

シールド工法による導水管二重化整備事業

DUPLICATION PROJECT OF WATER CONVEYANCE PIPE BY SHIELD MACHINE METHOD

齊藤 恭央¹・田原 功²・酒井 潤也³・忍 亮⁴

Yasuou SAITO¹, Isao TAHARA², Jyunya SAKAI³, Akira OSHI⁴

The Tokyo Waterworks (Bureau of Waterworks, Tokyo Metropolitan Government) has Asaka Higashi-Murayama Line (alias : Gensui Renraku Pipe) which is raw water connecting pipe with dia. 2200mm between Asaka Purification Plant from Tone River Water System and Higashi-Murayama Purification Plant from Tama River Water System, and the role of Gensui Renraku Pipe is to complement a shortage of raw water between two purification plants in case of river water shortage.

The purposes of this project are to reinforce the complementation of raw water shortage in the future and keep the stability of water supply by the duplication of the connecting pipe. The assumed name Daini Asaka Higashi-Murayama Line (alias : Daini Gensui Renraku Pipe) which is new raw water connecting pipe with dia. 2000mm is under construction and tunnel was constructed by tunnel boring machine (TBM) method.

Daini Gensui Renraku Pipe has the total length 16km and was divided into five sections. This project commenced from February 2011 and in the final stage as of September 2018. Four shafts and five bored tunnels were completed, and the remaining is pipe laying works inside the bored tunnel at two of five sections.

In this project, we faced many difficult tasks such as long distance excavation by TBM in boulder stratum, excavation control for the underground TBM docking method and pipe connection works to the existing large diameter pipe by the non-suspension water method. In this thesis, we report the project summary and the solutions of those difficult tasks.

Key Words : tunnel boring machine (TBM) method, boulder stratum, long distance excavation, the underground TBM docking method, excavation control, the non-suspension water method

1. はじめに

(1) 第二朝霞東村山線（仮称）整備について

東京都水道局では、水資源の有効活用を図ることを目的として、利根川・荒川水系の朝霞浄水場と多摩川水系の東村山浄水場との間に、原水を相互融通できる朝霞東村山線（通称原水連絡管）を布設しており、原水の相互融通機能を確保している。この約16kmにわたる原水連絡管の整備は、1963年（昭和38年）に着工し、東京オリンピックが開催された1964年（昭和39年）8月、1年程度という極めて短い期間で完成した。その後、原水連絡管は完成当時の危機的な大渇水への対応にも大きな役割を

果たすなど、東京水道の安定給水にかかせない最重要施設のひとつである。

この原水連絡管は、整備後約50年が経過し、耐震性にも課題があることから、バックアップ機能を確保するため、新たな原水連絡管を整備し、二重化を図ることとした（図-1）。

新たな原水連絡管である第二朝霞東村山線（仮称）（以下、第二原水連絡管）は、既設原水連絡管と同一ルートとし、シールド工法によりトンネルを築造した後、そのトンネルの中に耐震性に優れた水道管（口径2000mm）を布設する。この第二原水連絡管は、平成22年度に着工し、全延長約16kmの工事区間を5つの区間に分け整

キーワード：導水施設の二重化 泥水式シールド 巨礫 地中接合 不断水工法

¹非会員 東京都水道局 Bureau of Tokyo Metropolitan Government (Email: saito-yasuou@waterworks.metro.tokyo.jp)

²非会員 東京都水道局 Bureau of Tokyo Metropolitan Government

³非会員 東京都水道局 Bureau of Tokyo Metropolitan Government

⁴非会員 東京都水道局 Bureau of Tokyo Metropolitan Government

備を進めている。(表-1、図-2)

本稿では、第1工区における巨礫出現への対応や、第2工区と第3工区及び第4工区と第5工区におけるシールドマシンの地中接合、第5工区における不断水連絡の対応について報告する。

