

営業線直下における4線地下式の線増連続立体交差化工事

村上達也・尾関孝人・熊谷翼

小田急電鉄小田原線（代々木上原・梅ヶ丘駅間）連続立体交差及び複々線化事業は、小田急小田原線の踏切での慢性的な交通渋滞の解消を目的とし、鉄道と道路を連続立体交差するとともに、輸送サービスの改善を目的とした鉄道の複々線化を同時に行う都市計画事業である。昭和39年に東京都市計画都市高速鉄道第9号線として都市計画決定され、昭和46年から順次事業化している。下北沢地区については、代々木上原駅～梅ヶ丘駅間の2.2kmを地下化により連続立体交差化を図るとともに、約1.6kmを複々線化し、一部にはシールド工法を用いた2線2層式で施工するものである。

本稿では、この下北沢地区における連続立体交差・複々線化工事のうち、シールドおよび開削工法による躯体構築工事を紹介する。

キーワード：連続立体交差、複々線化、営業線近接、泥水式シールド、シールドトンネル切掛け、地中連続壁

1. はじめに

本事業では、代々木上原駅から梅ヶ丘駅間の2.2km区間において、連続立体交差工事と複々線化工事を一体的に進めた。

図-1に示すように、当社施工の第3工区においては、1期工事においてシールド工事および駅の一部構

築を行った。シールド工事では、世田谷代田駅付近の発進立坑からシールドマシンを新宿方面に発進させ、下北沢駅直下を通過後、回転立坑で反転して小田原方面に向かって掘り進み、直径約8m、延長約645mの円形トンネルを2本築造した。同時に下北沢駅部では約180mの軌道仮受けを行い、その直下を開削工法により掘削してシールドトンネルと接続し、地下の駅

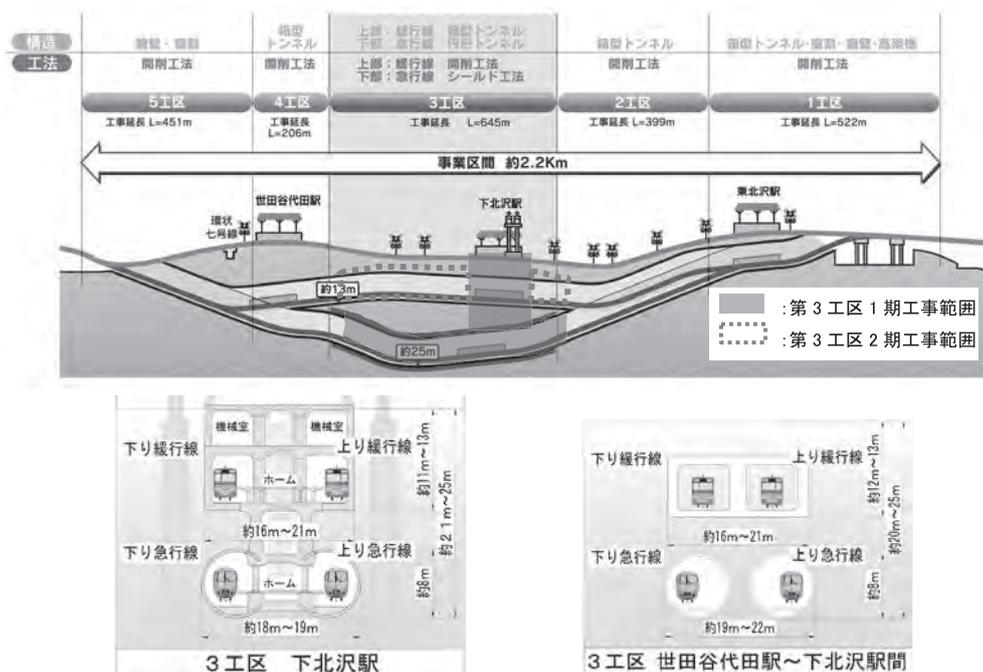


図-1 工事概要

構造物となる箱型トンネルをシールド上部に構築した。

2期工事では、下北沢駅から新宿側約155m区間と小田原側約310m区間を地上から開削工法により、営業線直上を低土被りで掘削し、シールド上部に箱型トンネルを構築した。

