

4-1-1 下水道工事における国内最大規模の凍結工法を用いた

シールドトンネルの拡幅及び地中接合

第一基幹施設再構築事務所 工事第一課 古賀 創

1. 概要

東京都足立区千住地区では、都市化の進展による下水道への雨水流入量の増加に伴う雨水排除能力の不足や近年多発している局地的な大雨により、浸水被害が発生している。また、昭和20年～30年代に建設されたポンプ所等の施設の老朽化が進んでいる。そのため東京都では、新たに幹線とポンプ施設を整備することで、浸水被害の軽減をするとともに、老朽化したポンプ施設を一時停止し再構築することを目的として、隅田川幹線整備事業に取り組んでいる。隅田川幹線工事では、既に建設されている外径5.5mの幹線に、外径6.35mの幹線を接続するために、凍結工法を用いてシールドトンネルを地中で拡幅した。この凍結工事では、日本の下水道工事において最大規模の3,700m³の凍土を造成した。

本稿では、凍土造成や既設セグメントの撤去、凍土の掘削、拡幅セグメントの組立等のプロジェクトの特徴や安全で効率的な施工に向けてCIMを活用した取り組み等について報告する。

2. はじめに（背景）

東京都は23の区部と多摩地区の大きく2つに分けることができる。下水道局が管理する下水道管の延長は、23区だけで東京とシドニーを往復する距離に相当する1万6千kmにも及ぶ。また、23区と多摩地域を合わせて20か所の水再生センターでは、毎日556万m³の下水を処理している(図1)。



図1 東京都の位置図

東京都足立区千住地区では、1991年～2008年にかけて多数の浸水被害が発生している。下水道の普及を進めていた高度経済成長期、下水道の整備は一時間あたり50mmの雨水を50%処理できる水準で進めてきた。高度経済成長期は、東京でも畑や緑地があったので降った雨の半分は地面に浸り込み、その半分を下水道管で処理できると考えられていたからである(図2)。



図2 東京都足立区千住地区の浸水エリア

しかしながら、都市化によりビルなどの建物が建てられ、地面の大部分がコンクリートやアスファルトで覆われるようになり、雨が地面に染み込む範囲が減り、その分下水道管に入ってくる水が増えてきた。それにより、下水道整備を始めた昭和初期に比べて下水道管への雨水の流入量が1.6倍に増大した。下水道管に入ってくる雨水が、計画された量を超えることにより、浸水被害が発生している。このような経緯を踏まえ、東京都では現在、浸水被害を軽減するため、一時間あたり50mmの雨水を80%処理できるように下水道施設の整備を進めている(図3)。

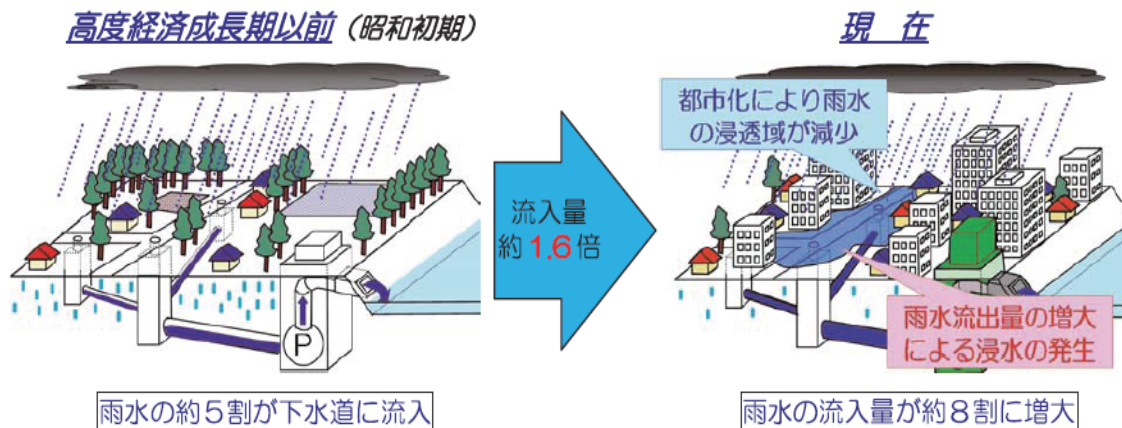


図3 都市化に伴う雨水浸透量変化のイメージ

東京都足立区千住地区は、浸水被害の軽減を目的とする整備重点区域の一つに指定されている。東京都は、足立区千住地区にて、浸水被害の軽減を目的として、千住地区の総面積410.7haの内292.85haの面積に降り注ぐ雨水を收容することができる隅田川幹線と呼ばれる幹線の築造と、その雨水を川に放流させるポンプ施設の建設プロジェクトを進めている。

隅田川幹線はまず外径5.5m、内径4.75m、延長3.11kmのシールドトンネルを築造した。本工事では、新しく建設するポンプ所側から、外径6.35m、内径5.5mのシールドトンネルを接続する工事を行う。外径5.5mのシールドに外径6.35mのシールドを接続するため、接合部の外径の小さい既設トンネルを地中で拡幅する必要があった。シールドトンネルを拡幅する際、補助工法として、凍結工法を用いた。造成した凍土量は3,700^m3であり、国内の下水道工事では最大規模であった(図4)。次項より、凍結工法の採用経緯、施工順序、プロジェクトの特徴等について述べる。



図4 隅田川幹線全体工事図

3. 凍結工法の採用経緯

本工事の周辺環境は次のような条件であった(図5)。

- (1) 隅田川幹線の拡幅部直上には、東京都の主要幹線道路があり交通量が非常に多く、また電車の軌道や施設物があった。
- (2) 地下には他の下水道管に加えて水道、ガス、電力等の他企業の埋設管が多くあった。
- (3) 拡幅部は地下約40mの大深度に位置しており、高い水圧下にあった。また、凍結・解凍する地盤は粘性土主体であった。

