

大断面シールド工法による 都市内道路トンネルの設計・施工

半野 久光¹・野尻 俊雄²・米村 光文³・西岡 巖⁴・谷口 敦⁵

¹正会員 首都高速道路公団 建設第一部設計第一課長（〒160-0023 東京都新宿区西新宿6-6-2）

²正会員 首都高速道路公団 建設第一部新宿工事事務所課長（〒169-0073 東京都新宿区百人町1-23-6）

³正会員 大成建設株式会社 経営企画部部長（〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1）

⁴正会員 大成建設株式会社 秋田シールド作業所所長（〒010-0002 秋田県秋田市手形字西谷地24-7）

⁵正会員 大成建設株式会社 代々木シールド作業所課長（〒151-0061 東京都渋谷区初台1-10-8）

首都高速道路公団が、現在建設を進めている高速中央環状線新宿線は、東京都目黒区青葉台を起点とし板橋区熊野町に至る延長約 11 km の自動車専用道路であり、山手通り（環状 6 号線）の地下をシールド工法を主体に建設している。このうち西新宿シールドトンネルは、甲州街道（国道 20 号）と山手通りが交差する新宿区初台交差点下を双設シールドで通過する。都心部では初めての大断面シールド工法による道路トンネルであり、完成すると往復 4 車線の高速道路となる。

本論文は、西新宿シールド工事において実施したシールドマシンの回転施工、砂礫層掘進における泥水管理方法、近接構造物の計測結果等について述べる。

キーワード：道路トンネル、大断面泥水式シールド、シールドマシン回転、砂礫層、双設、近接施工

1. はじめに

現在、首都高速道路は供用延長 280km、一日の平均利用台数 116 万台、推定利用者数約 200 万人に達し、首都圏における不可欠な社会資本としてその役割に大きな期待が寄せられている。このため、さらなるネットワークの完成を目指し中央環状線の整備を重点的に行っている。中央環状線は、図-1 に示すように延長約 46km、既に約 26km が営業中である。中央環状新宿線は、東京都目黒区青葉台から板橋区熊野町に至る延長約 11km の路線で、平成 18 年度の

完成を目指し、鋭意建設を進めている。この路線の構造は、シールド工法が 7 割、開削工法が 2 割、その他 1 割で、シールド工法主体となっている。

このうち西新宿シールドは、甲州街道（国道 20 号）と山手通りが交差する新宿区初台交差点下に位置する双設のシールドトンネルであり、都心部では初めて大断面シールド工法を採用した道路トンネルである。

施工は、外径 $\phi 13.23\text{m}$ のシールドマシンを甲州街道北側に位置する発進・到達立坑から発進させ、山手通りの地下を約 600m 掘進（先行トンネル）した後、回転立坑に到達させる。ここでシールドマシンを引き出し 180 度方向転換させた後、再発進し、約 600m 掘進（後行トンネル）して発進・到達立坑に再到達させる。これにより 1 台のシールドマシンで総延長約 1200m のトンネルを構築する。（図-2）

本シールドマシンは、都心で施工された最大級の泥水加圧式シールド機であり、中折れ機構及びセグメント自動組立ロボットを装備している。

本シールド工事の特徴として、全線に渡っての礫層（上半断面）の介在、基礎杭・地下鉄等の重要地下構造物との近接施工（最小離隔 8.2m）、大断面の双設シールド（最小離隔 3.3m）、重量約 3000 t のシールドマシンの 180 度回転施工などが挙げられるが、事前に入念な施工検討、計画を重ねた結果、周辺に影響を与える事なく効率的な施工を実現し、無事完成した。