本稿では、これらの工事のうち1期工事でのシールド工事およびシールド切掘り工事、2期工事でのシールド直上での地中連続壁工事について述べる。

2. 営業線直下のシールド施工

(1) 概要

営業線直下 (GL-15.8m ~ GL-19.5m) で、外径φ8,100mm、掘削延長1,290mのシールドトンネルを泥水式シールド工法により施工した。写真-1にシールドマシンを示すが、マシン外径はφ8,260mm、機長8,820mm、総重量約550tであった。トンネルの土被りは約13~20mであり、シールド通過部の土質



写真-1 シールドマシン

は良好な上総層 (N値50以上) 内に位置した。

本シールドの掘進地盤は、土圧式・泥水式いずれの工法も切羽の安定や地表面への影響という面ではほぼ同等と判断し、工法の選択は発進立坑とシールド基地間の残土の輸送方法や、土留め壁などの地盤改良の切削への対応、一部の地下水から遊離の可能性がある可燃性ガスへの対応についての比較検討から、泥水式 (流体輸送) を採用することとした。表-1に工法比較表を示す。

また、全区間にわたり営業線直下の施工であることに加え、京王井の頭線との近接交差があること等を踏まえて、シールドトンネル周辺の地盤挙動を最小化することが最大のポイントと考え、シールドスキンプレート外周の突起となる裏込め注入設備をセグメント内から施工することとし、シールド発進・到達時のエントランスパッキンの止水性向上と地山切削時の余掘りを排除した。

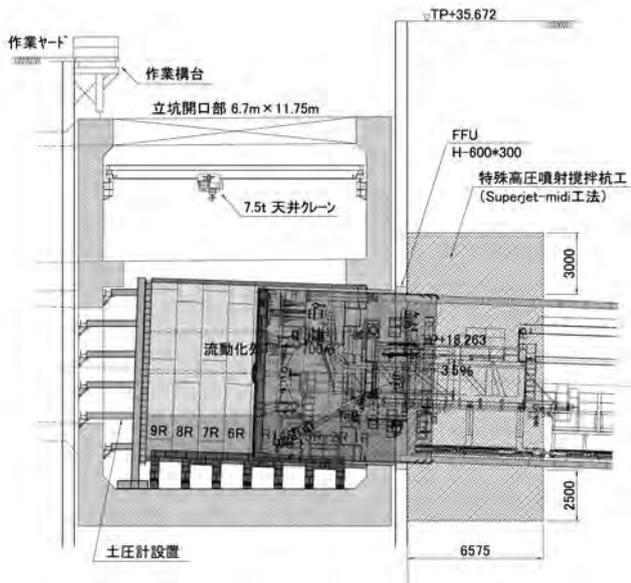
(2) シールドの到達・回転・発進

到達立坑 (回転立坑) 部は、土留め壁の芯材にFFUを用いたSEW工法と高圧噴射攪拌工法によるセメント系地盤改良体を造成しシールド直接到達・直接発進工を行った。また、本立坑では、往路掘進を完了したシールドマシンの引抜き工が必要であった。

マシンの引抜きにあたっては、マシンスキンプレートと地山との摩擦により止水効果が失われ地下水や土砂の流入を防止することが最も重要な課題となった。このため、営業線直下であることや高水圧を有する地盤であることを考慮して慎重な施工を行うための補助工法として、鋼製隔壁の構築による到達方法を採用した (図-2、写真-2参照)。

