

大深度，高水圧下における凍結工法と 受入れ室を併用したシールドの到達実績

岡崎 俊夫¹・松浦 将行²・杉山 純³・末永 俊之⁴

¹正会員 日本下水道事業団 関東・北陸総合事務所（〒113-0034 東京都文京区湯島 2-31-27）
E-mail : Okazaki04@jswa.go.jp

²正会員 日本大学特任教授 生産工学部土木工学科（〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1）
E-mail : Matsuura03@jswa.go.jp

³東京オリンピック・パラリンピック競技大会組織委員会（〒104-6206 東京都中央区晴海 1-8-12）
E-mail : jun.sugiyama_1@tokyo2020.jp

⁴正会員 鹿島建設株式会社 東京土木支店（〒107-0051 東京都港区元赤坂 1-3-8）
E-mail : suenagat@kajima.com

シールドの立坑到達にあたっては，シールド本体と到達立坑壁間からの出水による到達立坑の水没，土砂流入による周辺地盤の陥没といった危険があるため，その防止対策を十分に検討する必要がある。

東京都下水道局が整備を進めている芝浦水再生センターと森ヶ崎水再生センター間 8km を内径 6000mm の連絡管で接続する事業のうち，中間発進立坑から森ヶ崎水再生センター間 2.3km のシールドトンネル工事が完了した。土かぶり 59m，水圧 0.65MPa，シールド到達部直上には下水道局施設が稼働中であるという過酷な条件下で，シールドで直接切削が可能な仮壁，受入れ室，液化 CO₂ を用いた凍結工法を併用し，シールドを安全に到達させた実績について報告する。

Key Words: arrival of shield, freezing method, receiving room

1. はじめに

東京都下水道局では，水再生センターの再構築時に不足する水処理，污泥処理能力の相互補完や，災害時におけるバックアップ機能の確保を目的とし，水再生センター間を連絡管で接続する事業を進めている。このうち，東京都芝浦水再生センターおよび森ヶ崎水再生センターを結ぶシールドトンネル工事は，内径 6000mm，延長約 8km の大規模事業であり，図-1 に示すとおり中間発進立坑から森ヶ崎水再生センターへの泥水式シールド工事の施工を完了した。

今後，連絡管に収容する設備は図-2 に示すとおり，内径 1200mm の送水管 2 条，内径 600mm の送泥管 1 条などがあり，設備維持管理スペースを考慮し内径 6000mm のシールド断面としている。縦断面計画としては，図-3 に示すとおり芝浦水再生センターと中間立坑間に配置された首都高速道路中央環状品川線との離隔をシールドトンネル外径長(1D)を確保する必要があることから，最大土かぶり 59m（施工深度約 66m）に配置することとなった。通過断面部の土質は，上総層群泥岩層およびその上部の



図-1 連絡管平面図

江戸川層を主体とし、全線で平均 N 値は 50 以上となる。今回工事範囲並びに到達部の地盤状況図を図-4 に示す。

到達部のシールド断面の土質はシルト質細砂、砂礫層が 7 割を占めており、透水係数は 5.02×10^{-3} (cm/s) と中位の値を示し、土かぶり 59m、地下水圧 0.65MPa の条件下でシールドを到達させることが既存の調査で判明していた。この様な大深度、高水圧下で、稼働中の下水道局施設をシールド上部に抱えた条件でシールドの到達を行った施工は、全国的にみても事例が少ない。

施工の安全性を十分確保するため、事業者、発注者、設計コンサルタント、シールド、到達立坑工事受注者からなる工事施工検討会を設置し、施工計画並びに安全対策を取りまとめ、実施工に反映した。本報告では最終的に採用したシールドで直接切削が可能な仮壁、受入れ室、液化 CO₂ を用いた凍結工法の併用について報告する。