本論文は、これら諸条件に対して実施した工夫、対策について述べるものである。



図-1 首都高速道路ネットワーク図

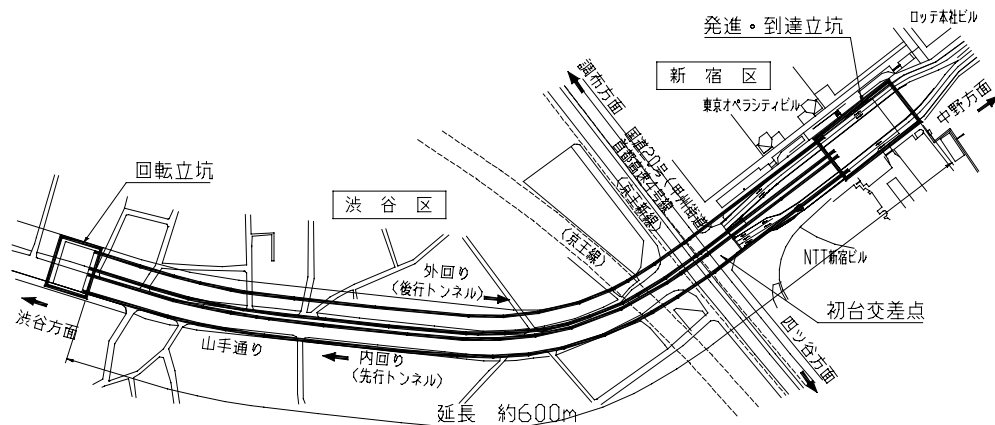


図-2 路線平面図

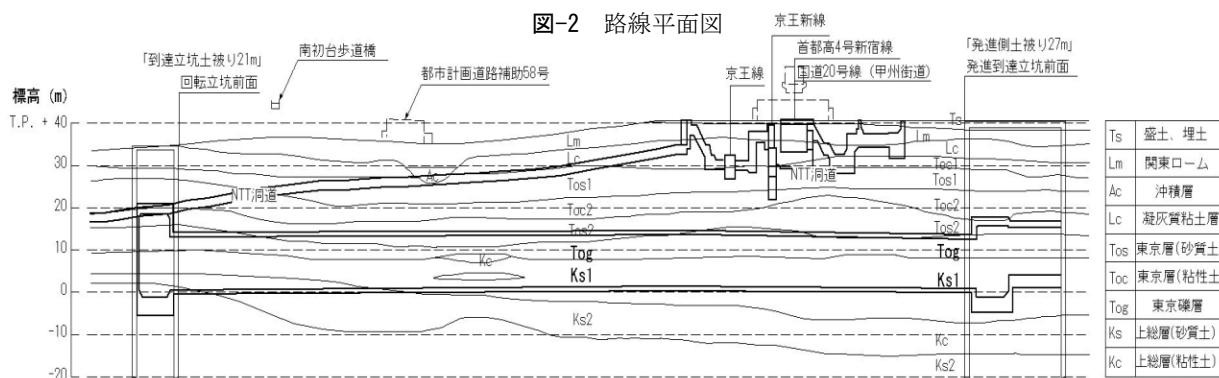


図-3 地質縦断面

2. 工事概要

(1) 地形・地質

当該地域は、下住吉面淀橋台の標高 40m 程度に位置し、地表面から関東ローム層、東京層、東京礫層、上総層群となっている（図-3）。シールド通過断面は、概ね上半が東京礫層（Tog N 値>50）、下半が上総層砂層（Ks N 値>50）で構成されている。東京礫層では最大径 350mm の礫が確認されており、高い透水性を有している。

(2) トンネル諸元

設計時におけるトンネル諸元について次に示す。

- ・規格 第2種第2級（設計速度60km/h）
- ・車線数 1方向・2車線 往復4車線
- ・施工延長 599m×2本
- ・双設分離 最小3.3m
- ・縦断線形 最大縦断勾配 0.3%
- ・平面線形 最小曲線半径 R=204m
- ・土被り 21m～27m
- ・道路付属施設 図-4参照
- ・トンネル断面 セグメント外径φ13.00m
仕上がり内径φ11.90m