表-1 シールド工法選定表

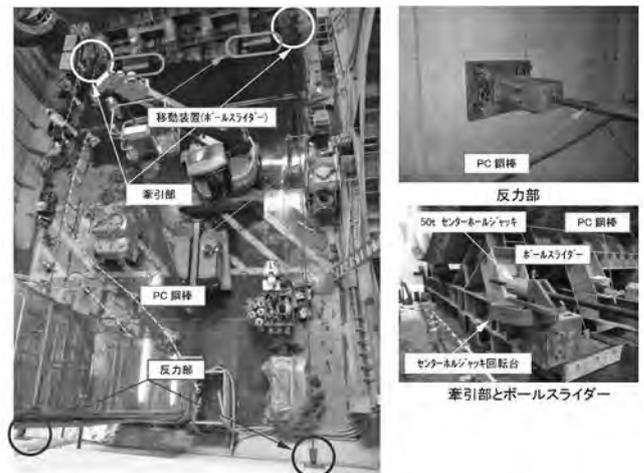
工法分類		泥水式		土圧式			
排土方法		流体輸送		鋼車		圧送	
発進立坑~シールド基地の残土運搬について	水平輸送	スラリーポンプによる流体輸送	○	機関車で牽引するため、運搬サイクルが工程に与える影響が大きい	△	圧送ポンプによる土砂圧送	○
	垂直輸送	スラリーポンプによる流体輸送	○	垂直搬送設備による搬送となるため設備が大掛かりになり、工程・工費に与える影響が大きい	×	圧送ポンプによる土砂圧送	○
地盤改良の切削		固結した改良体をクラッシャーにより破碎して流体輸送	○	固結した改良体がスクリューコンベア内で閉塞する。	×	固結した改良体が圧送管やポンプ内で閉塞する。	×
可燃性ガスへの対応		密閉状態で流体輸送するため危険性は少ない。	○	坑内運搬時に、遊離する危険性がある。	×	局部的に開放はするが、大部分は密閉状態で土砂圧送するため危険性は少ない。	△



図一 鋼製隔壁内への到達状況



写真一 鋼製隔壁組立状況



写真一 マシン横移動設備概要



写真一 シールドマシン回転状況



写真一 礫箱で回収されたFFU部材と形状寸法

鋼製隔壁に到達したシールドマシンを引き抜き、マシンの横移動および回転を行った。シールドマシンの横移動・回転は、ボールスライダーを使用して行った。ボールスライダーは鋼球をキャタピラのようにエンドレスに2列配置したボール式重量物移送装置で、重量物の直線・曲線・旋回移動を行うことができる。また、ボールを使うため、牽引力が小さく、騒音・振動もほとんど発生しない。写真一 3 にマシン横移動時の概要写真を、シールドマシンの回転状況を写真一 4 に示す。

マシンの横移動に要した牽引力は 16t (シールドマシン重量は約 550t) で、要した時間は約 10分/m であった。

これにより回転したシールドマシンは、再度 FFU を用いた土留め壁を直接切削、再発進を行い復路の掘削を行った (写真一 5)。

また、初期掘進に行ったトライアル施工結果に基づき綿密な掘進管理を実施した結果、全線営業線直下と

いう厳しい条件下で、地上の営業線や周辺地盤に一切影響を与えることなく無事に施工を完了した。

3. シールドセグメントの切抜き工

(1) 概要

本工事では図一3および図一4に示すようにB4Fにおいて鋼製セグメントを切抜き、RC躯体と一体化する接続構造を採用した。このようにRC躯体から鋼製セグメントへと部材が変化する接続部は、確実に断面力を伝達する構造とする必要があった。そのため、この接続部については鋼製セグメントの縦リブの一部を残置させた主桁をRC躯体部に埋め込ませることにより断面力伝達を図るシアコネクタ方式と呼ばれる接続構造を採用した。

(2) シールド接続部構造

図一5にシアコネクタ方式によるRC躯体-鋼製セグメントの接続部構造概要図を、写真一6にこの接続部におけるシールド切断および切抜き状況を示す。

シアコネクタ(残置縦リブ)の形状は、高さ100mm、幅350~500mm、厚さ13~16mmとし、逐次FEM解析(RC躯体:平面ひずみ要素、鋼製セグメント:梁要素としてモデル化)により得られた断面力を用いて接続部の照査を行った。また、実物大の実験供試体を作成し、設計断面力および設計耐力相当の荷重を作用させた実証実験も実施し、この接続部が所定の耐力・剛性を有していることを確認した。