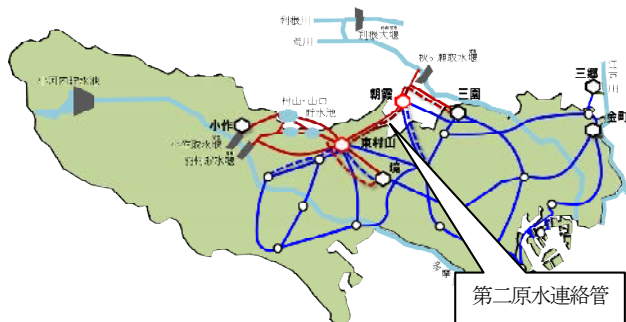


図-1 位置図

(2) 整備概要

第二原水連絡管は、以下の条件に基づき設計を進めた。

- ・整備延長が長距離であることから、地上の生活空間へ

の影響を軽減するため、シールド工法にて整備

- ・施設の安全性を高めるため、せん断弾性波速度300m/s以上の工学的基盤層以深にて整備

- ・1スパン約3～3.5kmにて立坑を設置。ただし、第2-3工区間及び第4-5工区間は用地確保が困難であったため、地中接合を実施

- ・シールドは、長距離施工におけるビットの摩耗、高水圧下での施工性等を踏まえ泥水式シールドを採用

- ・全工区とも礫層を掘進するため、5工区全てのシールドマシンにスクリーコンベアを搭載

	原水連絡管	第二原水連絡管
口径	2200mm	2000mm
延長	約16km	約16km
最大土被り	約3m	約30m
工法	開削工法	シールド工法
完成年度	昭和39年度	整備中

表-1 原水連絡施設の概要

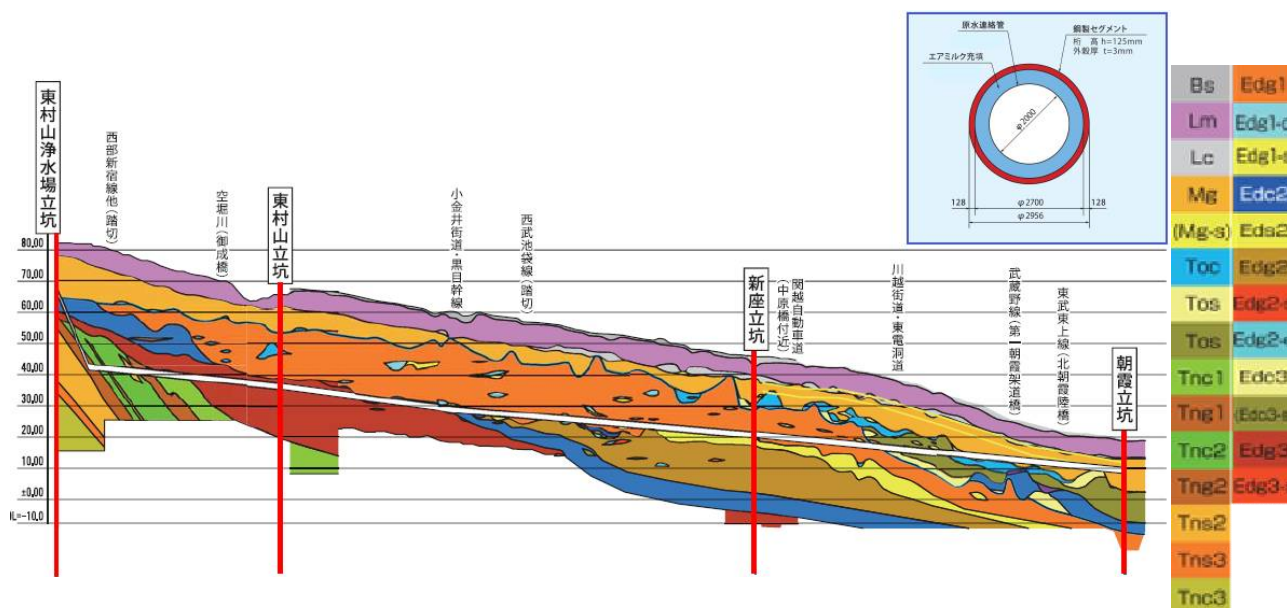


図-2 平面・縦断図

2. 第1工区における巨礫出現への対応

(1) 工事概要

発進立坑 長さ10.3m×幅5.5m×深さ16.6m

(柱列式中連続壁工法)