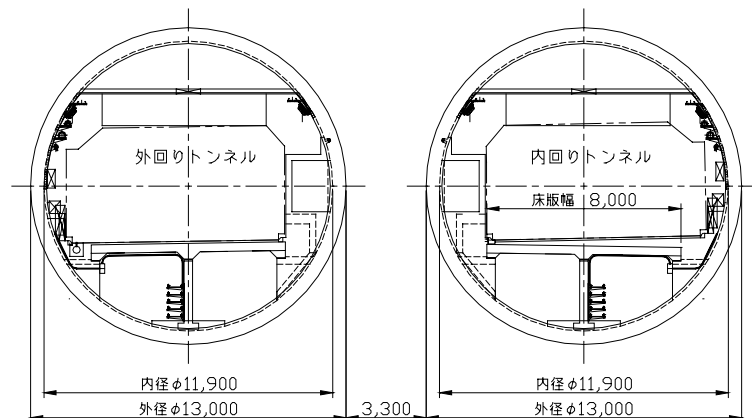


図-4 西新宿シールドトンネル完成断面

(3) プラントの計画

本工事の作業ヤードは、高層ビルに挟まれた環状6号上に位置し、シールド掘進に必要な流体輸送、泥水処理、裏込注入、作泥等のプラント設備を置くスペースが地上に確保できなかった。

その結果、図-8 に示すように、地上部はセグメ

ント等の資材搬入及び残土搬出として使用し、設備の殆どについては、発進・到達立坑内に設置した。また、音源となる土砂分離機を防音パネルで囲い、防振クッションやインバーター制御により、騒音・振動の発生を極力低減した。