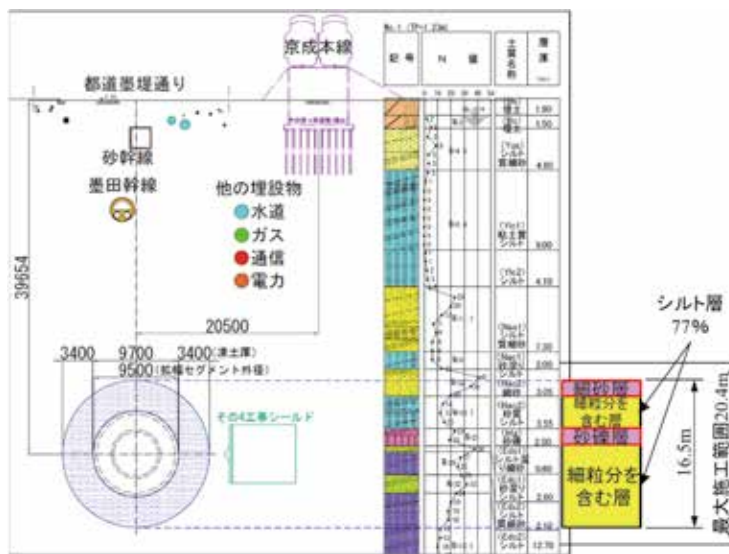


図5 周辺環境及び土質柱状図

下水道管渠の接合は、一般的に施工性と維持管理を考慮して立坑を設置するが、本工事では、路上からの施工は極めて困難であり、立坑を築造することはできなかった。また、大深度の立坑の築造は、近くの電車にも影響を与える可能性があった。

そのため、非開削による地中拡幅が採用された。地山の崩落防止と地下水の坑内流入防止の役割を担う地盤改良工法が不可欠であるが、地上からの施工は、周辺環境や埋設物の状況から困難であることに加え、既設の管渠の下部には、未改良部分が残ることが予想された。そのため、地上からの地盤

改良工法は除外した。地中から施工できる地盤改良の方法について既設の管渠から施工できるインナー注入工法と凍結工法とを選択し、これらを比較検討した。土質調査の結果、対象土質は、シルト質土であり N 値 20 以上の地盤では脈状注入となり、安全性や信頼性に問題が考えられた。一方、凍結工法は、インナー注入工法に比べて高価となるが、凍結範囲全体が均一に改良できるため、止水性に加えて必要な地山強度も期待できる。このことから、凍結工法を採用した。