到達立坑 φ11,000×深さ33.1m

(ニューマチックケーソン工法)

掘進延長 3595.3m

トンネル 内径 2700mm (外径2956mm) 鋼製セグメント

最大勾配 -49‰

最大土被り 34.8m

(2) 本工区の特徴

第1工区の掘削対象土層は、発進立坑から順に武蔵野礫層 (Mg), 江戸川層粘性土 (Edc3), 江戸川層礫質土 (Edg3), 舎人層粘性土および砂質土 (Tnc2・Tnc2-s), 舎人層礫質土 (Tng1), 江戸川層礫質土 (Edg3) と舎人層粘性土 (Tnc1) の互層, 江戸川層礫質土 (Edg3) となっており, 事前の土質調査を踏まえ, 礫径300mmに対応するマシン仕様としていた。しかし発進立坑および到達立坑築造時に掘削対象土層から長径350mmの巨礫が出現したため, 以下のとおり再検討を行った。

(3) 巨礫対応について

a) 長径350mm以下に対応可能なマシン仕様の検討

以下の検討に基づいたシールドマシン仕様を写真-1, 図-3, 図-4に示す。

①チャンバー下部に堆積する礫の取り込みを考慮し, 土砂取り込み口を下方に配置できるように, センターシャフト支持方式に設定

②チャンバー内への積極的な取り込みを図るため, ティースビットの配置の工夫と最適なスリット幅の設定 (礫の破碎に有効なローラーカッターは長距離掘進による摩耗, 損傷等の想定から設置せず)

スリット幅: 450mm, スリット開口率: 47.9%

③ビットの材質は耐久性 (靱性) に優れるE5種を選定



写真-1 第1工区シールドマシン

④段差ビット配置することで延命化を図るとともに油圧式の摩耗検知装置も装備

⑤巨礫を効率的に取り出すため, 排泥装置としてφ370mmのリボン式スクリー (搬出礫径φ250mm×350mm) を装備

⑥通常時のスクリー内閉塞や点検等に備え, 先端ゲートを閉鎖し, チャンバーからの泥土流入を制止できるようなスクリーコンベアを改造

※チャンバーに突出するスクリーを後方へスライドできる仕様

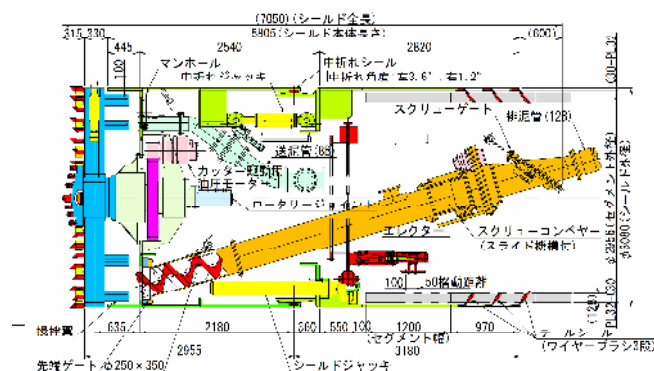


図-3 シールド概要図

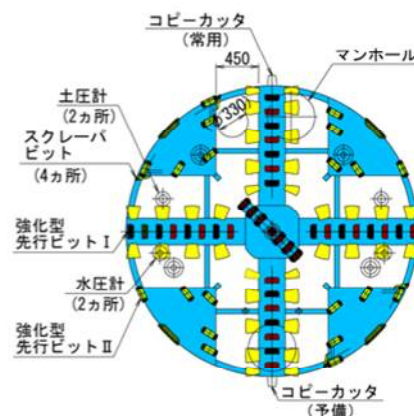


図-4 カッタービット

b) 掘進時における想定外の巨礫出現

発進当初は順調に掘進できたが, 300mほど掘進し, 江戸川層礫質土層 (Edg3) の掘進になると長径350mm超の想定外の多数の巨礫出現により, チャンバー内 (スクリーコンベア取り込み口) にて閉塞し, シールド掘進進捗が大幅に低下した (図-5)。