坑内設備配置概要を図-8 に示す。

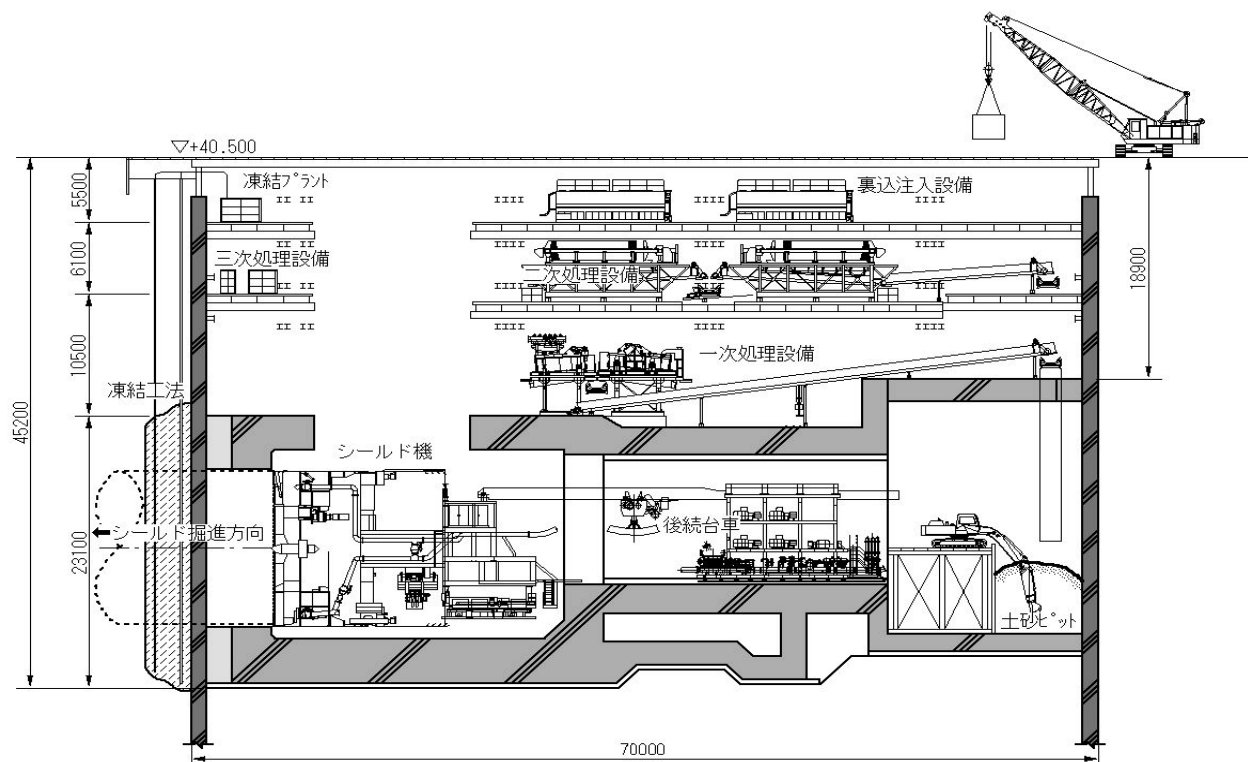


図-8 坑内設備配置概要図

4. 施工概要

(1) 立坑内での回転施工

a) 施工概要

立坑内におけるシールドマシンの回転施工は、図-9 到達・回転工の施工フローおよび図-10 回転イメージ図に示す手順で実施した。

重量約 3000t のシールドマシンの回転・移動方法として、ボールベアリングを用いた特殊工法を採用した。

b) 到達工

本工事は、シールドマシン到達・発進時の防護工として凍結工法を用いた。凍結工法の採用理由は、防護を必要とする断面の間隙水圧が非常に高く、かつ透水係数の高い砂礫層を有することから優れた止水性と強度を併せ持つ工法が必要とされたためである。一方で、地盤変位の影響が想定されるが、原地盤は凍結による膨張が生じにくい礫層および砂質土であり、解析の結果から周辺地盤への影響は極小であると判断した。