4. 施工順序

本工事の施工順序について紹介する。

まず、既に施工したシールドトンネルの中から、図 6 のように凍結管を放射状に埋め込んだ。凍結管は掘削機を使って 186 本埋め込んだ。

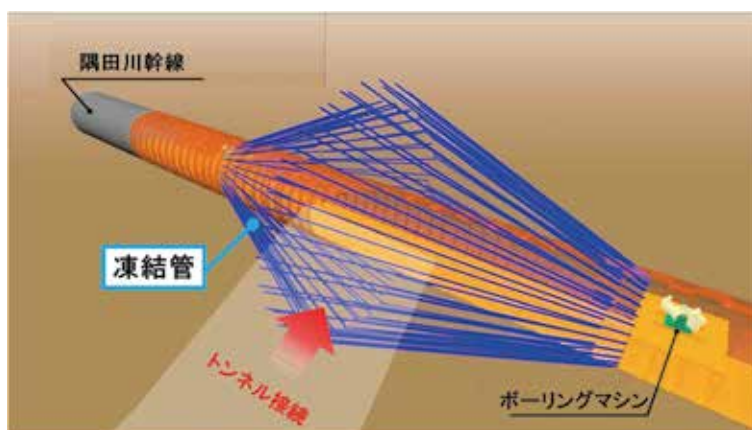


図 6 凍結管

次に、凍土の温度を測るための測温管を図 7 の黄色の線で示すように埋め込んだ。測温管は 32 本を設置した。

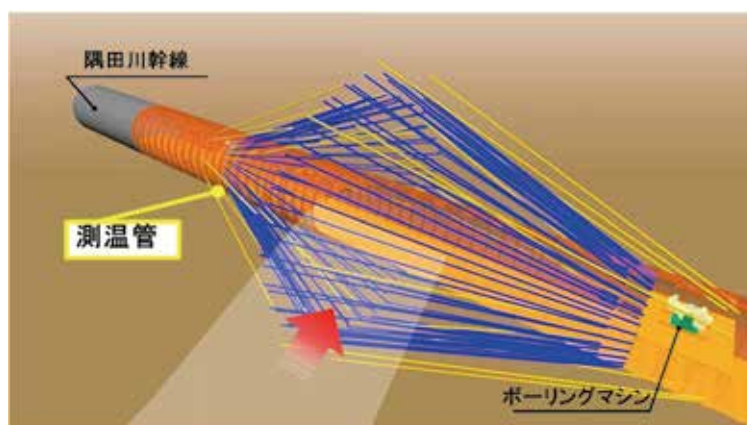


図 7 測温管

さらに、図 8 のように拡幅工事の施工中に凍土の崩落を防止するための内部放射凍結管を設置した。内部放射凍結管は 58 本設置した。

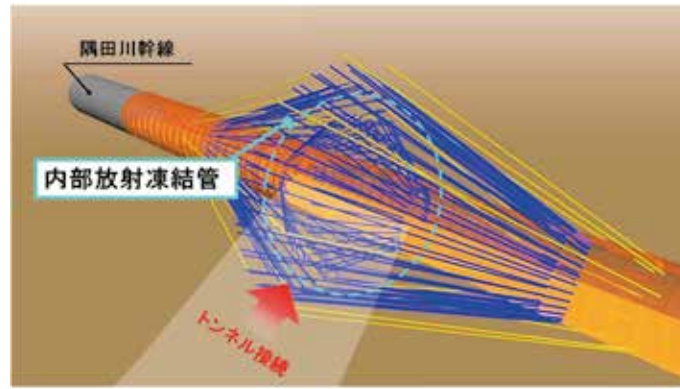


図8 内部放射凍結管

その後、凍着部セグメント内部に、図9のように凍土とセグメントとの凍着部からの地下水の侵入を防止する目的で使用する貼付凍結管を704本設置した。

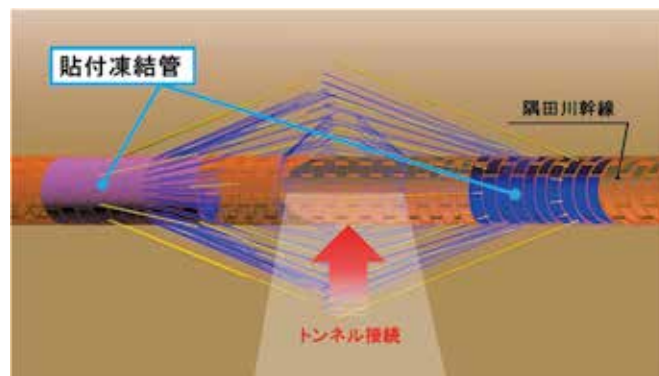


図9 貼付凍結管

凍結管の中には、-30度のブラインと呼ばれる不凍液を循環させて徐々に土を凍らせ、最終的に厚さ3.4mの凍土を約5ヶ月間要して造成した(図10)。造成量は3,700 m³であった。図11は、実際の工事の時のセグメント内部の写真である。

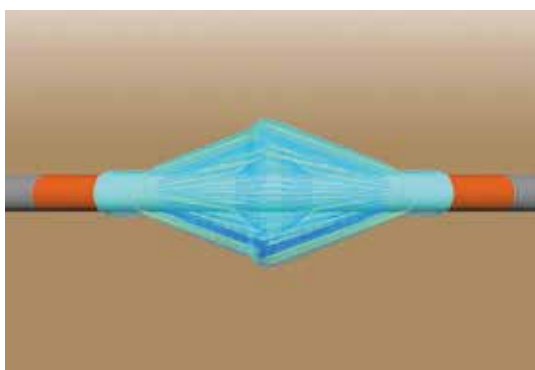


図10 凍結造成工



図11 凍結中の坑内状況

凍土造成完了後は、既設セグメントを撤去し、凍土を掘削して段差部セグメントを組み立てる。図12は、セグメント撤去後に凍土を掘削している様子で、図13はセグメントを組み立てている様子である。



図12 凍土掘削状況



図13 セグメント組立状

外径5.5mの既設セグメントの撤去と凍土の掘削、最外径9.5m 拡幅セグメントの組立を繰り返し、セグメントの拡幅作業が完了した（図14）。

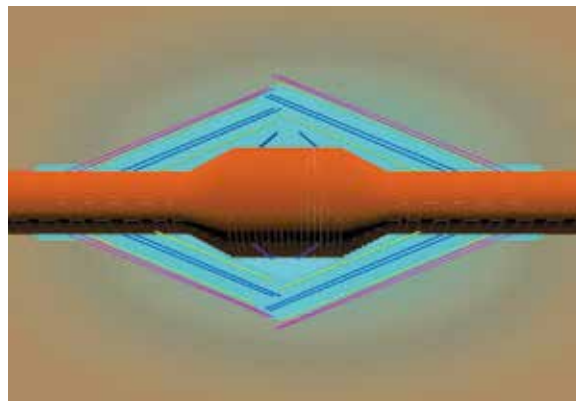
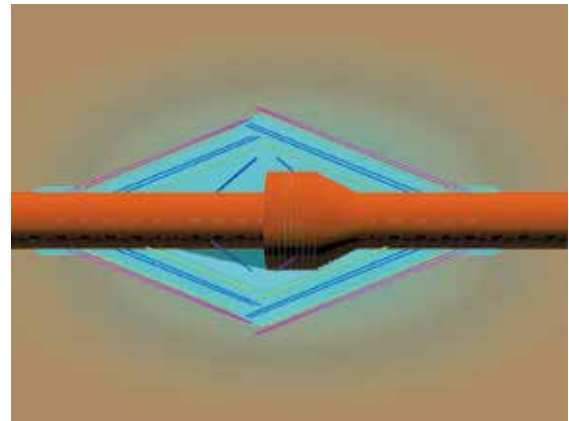
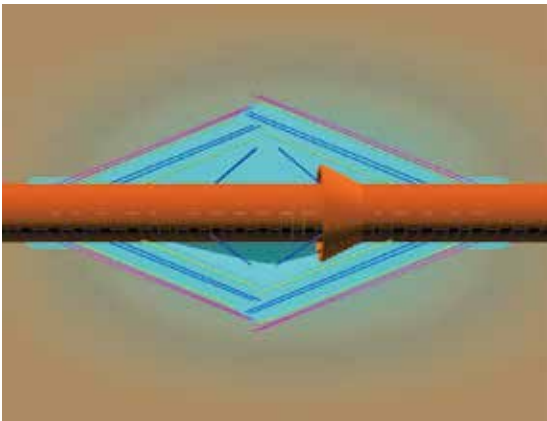