この巨礫をスクリーへ取り込むためには礫の姿勢を変える必要があり, その対応として泥水の正送・逆送およびスクリーコンベアの正転・逆転の繰り返しによるあおりを行った。この状況下にて, 排泥管詰まりに伴う排泥ポンプの圧力異常値が継続し, 機械的に閉塞解除が困難と判断された際は, スクリュー後方の排泥管を一部撤去し, スクリューを後方へスライドした後, 先端ゲ

ートを閉鎖した上で、スクリーコンベヤの点検口から巨礫を回収した（写真-2）。

しかし、このような閉塞が3回/30mと多発し、その解除に多大な時間を要した結果、月の計画掘進量250mに対して100mと大幅に低下した。このため、更なる改善に取り組むこととなった。

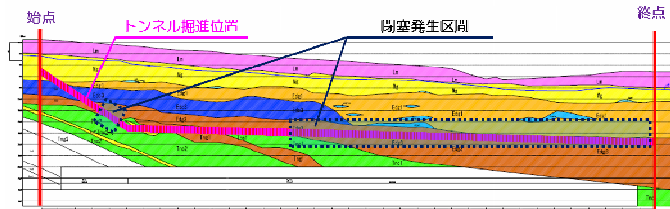


図-5 閉塞発生区間

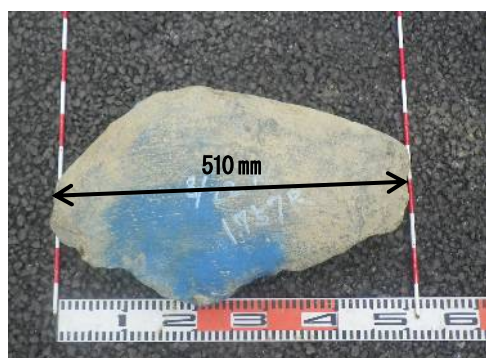


写真-2 回収された巨礫の一部（長径 510mm）

c) 改善取組

上記対応として、シールドマシン改造（図-6）と人為的改善に取り組んだ。

- ①スクリーゲートを撤去し後方配管の口径をφ300mmからφ350mmに拡大し、段差を解消することで巨礫の滞留防止を図った。
- ②リボンスクリューの羽根間隔を拡大（羽根間隔520mm）し、排出性向上を図った。
- ③スクリーコンベヤの点検口を増設し、巨礫取出しの効率化を図った。

④通常掘進時においても、スクリーを先端ゲート後方までのスライド状態とすることで、スクリー内閉塞時の巨礫回収時間短縮を図った。

⑤チャンバー内への塑性流動化材の投入により、泥水の浮力効果で巨礫の排出性向上を図るとともに、掘進停止時における泥水性状の改善も図った。

⑥切羽圧力を管理上限値付近まで増大させ、チャンバー内からの押し出し効果により巨礫排出性向上を図った。

(4) 評価

巨礫閉塞回数は70回以上に及び、過酷な土層環境の中で行われた当工事も、月掘進量が巨礫頻発時には当初想定250mの半分以下の100mと落ち込んだが、上記改善対策により240mに持ち直した結果、最終的に6か月の延伸であったが、20か月の歳月を経て無事到達することができた（図-7）。

到達したシールドマシンは、ティースビット及び最外周強化型先行ビットの一部破損・摩耗が見られたものの、掘進に大きな影響を及ぼすことなくビットが維持できていた。これは、最適なビットの延命化対策を図った結果であると言える。（写真-3）