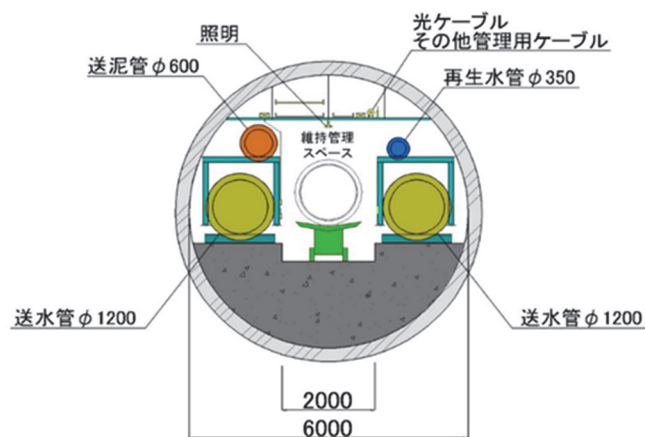


図-2 連絡管断面図

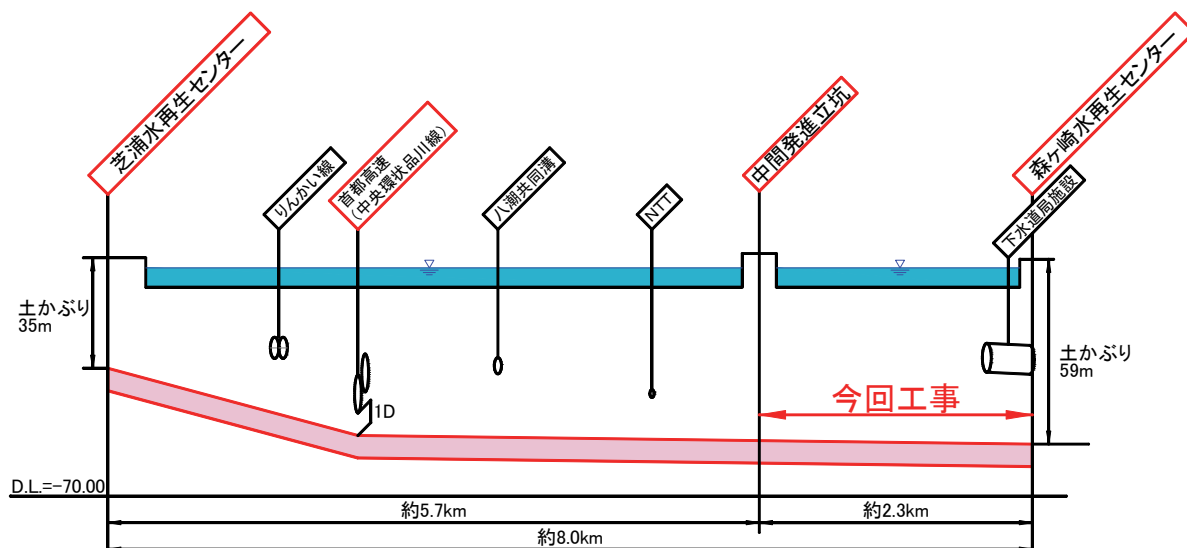


図-3 連絡管縦断面図

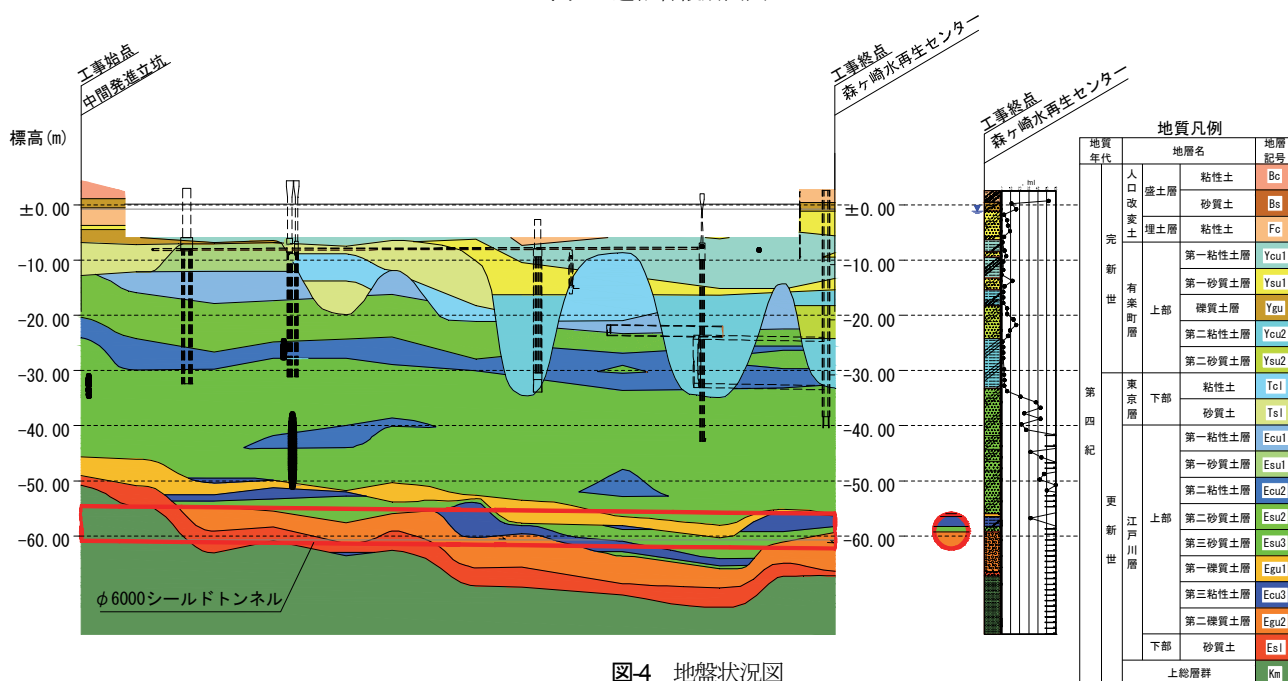


図-4 地盤状況図

2. 当初計画の問題点と課題

一般的なシールドの立坑到達方法の例¹⁾²⁾を図-5に示す。シールドの立坑到達には、図-5(A), (B)に代表する様にシールドの受入れに先立ち、立坑土留め壁撤去の際に鏡面を自立させるため、及びシールドの立坑内受入れ時にシールド後方からの地下水、土砂の立坑内への流入を防ぐ止水ゾーンを形成するための2つの役割を果たす補助工法(地盤改良や凍土の造成)を必要とする。図-5(C)に示す切削可能材の使用、杭芯材の引抜きは鏡面を自立させるための補助工法を不要とし、図-5(D)の受入れ室、(E)の水中到達、(F)のソケットは止水ゾーンを形成するための補助工法を不要とする。

本工事の当初計画では、図-6到達立坑付近状況図に示すとおり、到達立坑付近の水再生センターの既存施設、内径 8000mm の既存幹線が接続する特殊人孔を避ける方法で、シールド到達に先立ち到達鏡面が自立するように地上から立坑背面に地盤改良を行ない、ニューマチックケーソン工法で施工されたコンクリート壁(厚さ 2.5m)をコア削孔で除去し、シールドを到達させることとしていた。

しかし、地上からの高圧噴射かく拌杭などの地盤改良は、大型構造物に近接した 70m 以上の斜め削孔についての施工実績が限られており、改良品質を確保するための

詳細な地質調査や、出来形確認方法の検討など様々な問題を有することが分かった。

水再生センター既存施設への影響を最小限とし、止水効果のより高い到達方法について検討が課題となった。

3. 課題の解決策

前述した工事施工検討会において、地上から補助工法を施工することは困難と判断し、立坑内もしくはシールド内からの補助工法の検討を行った。

(1) 切削可能材の使用(仮壁)

まず立坑土留め壁撤去のための補助工法を不要とする図-5(C)の切削可能材の使用を選択し、ニューマチックケーソン工法で設置する到達立坑のシールド受入れ部の壁部を炭素繊維材を用いた仮壁とした。しかしこの仮壁をシールドで直接切削するにあたり、2.3km の掘削を行ったカッタービットでは摩耗により仮壁の切削が困難であることが懸念された。