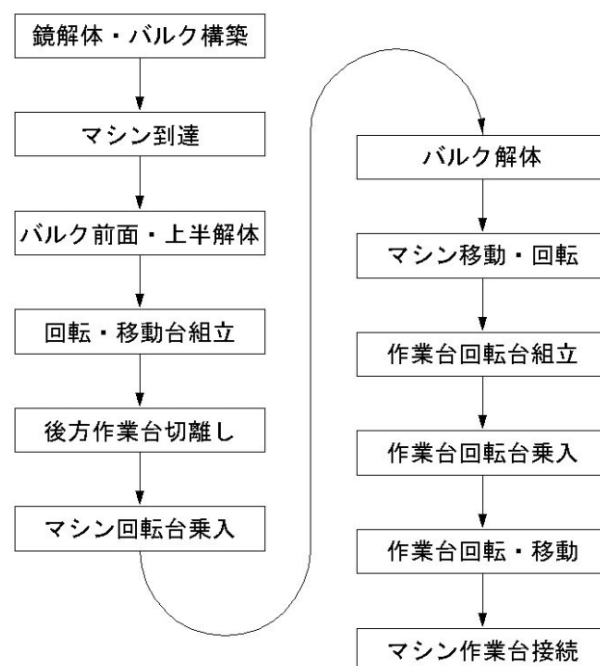


図-9 シールドマシン到達・回転工施工フロー

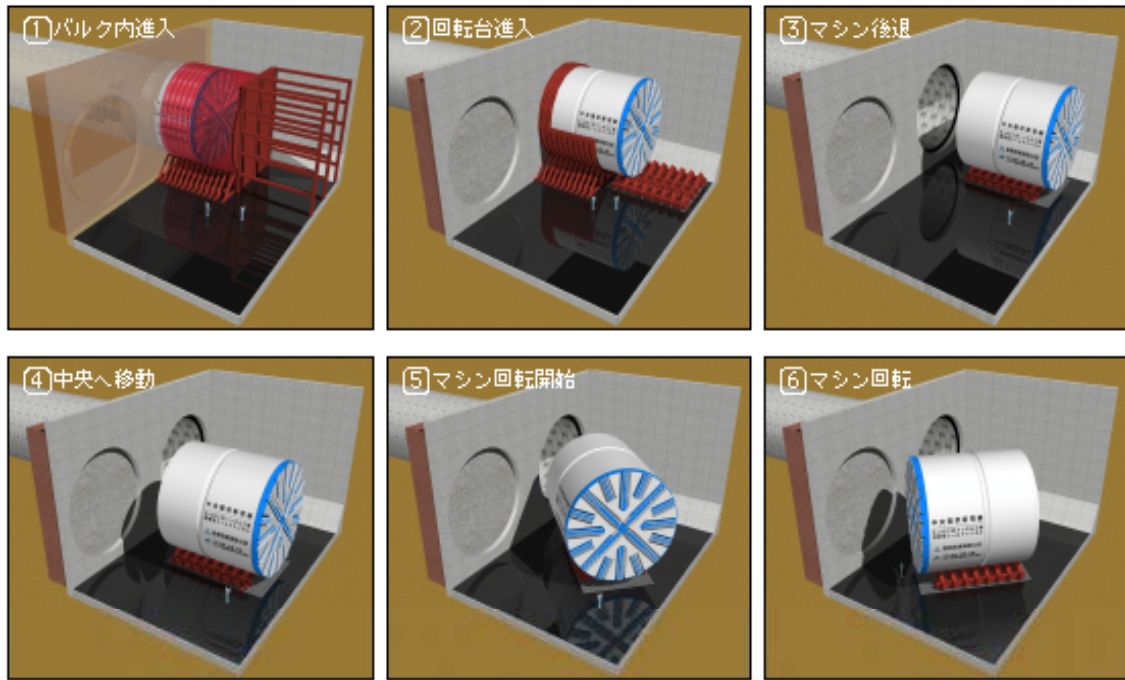


図-10 シールドマシン回転イメージ図

凍結工法は、地盤または構造物中に所定の間隔で凍結管を埋設し、これに冷却液（ブライン：塩化カルシウム溶液）を循環させ、管の周囲を冷却して凍結管を中心に土中の間隙水を氷結させることで凍土を形成し、土留めおよび止水効果を期待する工法である。

到達工は、マシン到達部の地山を凍結工法により防護した後、鏡部の土留め壁（地中連続壁：厚さ1.2m、直径13.5m）を解体、撤去し、一部に貼り付け凍結管を設置した後、立坑内部にマシン到達用のバルクを構築した。このバルクは、円筒形状でシールドマシン外径に対して150mmのクリアランスを有しており、前面を鋼材で支保している。バルク内は、流動化処理土を充填、硬化させ、シールドマシンはこの内部まで掘進させた。



写真-1 到達状況（バルク解体完了）

マシンが立坑の内部まで完全に到達した時点で、マシンのテール部から抜け出したセグメント3リングに予め埋め込んでおいた凍結管を用いてマシン後部の止水凍結を行った。止水凍結期間に約2週間を要したが、この間に後方作業台の切り離し、バルク前方に回転・移動台の設置作業などを行った。止水が完了したことを確認した後、バルクを前面、上半の順で順次解体した。回転台へのシールドマシンの移動は、自装備のシールドジャッキを使用して行った。

c) 回転工法の選択

シールドマシンの回転作業は、マシン外径7m程度（重量350t以下）においては多数の実績があるが、今回のような大断面で重量約3000t規模のマシンでは前例がない。そのため、縦横移動、回転について様々な方法に対する検討を行った。表-1に示す検討の結果、コストが比較的安く、回転面の不陸（数mm）やマシンに付着した泥等による汚れに対しても対応できる工法として、本工事では特殊なボールベアリングを用いた回転工法を採用することとした。

この工法は、摩擦係数が約0.05と小さく、平面上ではジャッキ等によりどの方向へも移動が可能のため、水平移動・回転作業の切替えもジャッキの盛替えだけで済み、さらに鋼球のピッチ調整を行うことで重量に対する制約が少ないというメリットがある。

表-1 マシン回転方法比較検討表

工 法	長 所・短 所	実 績	評 価
作業床へのグリス塗布 摩擦係数約 0.3～0.5	・コストが安い ・労力が必要 ・調整・回転が困難		摩擦係数が高く、現実合わない
受台へのテフロン取付 摩擦係数約 0.06	・構造が簡単 ・テフロンに変形の恐れ ・調整・回転が困難	φ 6.45m、340t	テフロンの取付方法、耐久性が信頼性に欠ける
ボールベアリング挿入 摩擦係数約 0.05	・回転が容易 ・反力が小さい ・強固な床が必要	75t を 140m 移動	他に比べ全ての面で優れている
チルトタンク、コロ挿入 摩擦係数約 0.1	・反力が小さい ・回転が困難 ・強固な床が必要	φ 6.61m、160t の計画有	方向転換が困難 安全性に問題有り
レール挿入によるスライド 摩擦係数約 0.2～0.3	・横移動が容易 ・大掛かりな設備 ・回転にスペースが必要	φ 7.45m、350t	回転立坑のスペースでは狭くて困難
ターンテーブルの使用	・移動・回転が容易 ・コストが高い ・大掛かりな装置	積載 250t、400t は実績有	今回の重量に見合う装置が入手不可能
エアーキャスターの使用 摩擦係数約 0.01	・移動・回転が同時 ・コストが高い ・床の精度が必要	φ 4.68m、120t φ 5.85m、200t φ 5.44m、180t	今回の重量に見合う装置が入手不可能
その他 クレーン吊上げ（分解・再組立）	・能力不足 ・工期・品質に問題		