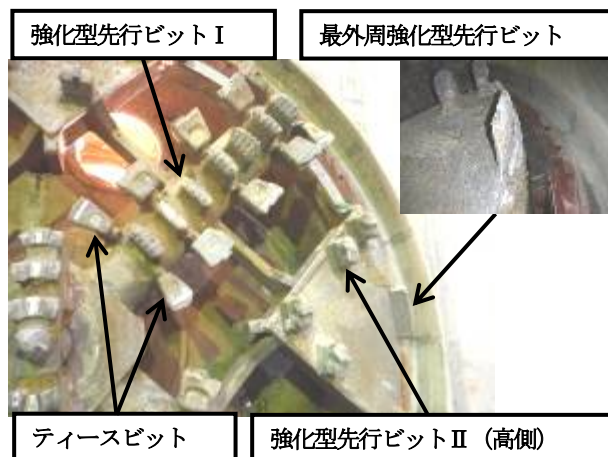


写真-3 ビット最終状況

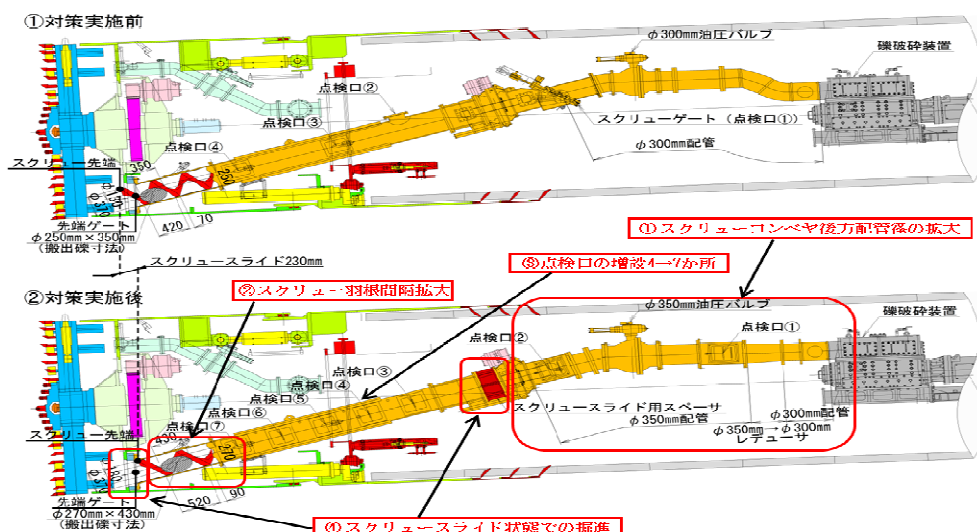


図-6 シールドマシン改造

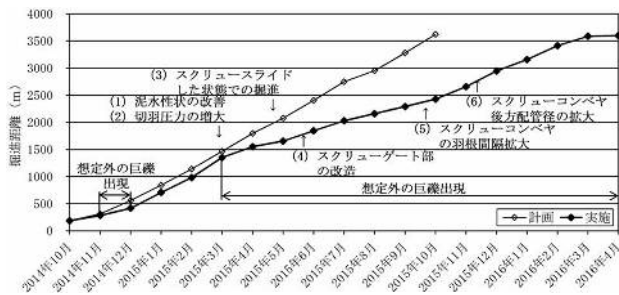


図-7 巨礫の出現状況と掘進距離

3. 第2-3工区間、第4-5工区間におけるシールドマシンの地中接合

(1) 工事概要

a) 第2-3工区間

発進立坑 第2工区 $\phi 11,000 \times$ 深さ33.1m
(ニューマチックケーソン工法)
第3工区 $\phi 14,500 \times$ 深さ26.8m
(ニューマチックケーソン工法)
到達 地中接合法 (CID工法)
掘進延長 第2工区 3460m 第3工区 3119.9m
トンネル 内径2700mm (外径2956mm) 鋼製セグメント
最大勾配 3.2‰
最大土被り 29.92m

b) 第4-5工区間

発進立坑 第4工区 $\phi 14,000 \times$ 深さ26.8m
(ニューマチックケーソン工法)
第5工区
長さ13.8m $\times$ 幅9.0m $\times$ 深さ14.5m
(鋼矢板立坑)
発進立坑 第4工区 $\phi 14,000 \times$ 深さ26.8m
(ニューマチックケーソン工法)
第5工区
長さ13.8m $\times$ 幅9.0m $\times$ 深さ14.5m
(鋼矢板立坑)
到達 地中接合法 (MSD工法)
掘進延長 第4工区 3154.9m 第5工区 2760.5m
トンネル 内径2700mm (外径2956mm) 鋼製セグメント
最大勾配 2.4‰
最大土被り 23.84m