図-3連絡管縦断面図に示したとおり、シールド路線のほとんどが京浜運河直下での施工であり、ビット交換のための中間立坑の設置等は困難であった。

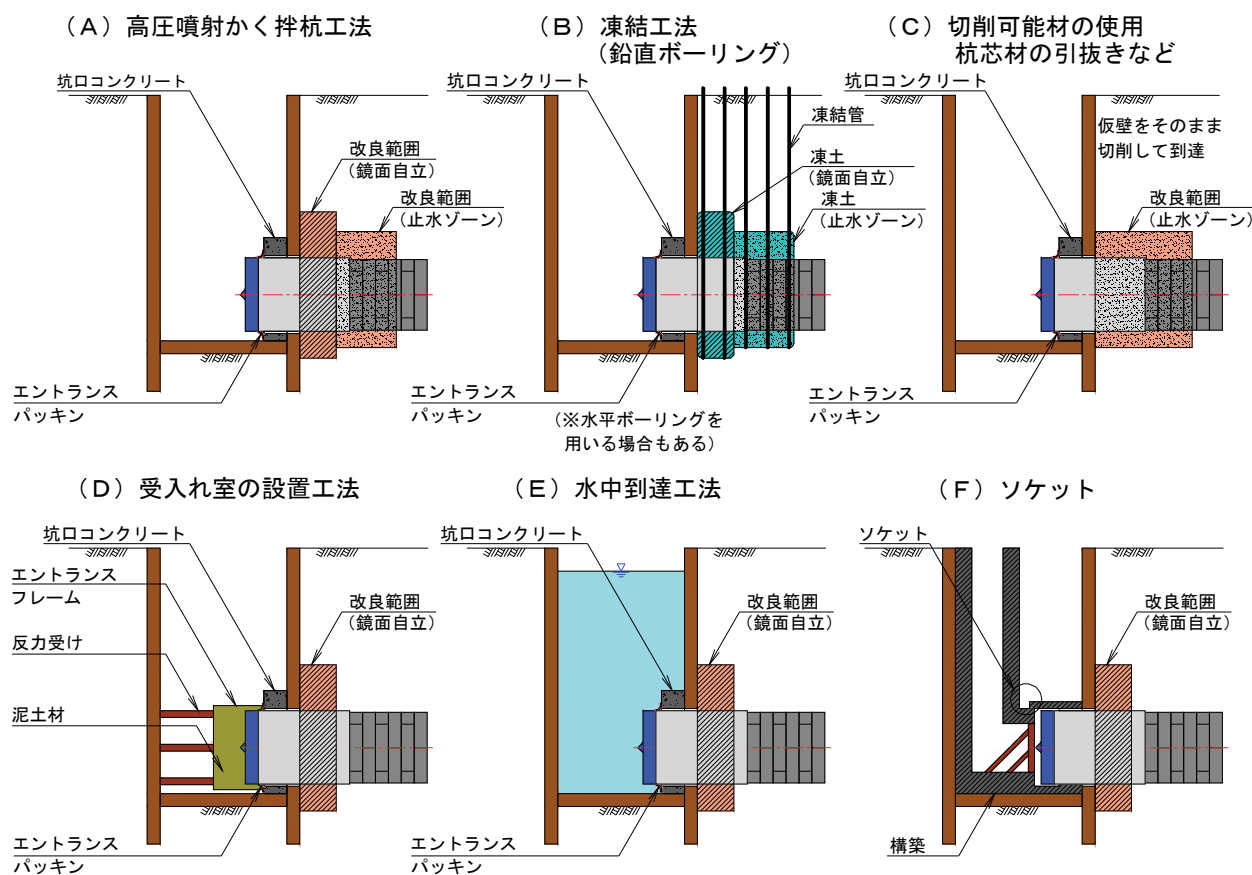


図-5 立坑到達方法の例

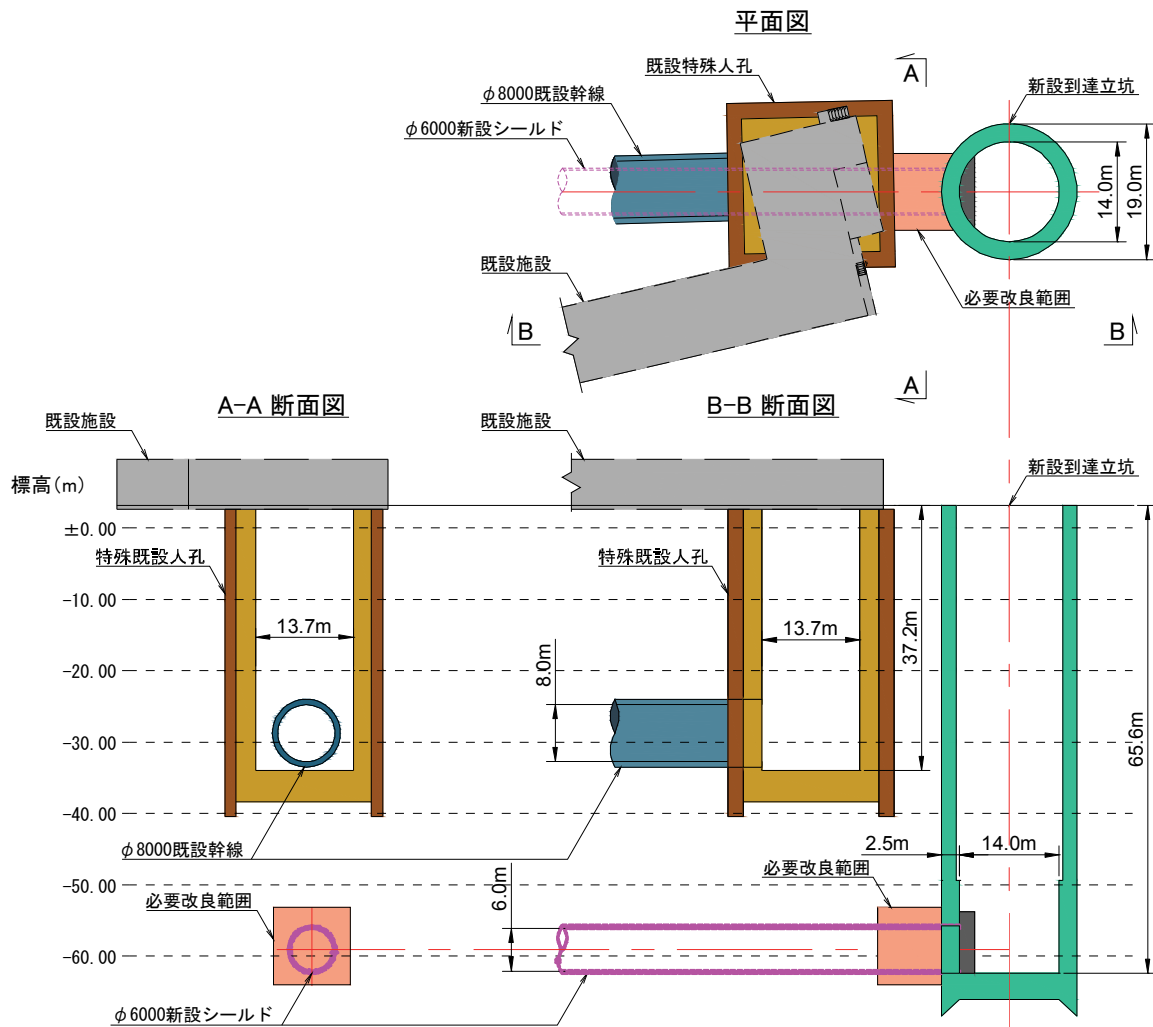


図-6 到達立坑付近状況図

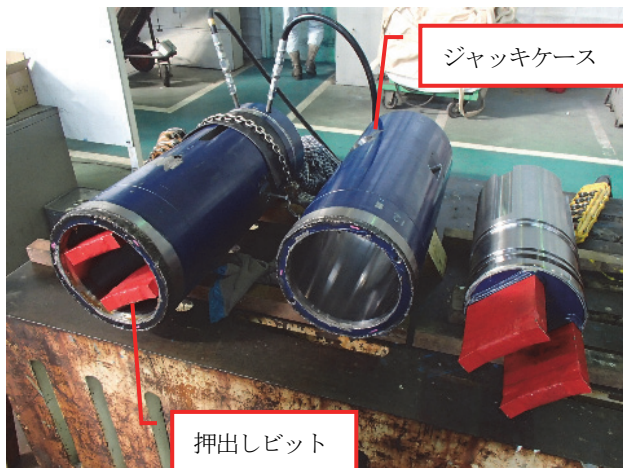


図-7 押出しビット単体

これを解決するために、カッターヘッドに到達仮壁切削専用の押出しビットを内蔵することとした。通常掘削時はカッターヘッド内に到達仮壁切削専用ビットを収納しておき、シールドが到達立坑仮壁に到着した時点で新品のビットを装着できる機構とするため、2個のビット後部にジャッキを配置した。新品のビット装着時にはこ

のジャッキを伸ばすことで、カッターヘッド前面に押し出せる様にした。ジャッキは油圧構造としたが、到達仮壁切削時にジャッキが押し戻される懸念があったことからジャッキシリンダ内にストッパー機構を内蔵した。押し出しビットの単体写真を図-7、押し出しビット装着前後のカッターヘッドの写真を図-8、9に示す。

(2) 受入れ室の設置

次にシールドを立坑に受入れる際の止水対策として、図-5(D)に示す受入れ室の設置工法を採用した。

図-10に示すとおり受入れ室は、到達立坑となるニューマチックケーソン施工時にシールド受入れ部に設置した埋設リングにエントランスリングを接続し、坑口コンクリートを打設。さらにエントランスリングにエントランスフレームを接続した。

エントランスフレーム内に流動化処理土を打設しておき、到達仮壁の切削が完了次第流動化処理土を掘削し、シールドをエントランスフレーム内の所定位置に停止させる計画とした。

