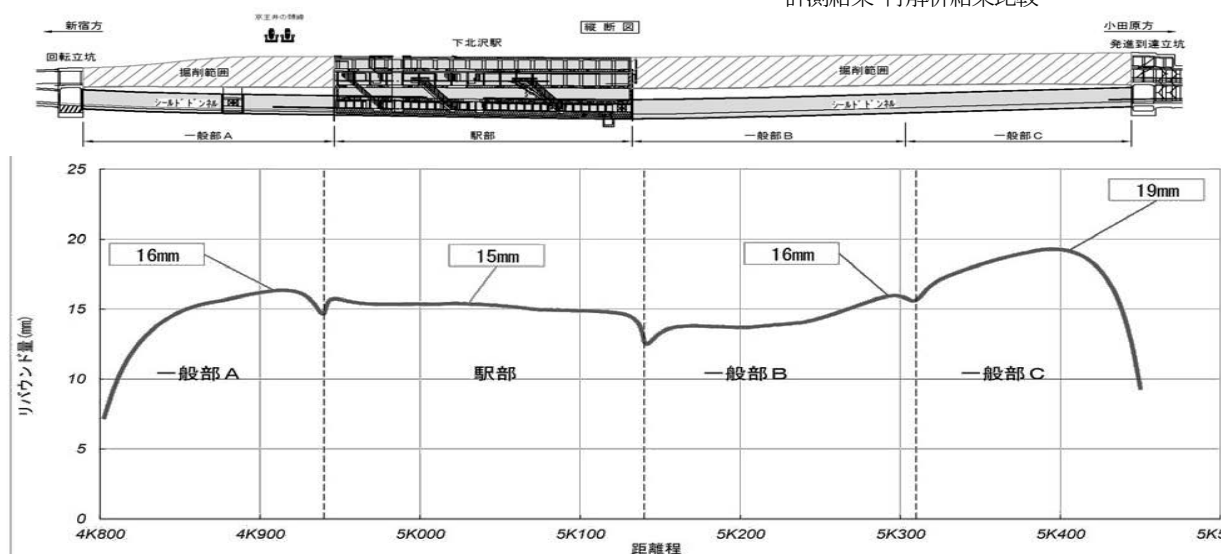


図-39 上部掘削時のシールドトンネル縦断方向変位図

(2) シールド回転立坑～京王交差部区間

回転立坑～京王交差部間の箱型トンネル構築は、回転立坑～換気塔部は順巻き施工、換気塔～京王交差部を逆巻き施工で計画する中で、京王井の頭線橋梁の工事桁化後でなければ換気塔～京王交差部の止水連壁が施工できず、工事の長期化が問題となった。その為、京王交差部手前でシールド直角方向に新たな止水壁を構築し、工事進捗を図る計画変更をおこなった。（図-40）止水工法には凍結工法、薬液注入工法、高圧噴射攪拌工法が考えられたが、凍結工法は工期的に不利と判断し薬液注入工法と高圧噴射攪拌工法の併用を採用することとした。まず高圧噴射攪拌工法にてシールド間止水壁造成を行い止水壁内に立坑を設置し、立坑内部よりシールド底部への薬液注入による止水壁造成を行う事とした。（図-41）シールド底部への薬液注入はシールド影響を与えないよう低圧浸透注入としたが、注入圧力・注入量が地盤条件によって異なる為、事前に現場注水試験を行う限界注入速度 50/分を導き出した。（図-42）

また、営業線シールド内部では鉄道運行を確保するべく、リンク式計測による軌道監視やシールド側部への水盛り計測器を設置することで、変状時の即時対応体制を整え施工した結果、シールド隆起することなく止水壁造成を完了することができた。