(2) 本工区の特徴

第2-第3工区間及び第4-5工区間は、それぞれ地中接合によりトンネルを築造した。

掘進土層は、第2-3工区間はほぼ全線に渡り江戸川層礫質土 (Edg1) であった。一方第4-5工区間は、4工区側から江戸川層礫質土 (Edg1) から東京礫層 (Tog) を掘進し、接合地点付近は江戸川砂層 (Tos) を掘進し、5工



写真-4 第3工区シールドマシン



写真-5 第5工区シールドマシン (貫入リング押出時)

区側からは、武蔵野礫層 (Mg) や東京粘土層 (Toc)、江戸川粘土層 (Edc) 層などの互層を介し、接合地点まで掘進した。この土層状況により、地中接合については、第2-3工区はCID工法を、第4-5工区はMSD工法を採用した。

(3) 地中接合法の採用経緯について (表-2参照)

a) CID工法の特徴

接合地点において、先行到達 (第2工区) するシールドマシンのカッターヘッドを中心方向に収縮し、外殻内後方にカッターヘッドを引き込みながら、外殻と地山との空間に固化材を充てんする。その後、後行到達 (第3工区) したシールドマシンのカッターヘッドも中心方向に収縮した上で第2工区側の固化材空間を掘進し、突出す双方のスキンプレートを経機的に接合するとともに、最終的にチャンバー外から接合箇所裏込めし、止水性を確保するものである。

第2-3工区は接合地点の地層が礫層であることから、礫が障害となる可能性が少ないCID工法を採用した。

(写真-4)

b) MSD工法の特徴

後行到達 (第5工区) するシールドマシンから先行到達 (第4工区) するシールドマシンへ鋼製リングを貫入・受圧ゴムリングで受けた後、リング周辺を鉄板溶接するとともに、裏込めすることで土砂や地下水の内部侵

項目	CID工法	MSD工法
概要図		
止水性	・止水性能試験では1MPaまで対応	・止水性能試験では1MPaまで対応
施工性	・補助工法を必要とする場合もある ・地山を固化材で置き換えるため、礫が障害となる危険性が少ない ・先行シールド設備は後行シールドの到達を待たずに撤去可能 ・高い施工精度を必要とするため、水平ボーリング等を併用する ・硬質礫層でも支障なし	・補助工法は基本的に不要 ・礫づまり等が生じた場合、接合不能となる場合がある ・先行シールド到達後、接合に必要な設備を残す必要がある ・高い施工精度を必要とするため、水平ボーリング等を併用する ・硬質礫層（最大礫径200mm）での3km以上の掘進実績なし
施工実績	4件（東京都水道局1件）	19件（東京都水道局8件）
工期	数日	数日
経済性	MSD工法と比べて高価	CID工法と比べて安価
採用工区	第2～3工区	第4～5工区

表-2 地中接合工法比較

入を防止するものである。

当工法は、接合地点の地層が礫層の場合、貫入部への礫づまりが懸念されるため、採用を避けることが多い。しかし、第4-5工区については、接合地点の地層が砂層であったことから、CID工法等と比較し経済性に有利とし、採用した。（写真-5）

(4)掘進精度管理について

地中接合においては、受入側と挿入側とのずれ量を許容値内で収めることが条件となる。このため、シールドマシンの位置確認については、日々の坑内測量に加え、より精度を高めるため二重・三重の調査が必要であった。以下に両区間の対策について述べる。

a)第2-3工区間について

当初、先行する第2工区側シールドマシンは、接合位置に到達した時点でチェックボーリングにて正確な位置を把握し、そのデータを基に第3工区側シールドが地中接合地点に向けて掘進する予定であった。しかし、第2工区側ではチェックボーリング用地の協議に時間を要し、計画時期でのチェックボーリングが実施できない状況となった。