シールドで仮壁、および流動化処理土掘削時に流体設

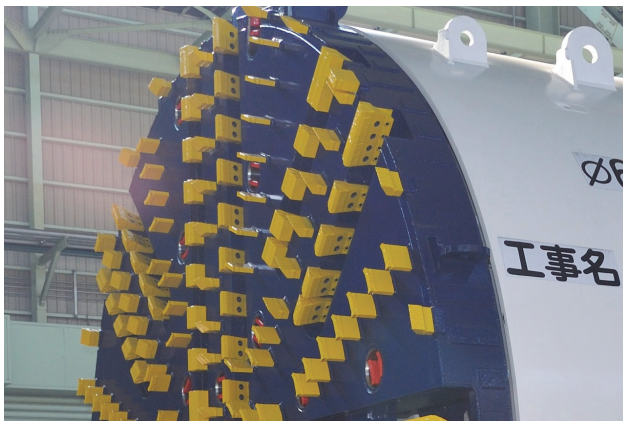


図-8 押しビット装着前のカッターヘッド

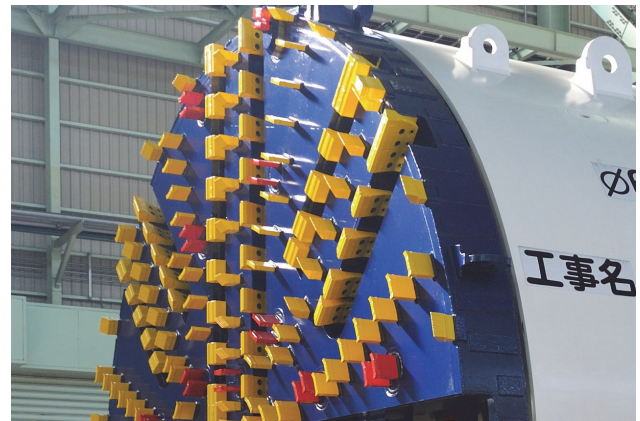


図-9 押しビット装着後のカッターヘッド

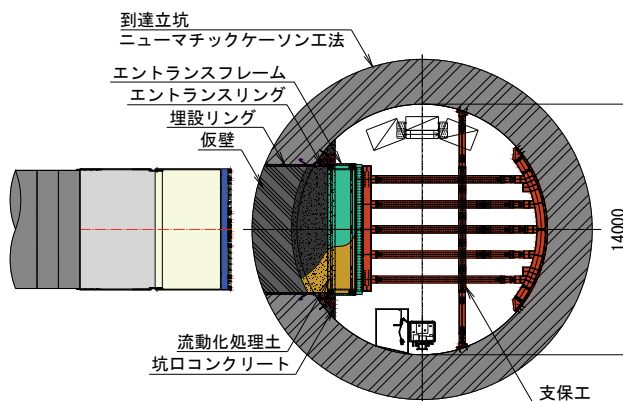


図-10 受入れ室設置計画平面図

備が閉塞し、切羽水圧が瞬間的に上昇する可能性を想定し、エントランスフレームは 0.65MPa の切羽水圧に対し、1.0MPa の耐圧構造とした。

また反力受け材についても山留め材を用いて、シールドジャッキの装備推力 52,500kN に耐える支保工構造とした。図-10 に受入れ室の設置計画平面図を示す。

(3) シールド到達後の凍結工法

シールドを受入れ室内の所定位置に停止させた後、受入れ室の解体に備えシールドカッターの最外周ビットにより発生するシールド後方余堀り部からの水みちを止水する必要がある。本工事ではシールド掘削外径をシールド本体外径 6750mm に対し、片側 10mm ずつ、6770mm としていた。図-11 に余堀り状況図を示す。

この片側 10mm ずつの余堀り部を充填、止水するためシールド内及び到達坑口コンクリートに裏込注入や薬液注入が可能なバルブを設置した。こりにより、シールド停止後に余堀り部への注入が可能であったが、片側 10mm の余堀り部に土砂や仮壁の切削くずが点在する可能性も考えられ、その場合は十分な注入ができず止水性能が著しく低下する恐れがある。

また、余堀り部は受入れ室解体後にシールド本体と坑口金物に鉄板を溶接することで閉塞し、最終的な止水を

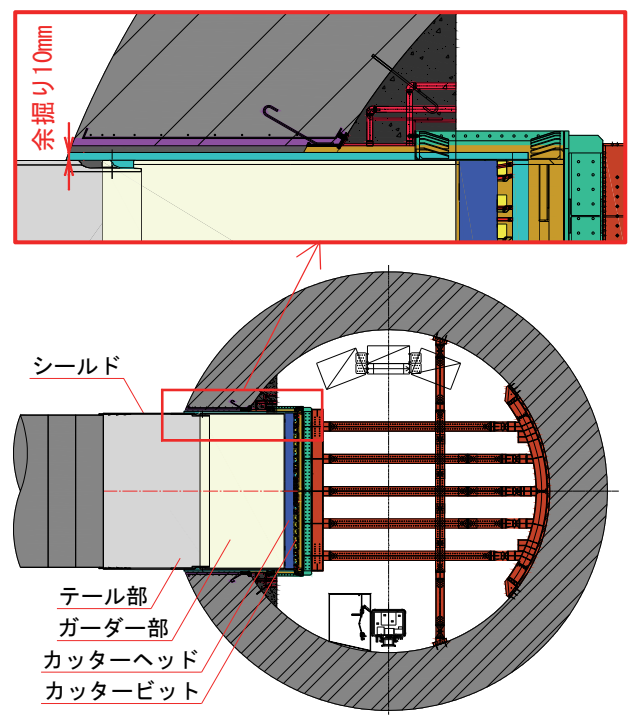


図-11 余堀り発生状況図

行うこととした。しかし、受入れ室解体から止水鉄板の溶接が完了するまでの約 2 週間の期間を注入のみによる止水に頼っていることとなり、万が一受入れ室解体時にシールド本体と注入材の縁が切れた場合は大きな出水事故につながる危険があった。

注入範囲の出来形を確認することが困難であったため、貼付凍結工法によりこの余堀り部に凍土を造成して止水を行うこととした。貼付凍結工法による凍土の造成は、シールド製作時にあらかじめシールド内に凍結用の冷媒を循環できる凍結管を装備しておき、シールドが所定位置に停止した後、凍結プラントを坑内に設置して実施することとした。

この凍土には止水鉄板溶接完了まで水圧に耐える強度かつ、止水鉄板溶接時の入熱に耐える性能が求められる。そこで、凍土の仕様について次のように検討した。

a) 凍土の抜け出しの検討

余掘り部に造成した凍土は、地山からの水圧により立坑内へ抜け出す恐れがある。水圧が凍土を押し出す力を押し出し力 W 、凍土がシールド、コンクリートに付着する付着力を Q とした時、 $Q > W$ であれば凍土の抜け出しを防ぐことができる。凍土の抜け出し検討の結果を表-1 に示す。なおシールド内に蔵した凍結管の配置により、有効凍着長は 1,375m とした。凍土造成位置図を図-12 に示す。

b) 溶接作業時の入熱に対する検討

受入れ室解体後、シールド本体は残置とし、到達坑口金物およびシールド本体の間の隙間をふさぐように厚さ 16mm の止水鋼板を設置することとした。止水鋼板は水圧に耐える様に 84 枚の厚さ 9mm の固定リブで止水鋼板を補強する。坑口止水鉄板取付図を図-13 に示す。