d) 回転の手順

回転架台の基本構造は、図-11 に示す通り、作業床と通常のマシン受台との間に鋼球を挟んだものである。回転床面は鋼球の食い込み防止と平滑性の確保のため、下床版（厚さ 3.5m の R C スラブ）上に約 30mm のセルフレベリングモルタルを打設し、さらに 25mm の敷鉄板を段差無く敷き詰め、敷鉄板の継手部は現場溶接後にグラインダー仕上げを行った。

その敷鉄板上に鋼球を敷き並べ、その上に下部全面に鉄板を取付けたマシン回転台を設置し高さ調整をした後、シールドマシンを回転台上に移動させ、台ごと移動・回転させた。鋼球は直径φ90mmで、写真-2に示すフレームを用いて整列させている。このフレーム56基（28球/基、合計1,586球）を連結することによりマシン回転台全体をカバーする。ただし、回転台の移動距離に対して、鋼球の移動距離は1/2となるため、移動進行方向には予め余分に鋼球を配置し、後方から出てくる鋼球とフレームを移動方向前方に順次盛替えながら施工した。

移動・回転には、400t 油圧ジャッキ 2 台を使用した。実際に必要とした推力は約 80~85t/台であった。また、実施工程は 180° 回転に 4 方、前後の縦横移動に 2 方を要した。作業内容は、①縦横移動（ストローク量=5100mm 及び 3500mm），②180° 回転，③縦横移動（ストローク量=8827mm）である。

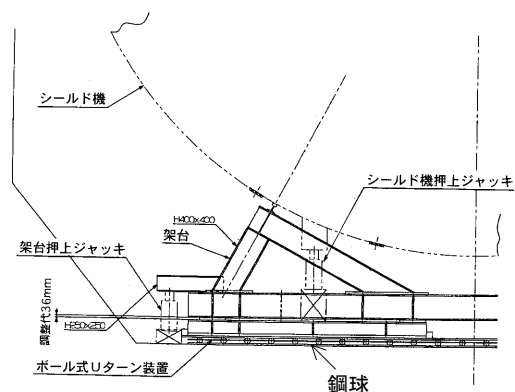


図-11 回転架台詳細図



写真-2 ボールベアリング

(2) 掘進中の泥水管理

当該地は、図-3 の地質縦断面図に示すようにトンネル上半に東京礫層 (Tog : N 値 > 50) , 下半に上総層の砂層 (Ks : N 値 > 50) と比較的堅固な地層ではあるが、東京礫層は最大礫径 35cm、透水係数 $2.3 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ (写真-3) と非常に高く逸泥しやすい地層のため、掘進に際し切羽安定を図るためには、切羽泥水圧の管理とともに泥水の性状管理が重要である。

当工区は、とくに主要幹線道路 (山手通り、甲州街道、首都高速 4 号線) や京王線、京王新線など多くの重要構造物が近接しており、周辺地盤への影響を最小限に抑えなければならない。このため、本シールドマシンに作用する外水圧はマシン中心位置で概ね 190kPa であるが、切羽泥水圧は地下水压 + 主働土圧 + 30kPa 以上を保持している。

さらに、当工区施工範囲には掘削断面の上半に全線にわたって逸泥しやすい東京礫層が存在するため、礫対策、切羽水圧管理とともに逸泥防止対策に着目した泥水管理に注力して掘進を行った。

a) 当工区における泥水管理

シールド掘進時の泥水管理は以下の項目により行った。

①粘性 ②比重 ③濾過水量 ④砂分

とくに、逸泥対策として粘性の管理を重要視し、従来のファンネル粘性に加え、イールドバリュー値による泥水管理を採用した。その理由としては、ファンネル粘性は総合的な見かけの粘性であるため、砂等の固形分により生じる摩擦力による粘性が含まれ、ファンネル粘性が適切であるからといって必ずしも良い泥膜が形成されるとは限らないからである。