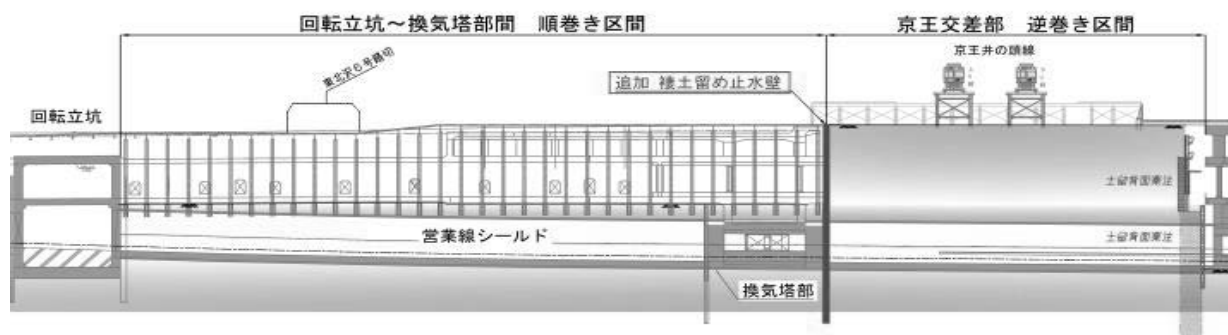


図-40 回転立坑～京王交差部縦断面図・断面図

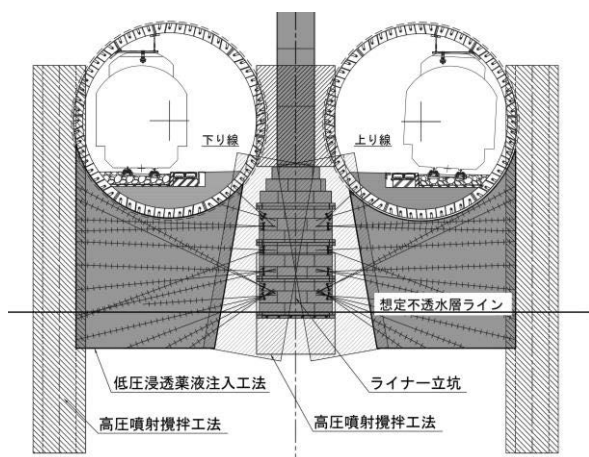


図-41 土留め杭とシールド直下の薬液注入

7. おわりに

一体的に進めている下北沢地区の複々線化事業及び連続立体交差事業は、2013 年 3 月の地下化により事業区間にあった 9 箇所の開かずの踏切が解消し事業は一つの節目を迎えた。

現在は、2017 年度末の複々線化及び 2018 年度事業完了を目指し、今後も鉄道輸送安全と安全な工事の確保、住民との調和を図りつつ、『利用しやすい鉄道』『住みやすい街づくり』への早期実現のため、国土交通省ならびに東京都等の関係者のご指導とご協力を頂きながら 1 日も早い完成に向けて精力的に工事を進めていきたい。

謝辞：本事業は学識経験者にて組織された小田急下北沢地区線増連立事業技術委員会を2007年に設立し、約13年間に渡り委員長の小山幸則氏をはじめ各委員の皆様の適切な指導のもと、複々線化完了まで至る事ができました。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 財団法人 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説－開削トンネル，pp. 429-436，2001.
- 2) 國井一史，角田浩，小西由人，金倉隆志，岡井春樹：大規模開削工事に伴う地下鉄シールドのリバウンド対策と実挙動，トンネル工学研究論文・報告集，第 12 巻，2002.

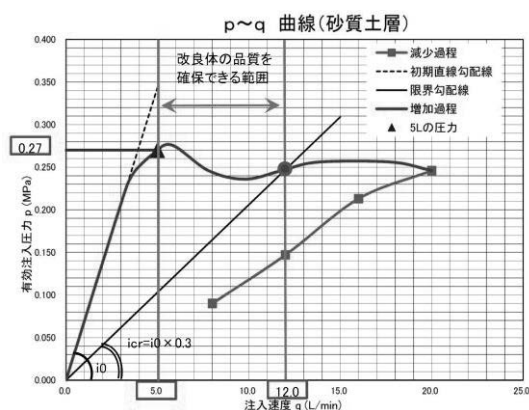


図-42 限界注水試験結果