これらの設置は全て現場溶接作業となるため、溶接熱がシールド本体に伝導し凍土が溶解し凍着が切れる恐れがある。溶接作業時の入熱に対する凍土の安全性を検討するため入熱箇所から凍土までの距離、入熱の温度、時間をパラメーターとしてシミュレーションによる事前解析を行った。溶接作業は連続作業、入熱の温度を 2,000℃、溶接作業開始時の凍土の温度を -10℃、凍着長 1,375mm の地山側の位置を 0mm とした時、2,745mm の位置が入熱箇所となる。入熱シミュレーションのモデルとシミュレーションの結果を図-14 に示す。

シミュレーションの結果、溶接作業開始から 3 時間後には 1,375mm の位置で界面温度が 0℃ を上回り、凍土

が溶解するとの結果が得られた。

溶接作業は延べ 7 日間を見込んでいたため、凍土の凍着範囲前後に測温管を設置、溶接作業中の凍土の温度をリアルタイムで管理し、溶接作業を制限することで凍土の溶解を防ぐ計画とした。

以上を工事施工検討会で決定した施工計画とした。

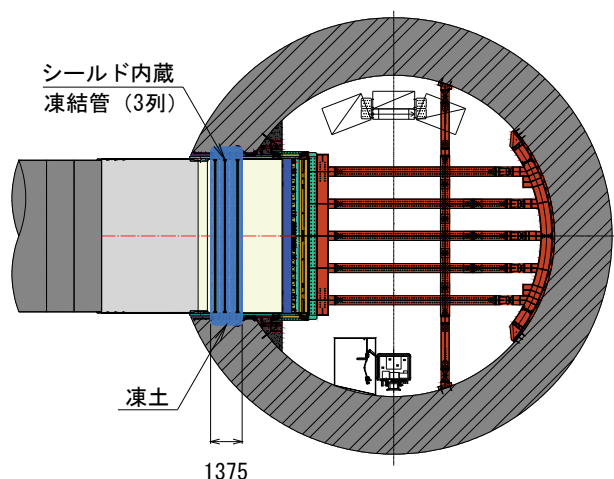
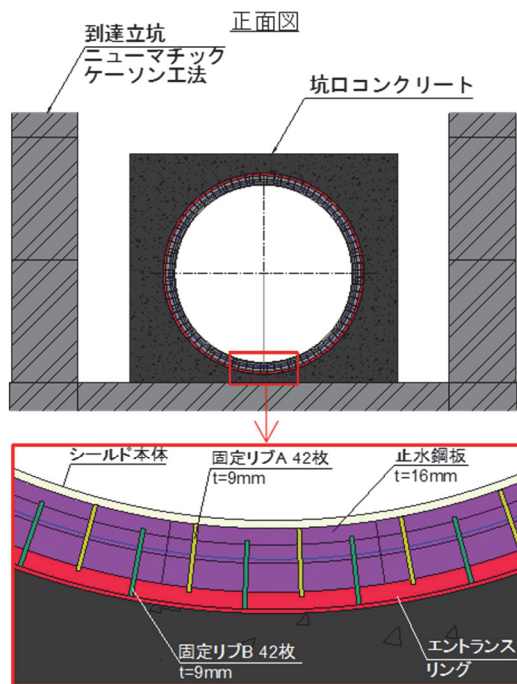


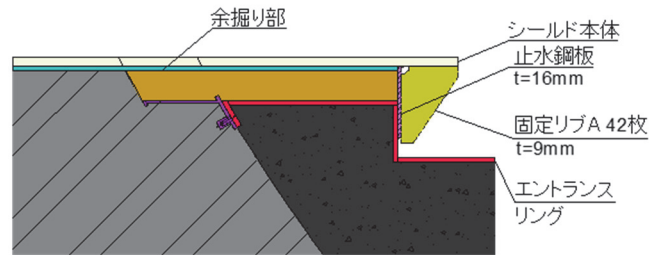
図-12 凍土造成位置図

表-1 凍土抜け出しの検討

項目	記号	単位	値および計算値	計算式
エントランス内径	$\phi 2$	mm	7,050	
シールド外径	$\phi 1$	mm	6,750	
水圧作用面積	A_w	mm ²	3,251,548	$= (\phi 2^2 - \phi 1^2) \times \pi / 4$
水圧	P	MPa	0.65	
押し出し力	W	kN	2,114	$= A_w \times P / 1000$
凍土造成長	L	mm	1,375	
シールド掘削外径	$\phi 3$	mm	6,770	
ケーソン内面周長	CL1	mm	21,269	$= \phi 3 \times \pi$
シールド周長	CL2	mm	21,206	$= \phi 1 \times \pi$
立坑壁と凍土接地面積	A1	mm ²	29,244,875	$= CL1 \times L$
シールドと凍土接地面積	A2	mm ²	29,158,250	$= CL2 \times L$
凍土とコンクリートの付着力 ³⁾	C1	N/mm ²	0.25	※安全側にC2と同値とした
凍土と鋼材の付着力 ³⁾	C2	N/mm ²	0.25	
総付着力	Q	kN	14,601	$= (A1 \times C1 + A2 \times C2) / 1000$
判定	W=2,114 < Q=14,601 OK			