これに対して、イールドバリューは泥膜形成に関わる微粒子による粘性・粘着力を示すため、この値を管理項目として向上・維持することでより直接的に安定した切羽を維持することができると考えられる。当工区における泥水の管理は、立坑掘削時に採取した土を用いて事前に泥水透過試験を行って初期管理基準値 (イールドバリュー、ファンネル粘性、比重、濾過水量、砂分率) を定めておき、掘進中は泥水浸透量等を監視しながら、毎リング泥水調整を行った。



写真-3 東京礫層の礫径調査状況

b) 泥水調整

泥水の調整は各リング掘進終了後に行い、地盤ごとに変化する泥水の性状を確認し、常に設定した基準値を満たすよう泥水調整を行った。各管理項目ごとの調整方法は、粘性・比重・濾過水量については作泥した泥水により置換、希釈を行い、良質な泥水性状が維持できるよう管理した。

発進立坑付近では、地山内に微粒子が少なかったため、粘土やベントナイト分を補充し、さらに増粘材を加えて比重や粘性を向上させたが、逆に回転立坑付近ではシルト分が過剰になり、濃度が高くなった泥水を抜き取りシルト分を除去しながら、同時にベントナイト溶液を補充して希釈することとなった。実績として1リング当たり平均40~60m³、最大120m³の希釈・置換を行いながら掘進した。

(3) 掘進管理

a) 進捗実績

掘進は月曜から土曜まで昼夜2交代制を基本とし、先行した内回り側の掘進時には、沿道との諸条件で工事が遅れていた回転立坑の構築および到達準備のため、掘進スピードを6リング/日とした。逆に回転後の外回り側の掘進時には、地下鉄京王線、京王新線および国道横断時期の制約により掘進スピードを7リング/日とした。それぞれ初期掘進後の段取り替えに約1箇月 (昼夜) を要したため、平均すると内回り側は5リング/日、外回り側は6リング/日程度であった。

なお、7リング/日の際には、搬出土量が約1,155 m³でダンプカー台数約240台/日となり、セグメントやその他資材の搬入車両を含めると、約300台の車両が発進・到達立坑の路上作業帯に出入することになる。山手通りは定常的に朝夕交通渋滞が発生するため、残土搬出の効率および受け入れ側の条件から7リング/日を最大とした。このため、最大月進量は175リングであった。

b) マシン制御実績

掘削速度は、礫に対するクラッシャーの破碎能力、泥水処理能力および作泥能力から17~22mm/min程度とした。したがって、1リング (1.2m) 当りの掘削時間は約60分である。掘削時の総推力は、装備推力 400tf × 42本 = 16,800tf に対して通常は8,000~9,000tf程度であったが、地山の硬い層では10,000~12,000tf程度となった。

セグメント自動組立てロボットはボルト供給以外はすべて全自動で行うもので、全線にわたり大きな故障も無く、高い精度でセグメント組み立てを行うことが出来た。内空変位の規格値 55mm に対し、発進直後の 100 リングは微調整のため変位が 20mm 前後であったがその後は 20mm 以内という高い精度を維持できた。1 リングの組立て時間はロボットの製作仕様 100 分に対し、平均 65 分程度であった。

c) 裏込注入実績

裏込注入は同時注入方式を採用し、2液型可塑性注入材（クリーンバック）を使用した。

注入は圧力管理とし、掘進時の注入圧400kPaで管理を行った。大断面での注入材の充填が確実にられるように、シールドマシンには同時注入装置を4台装備し、その内2台を交互に使用することとした。また注入管の自動洗浄を行ったこと、毎日作業終了時の清掃を徹底した結果、注入設備のトラブルも無く最後まで順調な裏込注入を施工することができた。注入率はテールボイド体積に対して、135%程度であった。

5. 近接構造物の計測

近接する構造物（京王線、京王新線、首都高速4号線の橋脚、国道20号アンダーパス、NTT洞道、共同溝）に自動計測器を設置して、構造物の鉛直変位および傾斜を常時監視した。初台交差点における近接構造物の状況を図-12に、京王新線、首都高速4号線の変状計測結果を図-13、図-14に示す。