図14 セグメント拡幅状況

セグメント拡幅後、地中接合してくるシールドを受け入れるための到達設備を凍土の中で設置した（図15）。

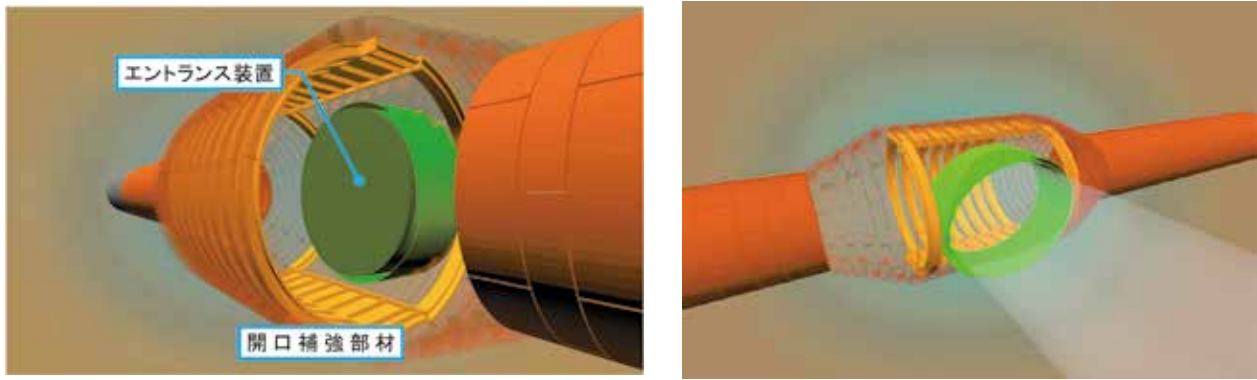


図 15 到達設備設置

到達設備設置後、凍結管の中に 60 度の温水を流して、凍土の解凍を行った。それと同時に、周辺地盤の沈下抑制対策として、セメントベントナイトの充填を行った(図 16)。

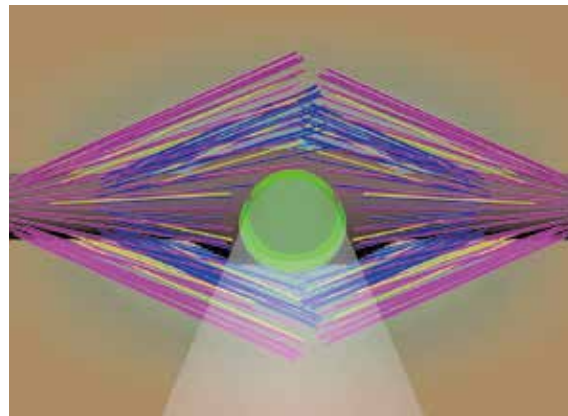


図 16 強制解凍

最後に、新しく建設するポンプ所から発進する外径 6.35m のシールドマシンをトンネル側方から T 字に接続させた。シールド機が到達したら、エントランスとシールド機の間を止水した。その後、エントランスのふた、シールド機の面板と隔壁を撤去して、接合が完了した(図 17)。以上が、施工の流れである。