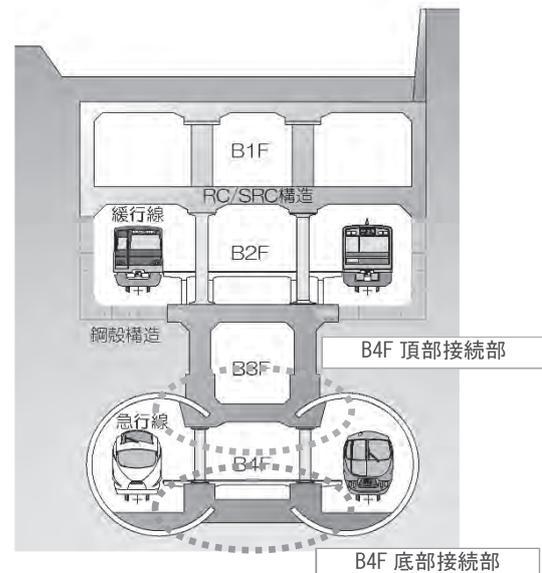
(3) シールド接続部の止水構造

RC躯体と鋼製セグメントの接続部は、止水性の観点から弱部となる部分であり、その止水処理が重大な課題であった。接続部からの地下水の侵入経路としては、以下の2つの経路が想定された。

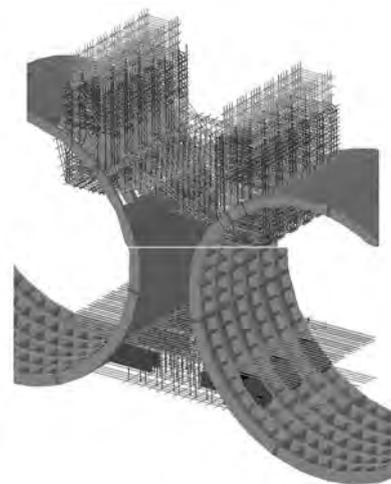
経路①: 地山側セグメントシール材より外側のセグメント間の隙間、スキンプレート空隙部からの地下水侵入

経路②: 内・外セグメントシール材の間で、地山側セグメントシール材からの地下水侵入

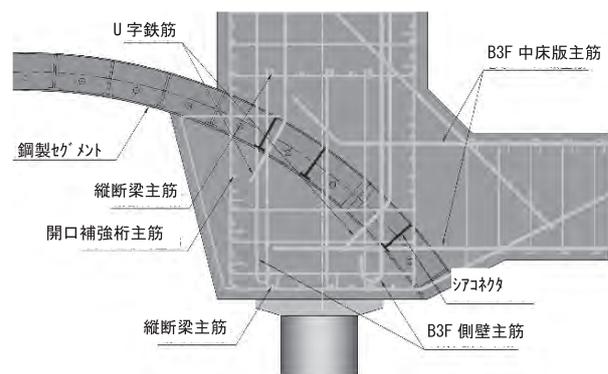
経路①からの地下水侵入に対しては、地山側セグメントシール材外側隙間部に不定形水膨張シール材・エポキシコーキングを実施した。経路②からの地下水侵入に対しては、内・外セグメントシール間に疎水性ウレタン樹脂注入を行うとともに、セグメント主桁周りに不定形水膨張シール材を配置した。図一6に接続部における止水構造概要図を示す。