いずれの計測結果もシールドマシン先端が差し掛かった時点から沈下が発生するが、通過後、比較的短期間に収束している。また、計測沈下量はFEM解析値ならびに各構造物の許容変位量と比較して小さな値であり、泥水圧および裏込注入が確実に周辺地盤の緩みを支保しながら掘進できていることが判る。

6. おわりに

西新宿シールドは、平成4年2月発進・到達立坑の工事に着手、マシン製作、回転立坑の構築を経て、平成12年9月にシールドの掘進を開始、平成14年1月に到達した。平成14年10月には床版設置も完了し無事に完成することが出来た。

最後に、本プロジェクトにあたりご指導、ご協力をいただいた関係各位に対し深く感謝の意を表します。



写真-4 西新宿シールドトンネル完成写真

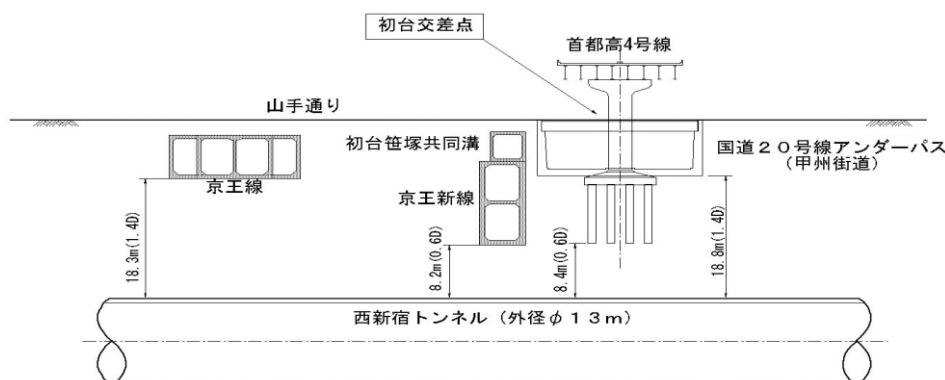


図-12 初台交差点付近の近接構造物

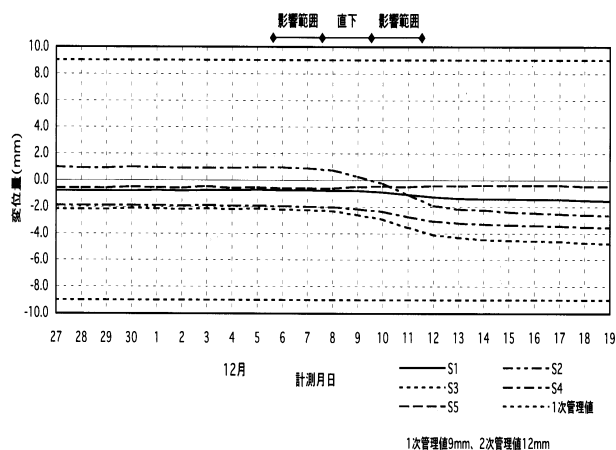


図-13 京王新線の変状計測結果

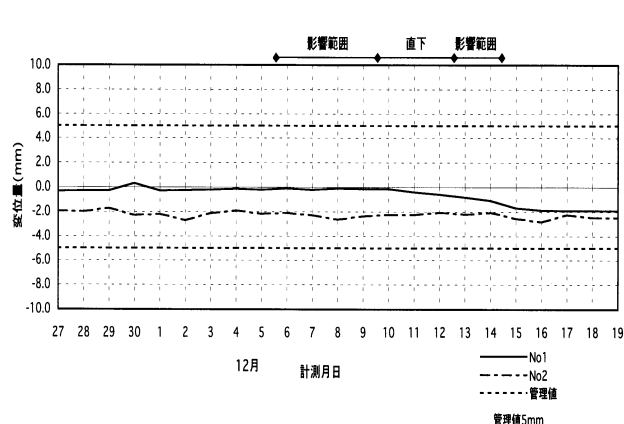


図-14 首都高速4号線橋脚の変状計測結果