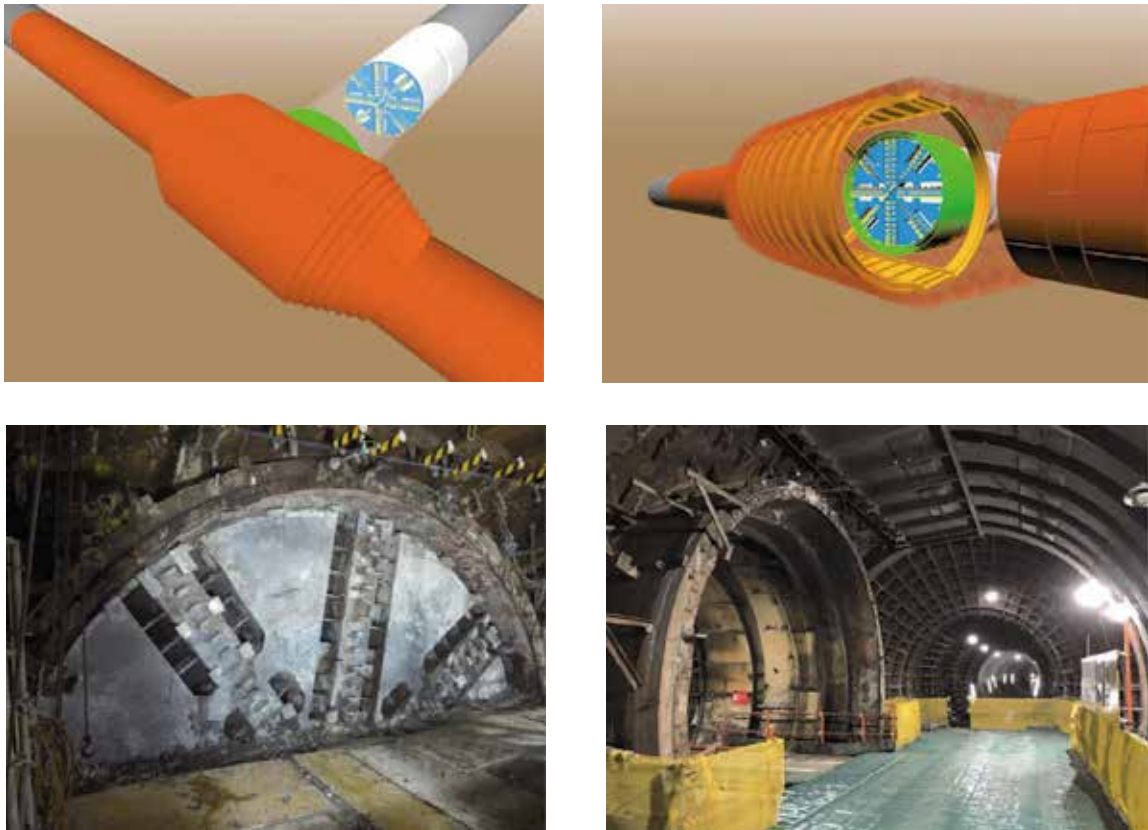


図 17 地中接合

5. プロジェクトの特徴

次に、プロジェクトの特徴について述べる。

5.1 凍結工事の特徴

凍結工事は、外径 5.5m セグメント内から地中内に凍結管、測温管など全部で 358 本を埋設し、総延長約 4.4km に及んだ。また、凍土とセグメントとの凍着力を向上させ地下水侵入を防止するため、凍着部セグメント内部に貼付凍着管を 704 本設置した。凍土は約 5 ヶ月間要して造成し、造成量はフィギュアスケートリンク約 26 面分に相当する 3,700m³ となり、下水道工事としては日本最大規模となった。

本工事の凍結対象地盤は凍結膨張率の大きい粘性土が主であり、凍土造成時に発生する凍上現象への対策が必要であった。そのため、近接している鉄道や構造物への影響抑制対策として、凍土周りに国内初となる放射状温水管 128 本を設置したことが大きな特徴として挙げられる。温水の循環による凍土の過剰成長の抑止したことにより、地表面凍上量は 8mm に抑えられ、周辺環境への影響を最小限に抑制した(図 18)。

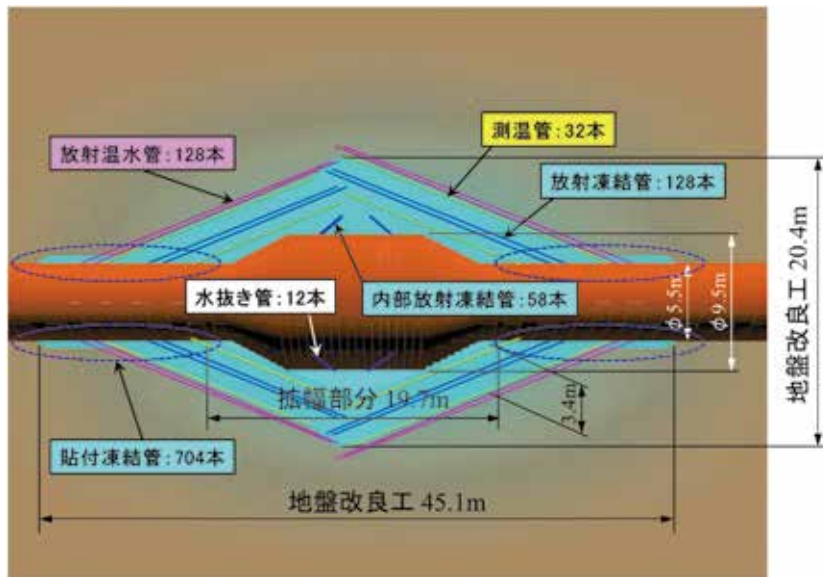


図 18 凍土造成に用いた埋設管

5.2 凍土掘削とシールドトンネルの拡幅工事の特徴

高水圧・凍土内でセグメントを拡幅するのは、初の試みであった。本工事では、外径 5.5m から 9.5m まで 4m も拡幅を行ったが、凍土解放面を最小限とし、凍土崩落・地下水浸透を防止するため、セグメント形状は、シールド接合部は外径 9.5m、この両側 3.5m 区間は外径を 0.5m ずつ変化させる段差構造とし、セグメント幅は全て 0.5m とした(図 19)。