図一3 シールド接続部位置図



図一4 シールド接続部概要図

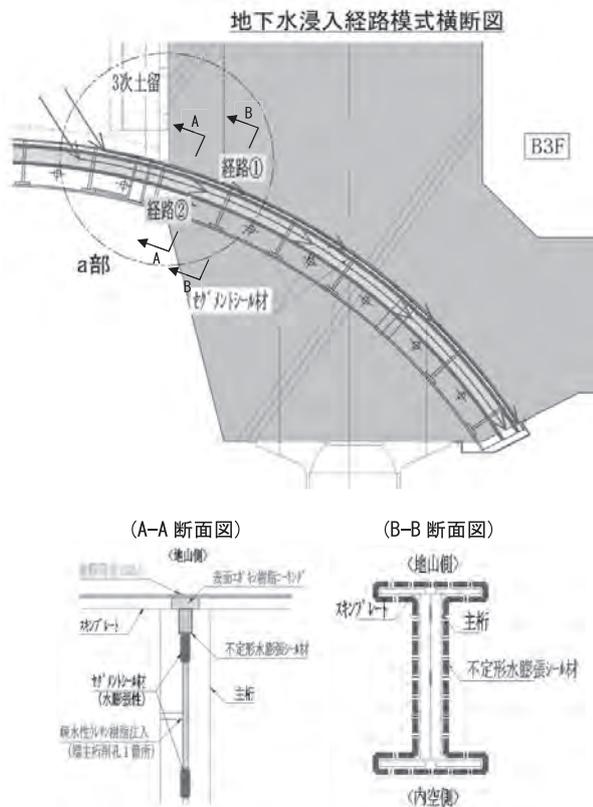


図一5 シアコネクタ方式による接続構造

以上の計画通りの施工を行った結果、切抜き箇所からの地下水の漏出はなく、写真一7に示すように無事にシールドの切抜きおよび接続躯体の構築は完了した。



写真一六 シールド接続部切掘り状況



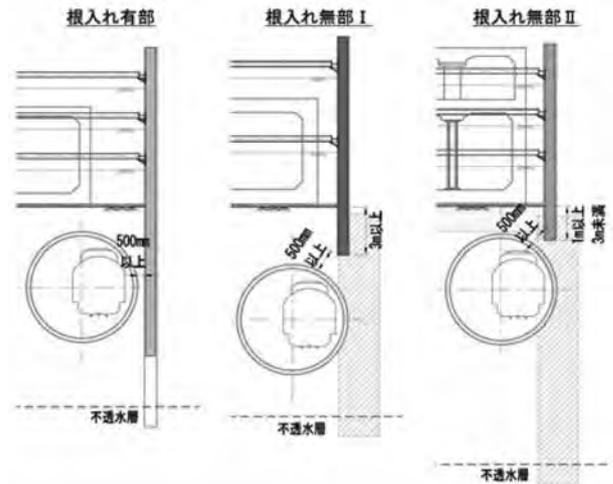
図一六 接続部止水構造概要図

4. 営業線シールドトンネル直上での地中連続壁工

(1) 概要

1期工事による営業線の地下化後、地上から開削工法によりボックスカルバートの構築を行うため地中連続壁の施工を行った。地中連続壁は、シールドトンネルとの離隔により、根入れがシールド下端以深まで確保できる根入れ有部と、シールド上部までしか根入れできない根入れ無部に大別された。掘削面への地下水流入を防ぐため、根入れ有部では地中連続壁を不透水層まで構築し、根入れ無部では先行して構築した薬液注入範囲に地中連続壁を根入れする。

さらに根入れ無部は、根入れ長およびシールドトンネルとの位置関係により、図一七に示すように2パターン（根入れ無部Ⅰ、Ⅱ）に分類した。そのうち、根入れ無部Ⅱについては、根入れが極端に短いことに起因する受働地盤の全塑性化を防ぐため地盤改良を行う計画とした。



図一七 根入れによる地中連続壁の分類



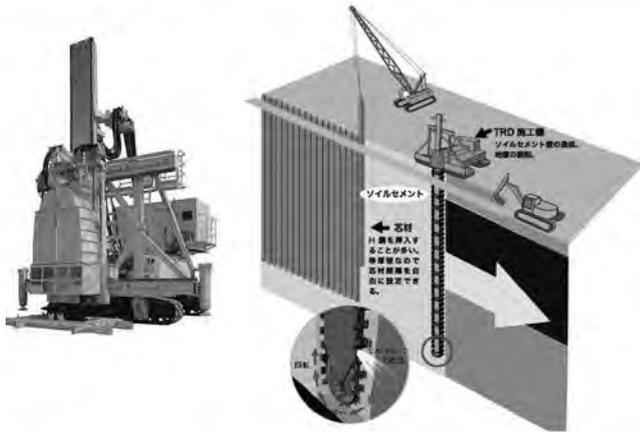
写真一七 切掘り完了写真

(2) 工法の選定

上述の施工条件を鑑み、地中連続壁の施工にあたっては、第1工法：TRD工法、第2工法：BMX工法、第3工法：TMX工法・LHBW工法として機械選定を行った。それぞれの工法の特徴を以下に述べる。

(a) TRD工法

TRD工法は、地中に建て込んだチェーンソー型の cutter post をベースマシンと接続し、横方向に移動させて、溝の掘削と固化液の注入、原位置土との混合攪拌を行い、地中に連続した壁を造成する工法である（図一八）。メリットとして以下が考えられる。



図—8 TRD 工法

- ・機械の高さが 10 m で威圧感が少ない
- ・カッターが地中にあり、転倒の恐れがない
- ・硬質地盤も掘削可能で日当たり施工量が多い
- ・傾斜地でも施工可能 (8/100 以内)