そこで、第2工区側を、双方の測定誤差によるずれに対し掘進線形を修正することが可能な地中接合位置の280m手前まで掘進し、一旦停止することとした。

一方第3工区側のチェックボーリングは、地中接合位置から約330m手前の車道を占用し、鉛直ボーリングにて

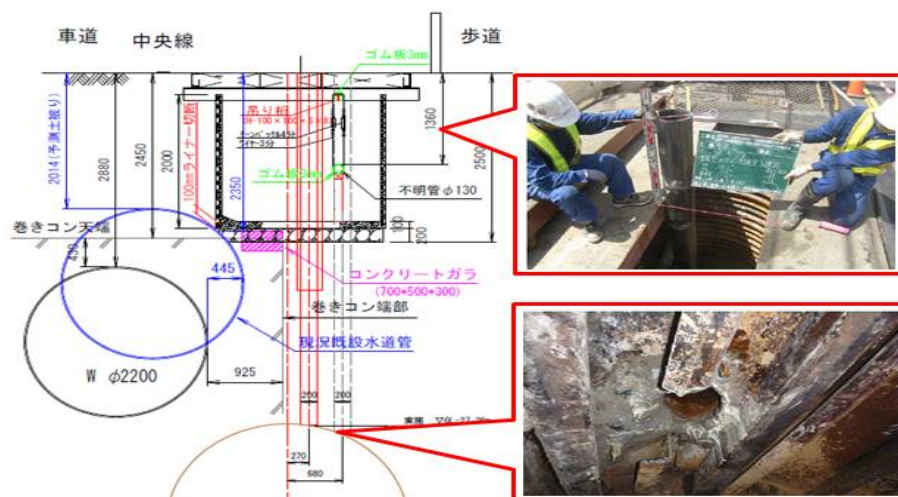


図-8 第3工区チェックボーリング断面図

トンネルを貫通させ、観測孔（上部15.0mφ300、下部12.4mφ200、削孔延長L=27.4m）を設置した（図-8）。この観測孔から、地上での線形測量結果を坑内に落とし込み、ここからの往復トラバース測量によって第3工区側シールドマシンの位置を計測した。

第3工区側シールドマシンの位置が正確に測定されたことで、片側の測定誤差が解消されたため、地中接合地点から140m程度手前の位置まで掘進し、そこで改めて正確な第2工区側シールドマシン位置データを元に掘進線形を調整することとした。このため、第3工区側シールドマシンを当該位置まで掘進し、停止させた。

その後、ようやく第2工区における用地協議が完了したことから、直ちにチェックボーリングを行った。調査箇所は、地中接合位置から約1100m手前の歩道を占用し、鉛直ボーリングにより観測孔（外管φ300、内管φ200、削孔延長30.0m）を設置した。第3工区側と同様にこの観測孔から地上における路線線形の測量結果を坑内に落とし込み、往復トラバース測量によって第2工区側シールドマシンの位置を計測した。ただし、第2工区においては観測孔からシールドマシンの距離が約1100mと長いため、より正確を期するためトラバース測量は3回にわたり実施した。これらの計測により、双方シールドの中心基線を合わせるとともに、接合寸前でシールドマシンの面角度を1°以内に収まるよう姿勢を制御するなど精度管理を行った結果、ずれ量の許容値が±50mmに対し、左右誤差5mm、上下誤差0mmの高い精度で地中接合が完了した。（写真-6）



写真-6 第3工区側から見た第2工区シールドマシンカッター部

b) 第4-5工区間について

当工区間の地中接合におけるシールドマシンの位置確認は、第2-3工区間と同様に地上からチェックボーリングを行うこととした。しかし、他工区と異なり、第二原水連絡管の掘進位置は直上に既設原水連絡管があるため、直上から約6m離れた歩道等から斜めボーリングにて位置の確認を行った。

観測孔は、第4工区側については接合地点の約100m手前の道路拡幅用地を、第5工区側については約300m手前の歩道及び民地を占用した。

このような計測管理とマシン制御管理により、本工法においてもずれ量許容値±50mmに対し、接合誤差は左右方向で18mm、上下方向で19mmの精度で接合が完了した。

4. 第5工区における不断水連絡工

本事業では、既設原水連絡管（鋼管φ2200）と第二原水連絡管（鋼管φ2000）との連絡工事を実施した。連絡工事に当っては、通常既設管を断水した上で実施するが、工期が約6か月と長期に渡り原水連絡管の相互融通機能が停止することは、極めて水運用への影響が大きいとして、断水せずに連絡を行う不断水工法を採用することとなった。