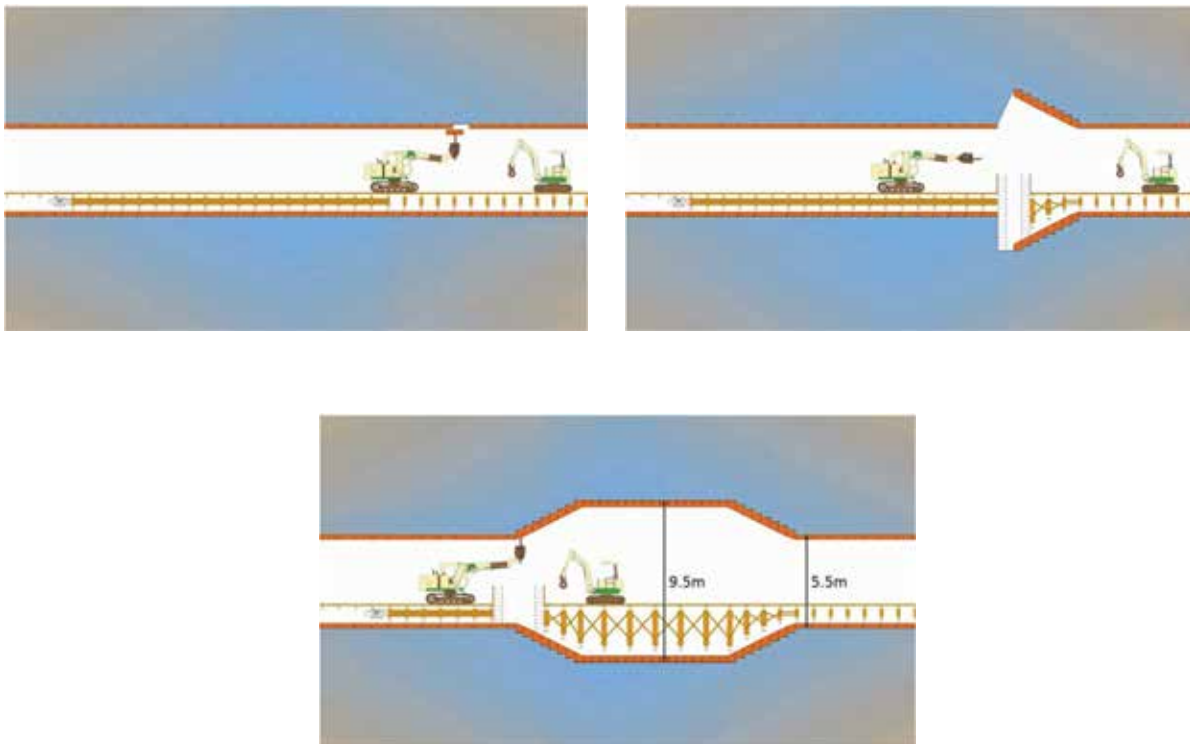


図 19 シールドトンネル拡幅イメージ

5.2.1 凍土掘削機の選定

凍土掘削機を使用して凍土を掘削するにあたり、掘削機の性能、適切な切削用アタッチメント、最適なビット形状などを確認するため、図のように地上での凍土掘削実験を行った。実験の結果より、回転ヘッドはシングルヘッドからツインヘッドへ変更し、回転ヘッドに取り付けるチップはアスファルト専用が効率的であることがわかった(図 20)。

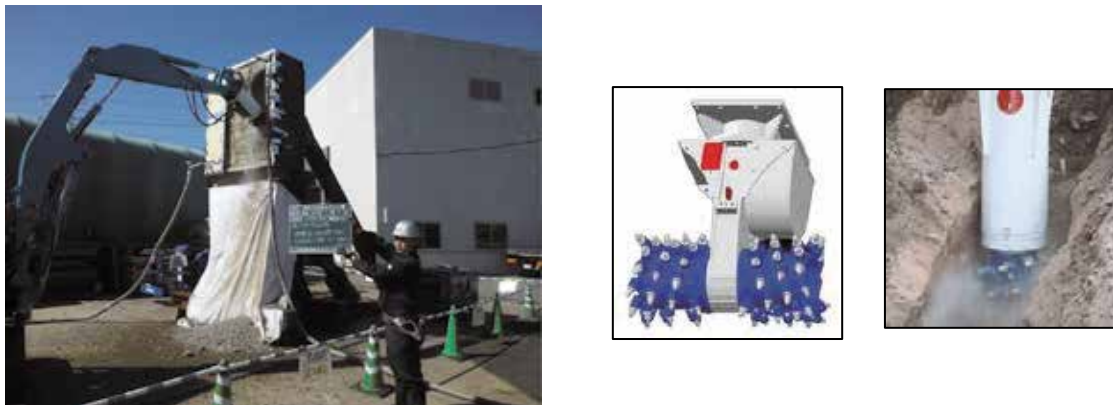


図 20 凍土掘削実験と掘削ヘッド

5.2.2 セグメント組立機

セグメントハンドリング機は、鋼材ハンドリング機の鋼材を持つ部分にセグメントを持つ用のアタッチメントを新規に製作して取り付けた。地上に既設セグメント内空断面と拡幅断面を再現した空間をつくり、既設セグメント内の限られた空間でハンドリング機の動きにどのような制約があるか等を事前に調べるため、既設セグメントの解体と拡幅セグメントの組立は、予め地上でセグメント組立実験を行って確認した(図 21)。



図 21 セグメント組立実験

5.3 強制解凍

本工事で造成した 3,700m³の凍土を自然解凍した場合、約1年8ヶ月という長い期間を要する。そのため、安全に考慮しながら工期を短縮することを目的として、凍土内に約60℃の温水を循環して凍土の解凍を促進する強制解凍を採用した。その際、解凍に伴う地盤沈下を防止するため、地盤内の空隙をセメントベントナイト充填することで沈下抑制を図った。セメントベントナイト充填に際しては事前にシミュレーションを行い、充填量を決定した。また、セグメント変位をモニタリングし沈下が大きき部分を中心に充填を行った。その結果、予測の13mよりも小さい8mmの地表面沈下量に収めることができ、周辺環境への影響を最小限に抑制した。解凍期間は大幅に短縮され、約5ヶ月で終えることができた(図22)。