固定リブA設置平面図（シールド本体側溶接）



固定リブB設置平面図（エントランスリング側溶接）

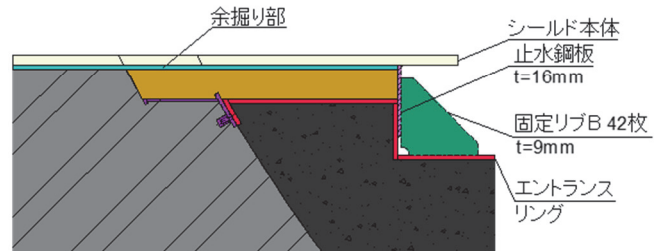


図-13 坑口止水鉄板取付図

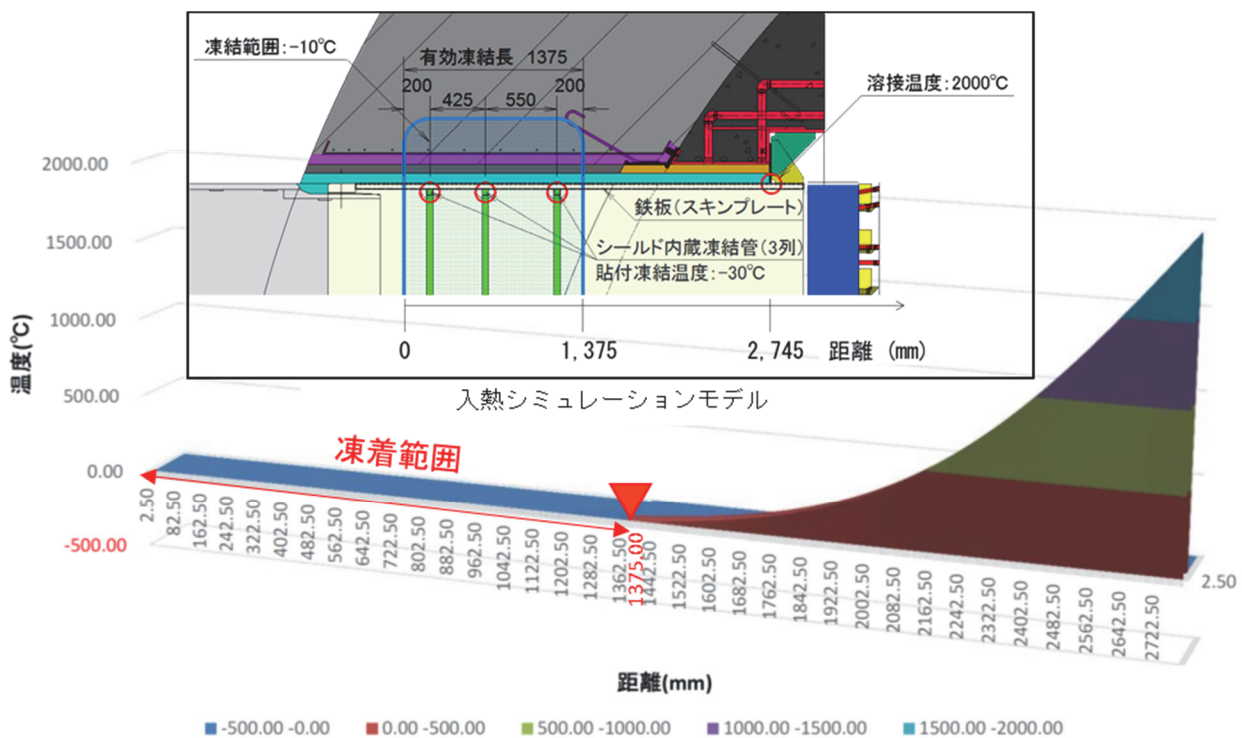


図-14 入熱シミュレーション結果(入熱3時間後)

4. 最終施工計画について

前述した施工計画は、シールド製作前に決定したものであり、決定から2年後に実施を行った。

実施工までの間に到達施工計画をブラッシュアップし、凍結工についてより安全性の高い施工計画を採用した。

凍結工法について当初は、従来工法である不凍液とし

てブライン（塩化カルシウム溶液）をフロン系の冷媒を用いた冷凍機で冷却、循環する方式を採用し、シールド内には $\square 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ の角パイプを貼付凍結管として設置した。当初計画では凍土の抜け出し検討結果に十分な余裕があったためこの計画としていたが、凍土はシールド側からのみの造成となるため、シールド外側の界面の凍着性が不安定となる懸念があった。凍土をシールド外

側も造成して、サンドイッチ状となる様に到達立坑躯体に凍結管を埋め込む検討も行ったが漏水の原因、躯体が脆弱になる恐れがあることから片側からの貼付凍結を行うこととしていた。

この懸念に対し、実施工に着手するまでに CO₂気液混合流体による地盤凍結工法⁴⁾が開発され、液化 CO₂凍結工法として実用化⁵⁾された。合わせてコンパクト化した凍結管⁶⁾が開発され、従来工法より容易に貼付凍結の施工が可能となったためこれを採用し、懸念事項の解決を図った。

従来工法、および液化 CO₂凍結工法のシステムを図-15 に示す。液化 CO₂凍結工法は従来工法のブラインに替わり、CO₂を凍結管に循環する。液体 CO₂を送液し、地盤の熱により一部を気化して気液混合状態で冷凍機に戻る。冷凍機では、NH₃による冷凍サイクルで地盤から奪った熱を冷却水に移し、冷却塔から大気へ放熱する。

ブラインを CO₂に替えることで、ブラインが役割を果たしていた送りと戻りの温度差分の熱量を奪い凍土を造成する顕熱に加え、液体から気体への状態変化に伴う潜熱も有効利用され、単位流量当たりで奪う熱量が増加す

るため、同程度の凍土量であれば流量を小さくすることができる。これに加え液化 CO₂はブラインに比べ粘性が小さいため、貼付凍結管のコンパクト化が可能となった。本工事で貼付凍結管はブラインを用いた場合、□50mm×50mmの角パイプが必要であったが、液化 CO₂を用いた場合はφ12mm程度の銅管や、幅50mm厚さ5mmのアルミ製の偏平多孔管(図-16 ICチャンネル)での施工が可能となり、これらを用いて貼付凍結箇所の増設を行った。最終的な凍土造成配置図、施工ステップを図-17に示す。

最初に配置したシールド内に設置した凍結管を用いる範囲を「一の手」とし、これを止水の要とするメインの凍土とした。これに加え、「一の手」の凍土が水圧による抜け出しにより強固に対抗するため、シールド内後方に IC チャンネルを配置し、到達立坑の地山側に造成する凍土を「二の手」、位置は離れるがエントランスリング外面にφ12mmの銅管を凍結管とし、躯体側からの凍土の造成、溶接入熱に近い位置で対抗する「三の手」を配置した。

「一の手」および「二の手」はシールド後続設備を撤

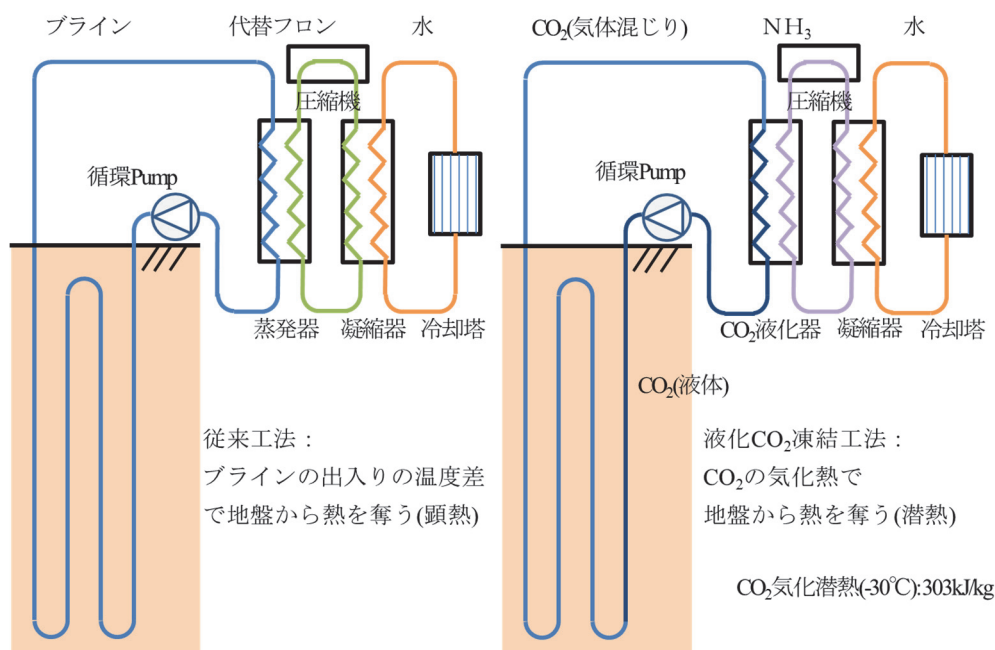


図-15 従来工法と液化 CO₂凍結工法システム図

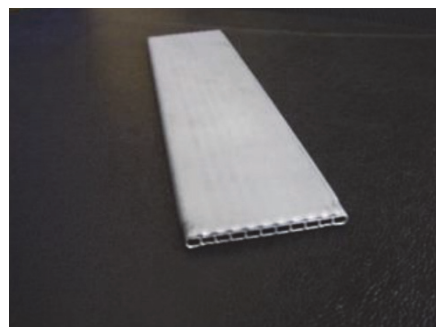
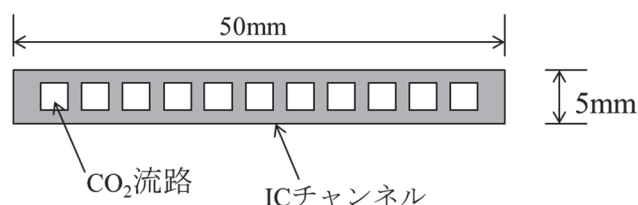