不断水工法は、既設管に上下2分割に割T字管をかぶせ、溶接による止水処理を施した後、穿孔機により既設管を穿孔する。穿孔が完了したら、既設管の切断部を撤去しバタフライ弁を設置することで連絡を完了させるものである。（図-9）

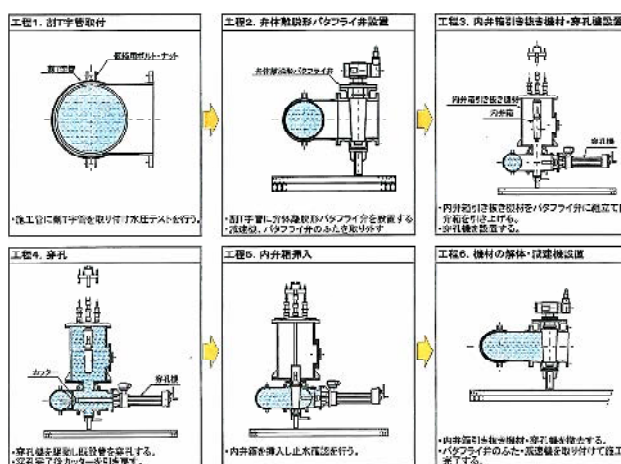


図-9 不断水工法概要

(1) 事前準備

今回の施工条件である1MPaに近い高水圧下での大口径管不断水連絡は過去に施工事例がない。また、既設原水連絡管内は、総延長16km渡り、約6万m³の原水が充水されており、万一施工中に管が破損した場合は、大規模な漏水事故となる。このため、施工に際しては、準備段階から綿密かつ慎重な計画が求められた。

不断水工事においては、特に割T字管の高い製作精度が要求される。このため、事前準備として試験掘調査を行い、既設管の布設状況、溶接位置（溶接位置での穿孔はできないため）、管の変形状況（鋼管は自重により偏心するため）、健全度（目視によりクラック、傷、塗装状況等で判断）等を現認後、割T字管の製作を行った。

製作期間は約3か月であった。

現地作業では、短期間であれば朝霞浄水場から東村山浄水場へのポンプ圧送を停止させることができ、水压を下げる事が可能であることから、この限られた期間内で完了できる作業工程を策定した。

(2) 施工について

施工は、以下の点に留意し作業を進めた。

- ①割T字管の吊り降ろし時に、既設管を損傷させないように、既設管に緩衝材を巻き付け保護した。
- ②自重による既設鋼管の扁平（約30 mm）に対応するため、割T字管と既設鋼管の隙間にサイドリングを溶接し一体性を確保した。
- ③既設管の経年により、穿孔開始時の横方向へのクラックの発生が最も懸念されたため、穿孔作業は通常よりも時間をかけて状況を確認しながら作業を進めた。
- ④漏水といった不測の事態に備え、第二原水連絡管のシールドトンネル内を、緊急時の一時貯留用の排水先として準備した。

綿密な計画と万全な準備により、割T字管等の資機材の搬入から据付けまでに約2週間、穿孔開始から断水連絡完了まで1日と短期間で無事完了した。

5. おわりに

第二原水連絡管の整備は、当局の重要な導水施設の二重化事業であり、特に工程管理は確実な事業執行に不可欠である。トラブル等による工事停止の事象は、他工区や後発工事へも同様の影響を及ぼすことから、その情報や対策は、いち早く工区間で共有するとともに、後発工事の設計へ反映させるなど、局内連携を図った。この取り組みにより、工事初期に発生していたトラブルが現在は激減し、整備完成まであと一步のところまで進んでいる。

ここまで進めるまでには、様々な課題や苦労があったが、当局で十分な知見が得られていない高度な技術も求められるなど、チャレンジ精神を持って臨んだ。

この先も東京水道の安定供給を確保していくため、水道施設整備事業の推進に邁進していく所存である。



写真-7 割T字管取付状況



写真-8 バタフライ弁取付状況



写真-9 既設管穿孔状況