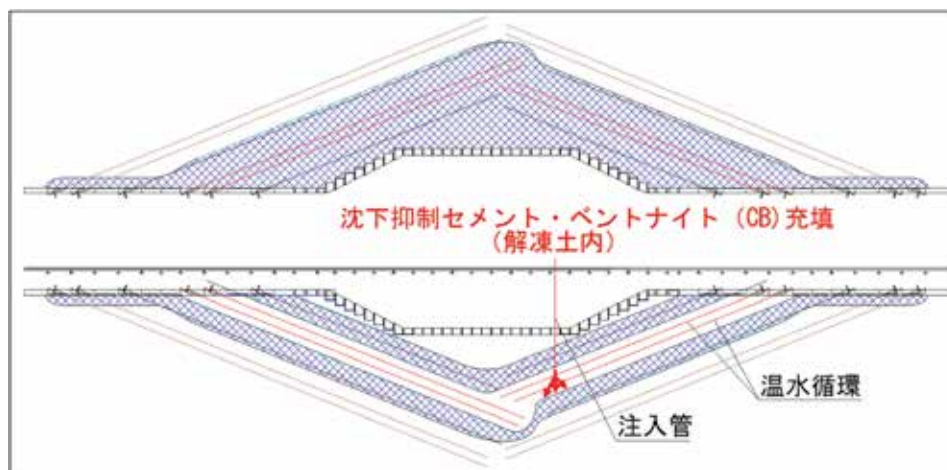


図 22 強制解凍

5.4 CIM を活用した施工管理

本工事では、凍結工及び拡幅工が抱えるさまざまな課題の解決を目的とし、3種類の CIM を開発して、現場の施工管理に活用した。

5.4.1 凍土造成過程の見える化

凍結工では、凍土が隙間なく閉塞し耐力壁・止水壁を形成することが不可欠である。埋設した凍結管の位置を正確に把握し、後続管の埋設位置を調整する必要がある上、凍土造成中には凍土壁の厚みと閉塞状況を逐次予測し、臨機応変に施工を行わなくてはならない。従来は、二次元による管理手法が基本となっており、凍結管の埋設位置や凍土の形状を三次元的に把握することはできていなかった(図23)。そこで、本工事では、凍結管の埋設作業時から CIM による出来形管理手法を導入し、計画凍土範囲の地盤が確実に凍結されるよう、凍結管の埋設位置を適宜修正した。また、理論解により算出された凍土厚データを基に、3Dモデル空間に凍土柱が徐々に膨らんでいく過程を定期的に表示するシステムを開発・導入した(図24)。これにより、凍土柱がどの程度成長し、どこに隙間が残っているのか、等の情報を迅速に把握することが出来た。

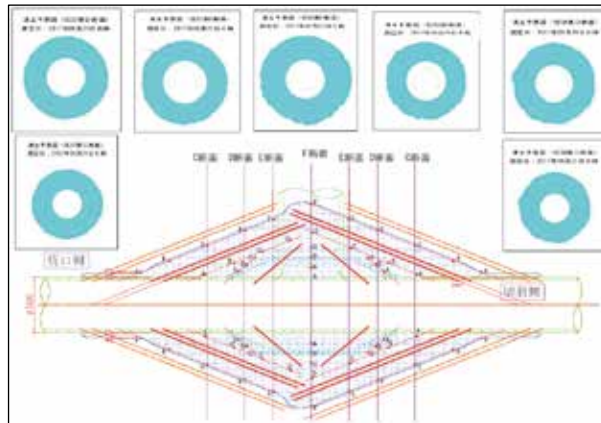


図 23 凍結造成管理（従来方法）

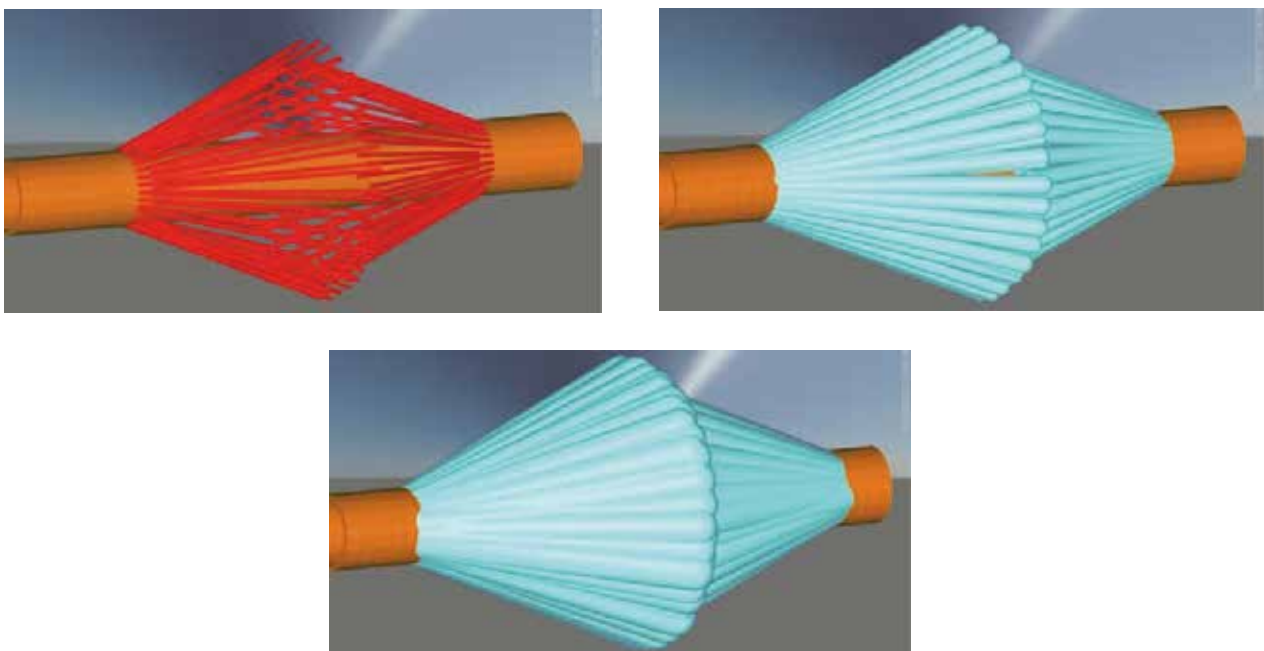


図 24 CIM を活用した凍土造成管理

5.4.2 重機シミュレーターの開発

本工事の拡幅工は、セグメントの撤去・組立を行うハンドリング機その他、凍結設備類が輻輳する内径 4.95m、延長 19.7m の狭いトンネル坑内にて作業を行う計画であった。そのため、各重機をどこに配置しどのように操作すれば効率的かつ安全に作業を遂行できるかを詳細に検討する必要がある。従来の二次元図面上で検討するのは困難であるため、三次元的に重機の配置や操作手順を検討する必要がある。そこで、坑内環境を模擬したトンネルの 3D モデルと PC 画面上のゲージの操作により動作可能な重機モデルを組み合わせ、拡幅工検討用の重機シミュレーターを構築した(図 25)。これにより、坑内の実情に則した騎乗での施工シミュレーションが可能となり、現場合わせて対応せざるを得なかった細かい重機の動きを事前に検討できるようになった。これら 3D モデルによる施工管理を行ったことで、周辺環境への影響を最小限に抑え、難工事を安全・確実に施工することができた。