図-16 ICチャンネル

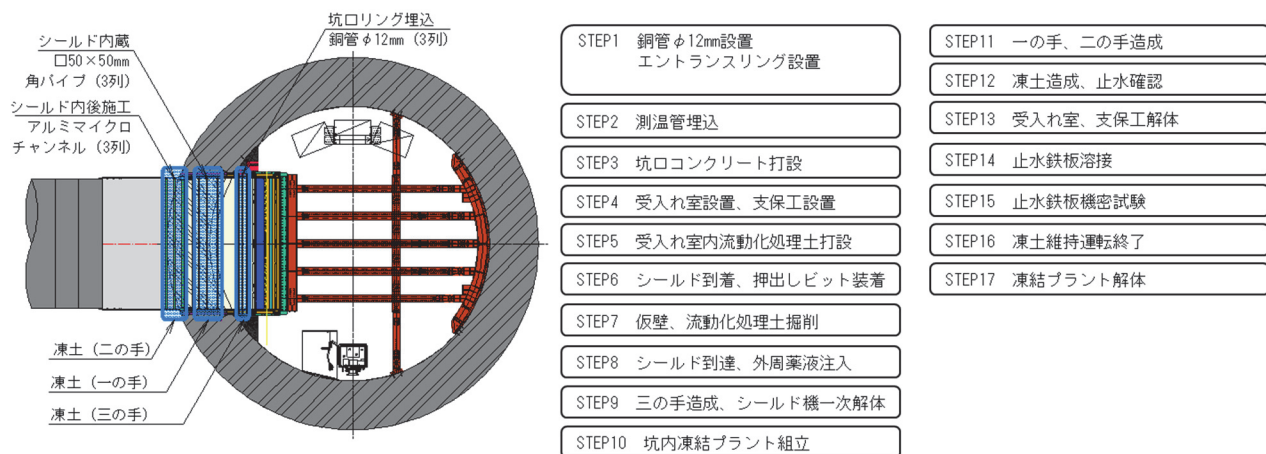


図-17 凍土造成配置と施工ステップ

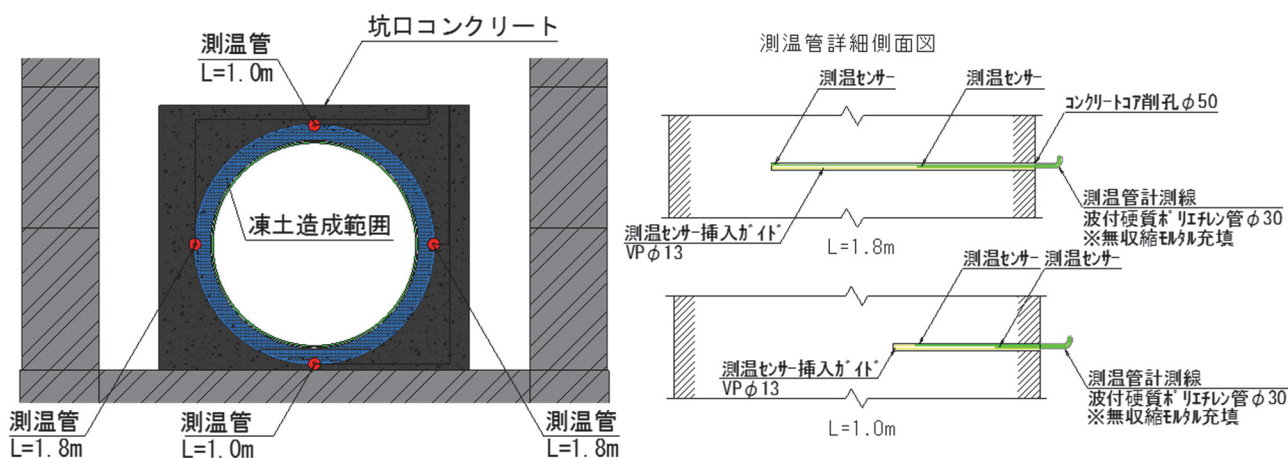


図-18 測温管取付位置および詳細図

去した後に凍結プラントを坑内に設置し、凍土を造成することとした。「三の手」は到達立坑地上部に凍結プラントを設置、また凍土造成の出来形を確認、管理する目的で図-18 のとおり測温管を配置し、シールド中央管理室に表示、記録を行うこととした。

また稼働中の下水道局施設がある中で凍土を造成することで、凍結膨張による凍上が起こり周辺施設に悪影響を及ぼす懸念があったが、凍土の造成範囲を到達立坑躯体内に限定したため影響は僅少であるものと考えられた。今回の凍土造成体積と同じ体積を地中で造成した場合、凍上量は直上で計算値 0.025mm であった。

5. 施工実績

(1) 押出しビットを用いた仮壁切削

到達立坑の手前にシールドが到着してから、24 基（ビット 55 個）の押出しビットを内蔵した油圧ジャッキを用いて押し出した。仮壁（厚さ 2.2m）の切削は延べ 65 時間で完了した。平均切削速度は 1.2mm/分であり、

ほぼ計画どおりの進捗で施工することができた。

押出しビットはジャッキの動作不良、仮壁切削時の押し戻しが懸念されていたが、エントランスフレームを解体後の確認で、全てのビットでロック機構が機能、装着ができていたことを確認した。また発進仮壁切削時に使用した仮壁切削用ビットは取付母材まで摩耗しており、その他のカッタービット、外周ビットもほぼ計画どおりの摩耗量であったことから、押出しビットの有効性が確認できた。

(2) 受入れ室の設置

受入れ室は設置後、内部に流動化処理土（目標 4 週一軸圧縮強度=500kN/mm²）を打設、受入れ室天端部の流動化処理土がブリージングした部分には無収縮モルタルを打設した。

シールド仮壁切削時に振動が発生し、受入れ室より漏水が発生する懸念があったが、仮壁、流動化処理土の掘削完了まで振動・漏水の発生も無くシールドを所定位置に停止させることができた。