また、デメリットとしては以下が考えられたが、下記のデメリットに該当しない範囲での使用として、TRD 工法を第 1 工法に採用した。

- ・機体の大きさから施工可能な場所が限られる
- ・余掘り約 1 m が必要で根入れなし部での採用は不可
- ・振動、騒音がやや大きく夜間施工は難しい

(b) BMX 工法

BMX 工法は、安定液を用いて掘削壁面の崩壊を防ぎながら、地下に溝孔を掘削し、地中に連続した壁体を構築する工法である (写真—8)。掘削機内蔵のポンプにて掘削土を流体輸送するため掘り残しがない。排出された土砂は処理機で分離して安定液は再利用循環させる。完全に安定液に置換された掘削溝内に芯材を建込み、泥土モルタルを水中打設する。また、メリットとしては以下が挙げられる。

- ・掘り残しがないため掘削床まで芯材を入れられる



写真—8 BMX 機械

- ・傾斜計を内蔵しアジャスターで補正可能のため高精度
- ・地山を流動化処理土に置換するので品質が良い
- ・騒音、振動は比較的小さいので騒音対策を実施することで夜間施工も可能

デメリットとしては、以下が挙げられ、今回第 2 工法として採用した。

- ・機体の大きさから施工可能な場所が限られる
- ・安定液、泥水処理等のプラントスペースが必要
- ・1 日当たりの施工量が TRD より少ない

(c) TMX・LHBW 工法

BMX 工法と同様、安定液を用いて掘削壁面の崩壊を防ぎながら、地下に壁状の溝孔を掘削し、地中に連続した壁体を構築する工法である。ベースマシンが小さく (0.45 m³ バックホウクラス)、跨ぎ施工、斜め施工が可能で機械配置上の制約がない。機体の高さも小さく (4 m 以下)、空頭制限下での施工が可能である (写真—9)。日当たりの施工量は少なくなるが、BMX 工法で施工できない、道路等に囲まれた狭隘な場所や高架下等の空頭制限下での施工に第 3 工法として採用した。



TMX

LHBW

写真—9 TMX 機械と LHBW 機械

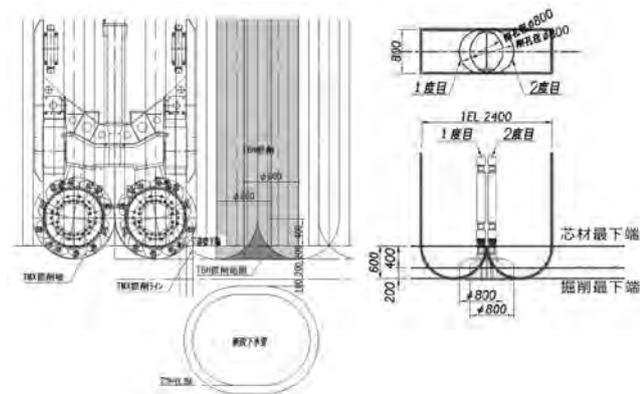
(3) 根入れなし部における芯材高止まり防止

BMX や TMX の場合、掘削機の形状から、図—9 に示すように、掘削最下端部に谷間が発生する。そのため、地中に近接構造物や障害物がある場合、掘削最下端の 600 mm 上までしか芯材が挿入できないこととなる。今回は、営業線シールドトンネルが近接物としてあったが、根入れが浅いこともあり、芯材を掘削最下端より 200 mm 上まで挿入する必要があった。

そこで、図—10 に示すように、BMX や TMX による掘削後、TBH 掘削機で谷間部の底さらい掘削を行い、掘削形状を先端平滑として、芯材を営業線シールドトンネルぎりぎりまで (掘削最下端の 200 mm 上まで) 挿入する計画とした。BMX による掘削完了後に BMX 機と TBH 掘削機を入れ替えて再掘削を行うため、通常のサイクルよりも時間はかかるが、芯材が

高止まりを起こすことのないよう、この計画を採用した。

前述のように、さまざまな地中連続壁の根入れ状況により、掘削機の選定および綿密な施工計画を行うことで、計画通りの深度まで地中連続壁の構築を確実に行うことができた。その結果、開削工法による躯体構築時、出来形不良により漏水を発生させるような地中連続壁はなく、品質のよい地中連続壁を構築することができた。