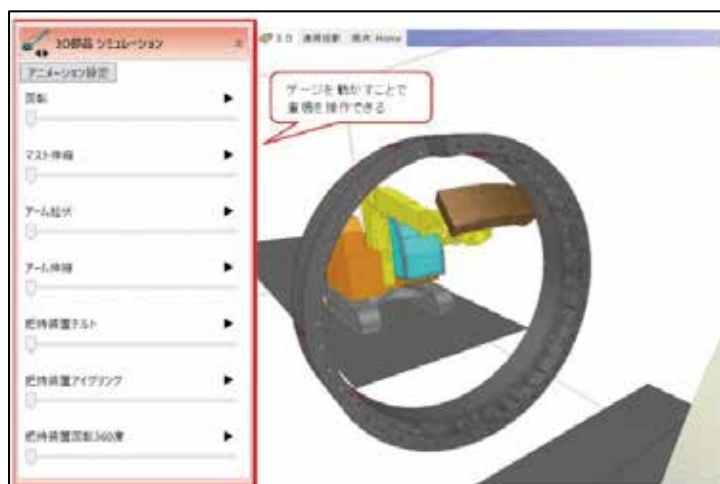


図 25 重機シミュレーター

5.4.3 計測データの一元化と見える化

本工事では、凍結や解凍に伴う地盤の隆起や沈下により、地上の鉄道構造物や道路の変状、地中埋設管の破損などが発生する可能性があった。そのため、地上・地中・坑内に各種計測機器を設置し、1500 点以上に及ぶ計測データを監視しながら施工を行った。これら膨大な数の計測データを個別にグラフ化し複数のモニターに表示して管理する従来の手法では、計測データの変動と計測位置を同一画面で確認できないことによる判断の遅れや、同種データ間の相対的な差異または異種データ間の相関関係の見落とし等が生じ、異常事態を瞬時に察知できない点に問題があった。そこで、計測データの値に応じて色に変化する図形要素を実際の計測位置に合わせて 3D モデル空間上に配置し、全計測データを単一画面上で一元管理する CIM モデルを開発した(図 26)。これにより、従来多くの時間を要してきた計測データの確認作業が、視覚的・直感的な情報表示により迅速化され、計測データ相互の関係性や異常値を位置情報と紐付けて容易かつ瞬時に検出できるようになった。

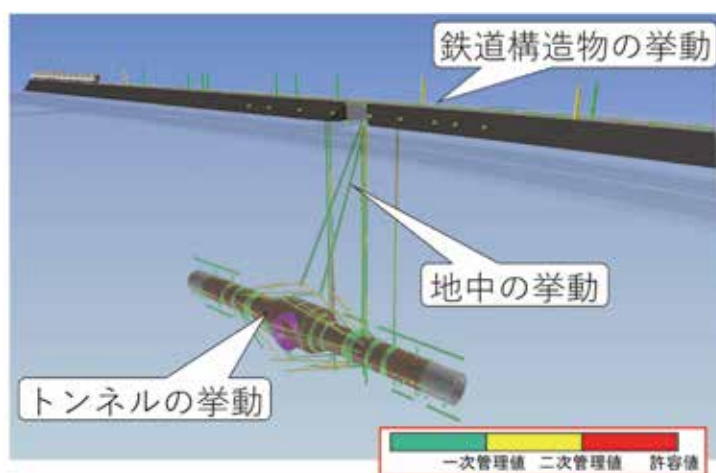


図 26 計測データの一元化と見える化

6. 結論

本工事は、多くの近接構造物を抱え、地下 40m の高い水圧が作用する困難な施工条件であった。それにも関わらず、最終施工精度として施工誤差 10mm という高精度で到達し、日本の下水道工事における最大級の凍結工法を用いたシールドトンネルの拡幅と地中接合を無事故・無災害で施工完了するこ

とができた。交通量が多く、地下埋設物が輻輳する都市部では、地中構造物を構築するにあたり、大深度・非開削での施工とならざるを得ない。施工上の制約条件によっては、小さなトンネルを先行構築したあと、大きなトンネルを施工し地中接合する場合が出てくるだろう。その際には、補助工法の実績により得られた知見が、今後の同種工事の参考になることを期待する。

7. 謝辞

地下約 40m という大深度において、下水道工事として国内最大規模の凍結工法を用いたシールドトンネルの拡幅と地中接合という難工事を、周辺環境への影響を抑えて完遂させることに尽力された関係者の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 東京都下水道局：経営計画 2016、2016. 2
- 2) 田中悠一：大深度・高水圧下での凍結工法による地中接合部の拡幅，岩の力学ニュース 127 号 2018. 5
- 3) 葛西孝周，日野和功，船倉崇弘：大深度・高水圧下でのシールド地中接続(拡幅)工事の設計，トンネルと地下，Vol146，pp. 49～56，2015 年 6 月
- 4) 武見敏靖，堀浩之，下村義直，高松伸行：大深度・高水圧下での凍結工法による地中接合部の拡幅，トンネルと地下，Vol149，pp. 27～35，2018 年 1 月