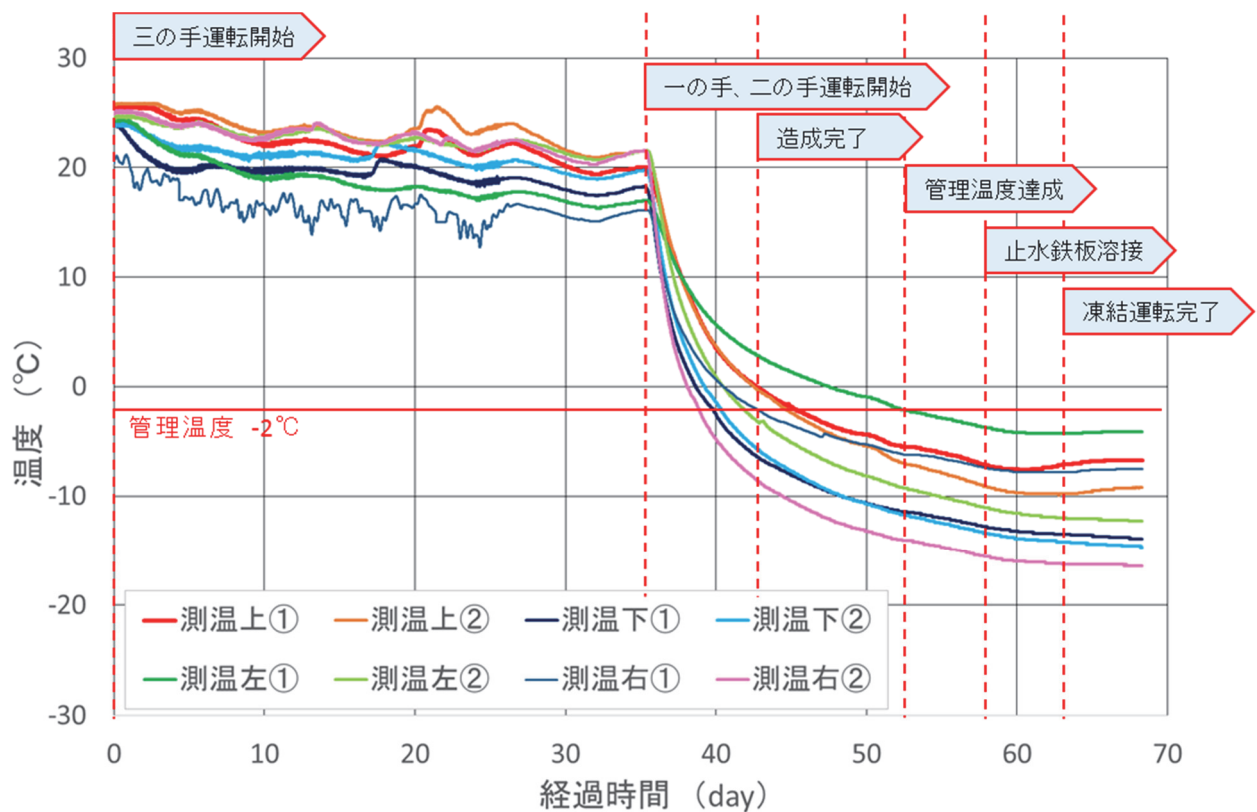


図-19 各作業及び測温データ

(3) シールド到達後の凍結工法

シールドを受入れ室内所定位置に停止させた後、シールド内に配置したバルブより薬液注入を実施し、一次止水を行った。しかし、シールド隔壁に取り付けたバルブと切羽水圧計により止水効果を確認したところ、切羽水圧の復水が見られた。懸念どおり薬液注入だけでは注入に不十分な箇所があったと思われ、止水ができなかった。

シールド内からの「一の手」、「二の手」の貼付凍結を行うため、シールドのジャッキ、中折れジャッキ、後続設備等を撤去する一次解体を行った後、冷凍機をメインとする凍結プラントを坑内に設置、凍結運転を実施した。「三の手」については坑内から凍結運転に先立ち、到達立坑上に凍結プラントを設置し、凍結運転を開始した。

各作業及び測温データを図-19に示す。坑内の凍結運転を開始から8日目で0°Cを下回り凍土造成を完了した。安全のため定めた施工管理温度-2°Cは16日目で下回り、バルクヘッドに取り付けたバルブと切羽水圧計により止水効果の確認をしてから、受入れ室の解体に着手した。

受入れ室の解体後、止水鉄板の溶接作業を実施した。懸念された溶接作業による入熱の影響が見られた部分もあったが、全ての範囲で施工管理温度-2°Cより温度上昇させることなく安全に作業を完了することができた。

6. まとめ

土かぶり 59m、水圧 0.65MPa、稼働中下水道局施設の近接施工という過酷な条件下で、複数の到達立坑工法を組み合わせることで出水等トラブル無く安全にシールドの到達を行うことができた。

押出しビットは、シールドの長距離化に伴うビット交換工法の一つの選択肢ともなり、今後の発展に期待ができる。

液化CO₂凍結工法は、本工事で2例目の実績であったが、冷凍機等のトラブルも無く予定どおりの凍土造成、維持管理運転を行うことができた。

凍結管のコンパクト化により従来工法では採用が難しかった条件下においても凍土造成が可能となり、凍結工法の適用範囲が拡大する。また自然冷媒を使用することから環境保全にも寄与できる工法であった。

シールドの到達はシールド工事の中で最後を締めくくる集大成となるが、その方法の検討はシールド製作前から綿密に計画する必要があり、想定される様々なリスクに備える必要がある。今回の実績報告が、これから更に複雑、かつ過酷な条件下での施工を求められるであろうシールド立坑到達の施工計画に参考になれば幸いである。

謝辞：本施工計画の策定にあたり，シールド立坑到達の検討について，東京都下水道局・萩原様・葛西様をはじめ，日本工営(株)，日本シビックコンサルタント(株)，押出しビットについて日立造船(株)，凍結工法についてケミカルグラウト(株)の皆様より御指導頂きました。ここに記し，深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会，トンネル工学委員会：トンネル標準示方書〔シールド工法〕・同解説，pp201-202，2016.
- 2) 日本トンネル技術協会：シールド施工管理のポイント—想定トラブルの原因と対策—，pp23-25，2002.
- 3) 吉田 輝，上本 勝広，吉川 正：凍着せん断強さの試験方法，第 38 回地盤工学研究発表会(秋田)，PP339-340，2003.
- 4) 相馬 啓，有泉 毅，塩屋 祐太：CO₂ 気液混合流体による地盤凍結工法の開発，トンネル工学報告集第 26 巻Ⅱ-10，pp.1-2，2016.
- 5) 畠田 大規，向井 昭弘，阿部 聡，塩屋 祐太：世界で初めて液化 CO₂ 凍結工法を海底シールド到達防護に採用，石狩湾新港発電所 1 号機放水トンネル，トンネルと地下 vol.49 No3，pp 55-63，2018
- 6) 長田 友里恵，相馬 啓，塩屋 祐太：地盤凍結工法における貼付凍結管の熱伝熱性について，2017(公社)日本氷雪学会 氷雪研究大会(2017・十日町)，pp258，2017.

(2019. 8. 9 受付)

Report of a safe and successful shield tunneling which used the freezing method and a receiving room together at great depths and under high water pressure

Toshio OKAZAKI, Masayuki MATSUURA, Jun SUGIYAMA
and Toshiyuki SUENAGA

In order for the shield machine to reach the arrival shaft, since various potential risks exist, including cases where the arrival shaft itself is inundated due to groundwater inflow from between the shield machine and the arrival shaft wall and cases where the surrounding ground collapses due to inflow of debris, it is necessary to adequately consider preventative measures for dealing with such events.

The segment of 2.3 km between the Morigasaki Water Reclamation Center and the intermediate starting shaft has been completed out of 8 km of the alignment connected with the connection duct having an inner diameter of 6,000 mm between the Shibaura Water Reclamation Center, which runs under the Tokyo Metropolitan Sewerage Bureau, and the Morigasaki Water Reclamation Center.

During construction, the project encountered extremely severe conditions including earth cover of 59 meters, water pressure of 0.65 MPa, and the sewage system just above the arrival shaft was in operation. To cope with these issues, we resorted to various approaches – construction of a temporary wall that the shield machine was able to cut directly, provision of a receiving room, and use of a freezing method with liquefied carbon dioxide. This paper reports how the shield machine was able to bore the ground efficiently and safely up to the arrival shaft.