図—9 BMXによる掘削下端形状

5. おわりに

本事業は、2013年3月に営業線を地下化し連続立体交差化が完成、2018年3月に鉄道の複々線化が完成し、着工から約15年の歳月を経て無事に事業を完了した。

JCMA

【筆者紹介】



村上 達也 (むらかみ たつや)
大成建設
東京支店
小田急下北沢作業所 作業所長



尾関 孝人 (おぜき たかと)
大成建設
土木本部土木設計部
都市土木設計室 課長



熊谷 翼 (くまがい つばさ)
大成建設
土木本部土木設計部
都市土木設計室 課長代理

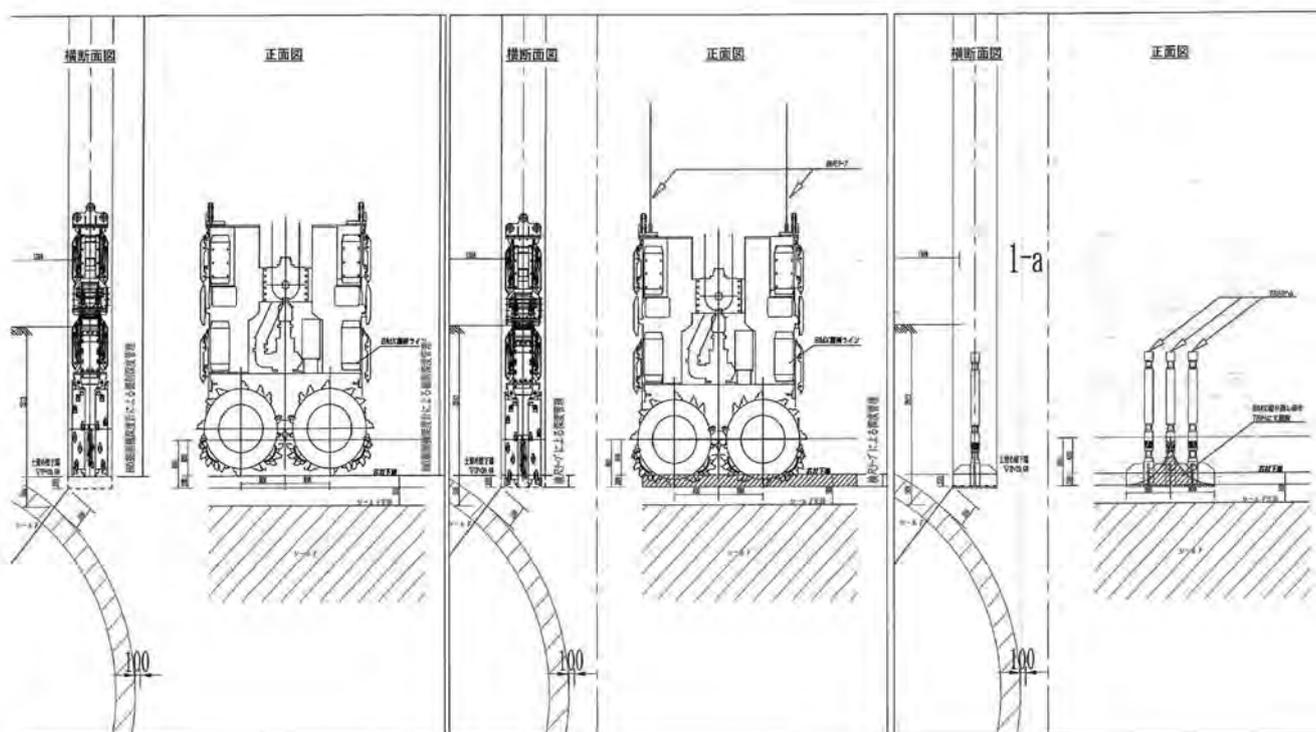
① 通常掘削 (所定深度+200mmまで)

BMXの深度計を使用

② 検尺テープを取り付けて所定の深度まで掘削

③ 底さらい工

TBH掘削機のロッド本数と長さにて管理する。



図—10 TBHによる底さらい