

1. はじめに

東京都下水道局は、近年頻発する豪雨による浸水被害から都民を守るため、管渠やポンプ所の整備を進めている。港区赤坂、溜池地区、中央区銀座、築地地区では、既設管渠の流下能力が不足しており、浸水対策強化が急務となっている。また、これらの地区は、合流式下水道で整備され、一定量以上の降雨により、汚水混じりの雨水の一部が皇居内濠や築地川へ放流され閉鎖性水域の水質悪化の一因となっている。このような課題に対し、浸水被害を軽減し、閉鎖性水域への水質改善対策として放流先を隅田川へ変更するために、第二溜池幹線工事を計画した。

本稿は、第二溜池幹線工事の虎ノ門駅直下の大深度、高水圧下における凍結工法による管渠の地中接合において変形解析の実施および変位抑制対策について設計、施工事例の報告をするものである。

2. 工事概要

第二溜池幹線は、上流側（仕上り内径 6 500mm×延長 1 995m）および下流側（仕上り内径 8 000mm×延長 2 517m）からなる全長 4 512m の幹線であり、都心の幹線道路下、土被り約 40m の大深度に計画された。事業効果を早期実現するため、上流側の施工を先行させ、平成 13 年度から雨水を一時的に貯留する暫定貯留管（約 53 000 m³）として既に供用している。図-1 に路線全体図を示す。その際、シールド到達後にシールド設備を解体し、仮壁の設置を行ってシールド面板、外殻を残置した（図-2）。

本工事は、下流側区間の管渠を泥水式シールド工法で築造し、供用中の上流側区間と地中接合をするものである。

3. 大深度、高水圧下における地中接合

管渠の接合個所は、東京メトロ銀座線虎ノ門駅の直下にあり、立坑の構築が困難であることから、非開削で管接合を行った。また、虎ノ門駅の直下での

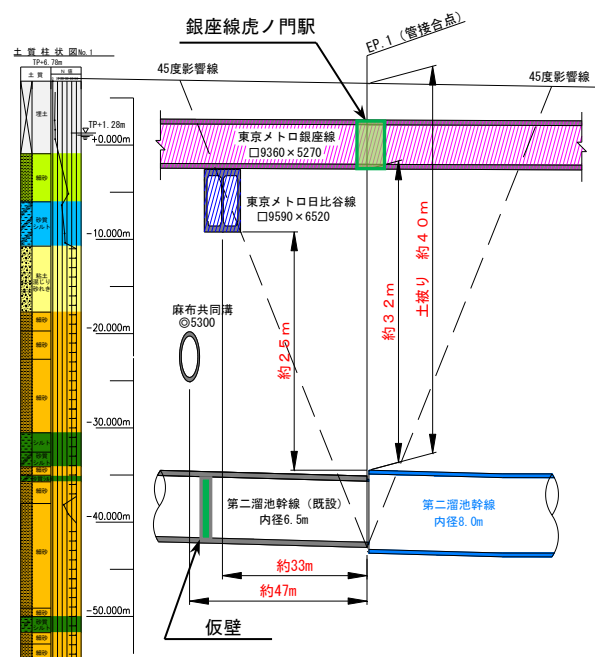


图-2 管接合部断面图

管接合となるため、施工による地盤への影響を東京メトロの定める管理値の ± 3.5 mm以内とする必要があった。そこで、土被り約 40m の大深度、地下水圧約 0.4MPa の高水圧下で行う管接合工事となることから、補助工法には、他の地盤改良工法と比較して施工実績も多く、改良体の強度、信頼性が高く、高い止水性が得られる凍結工法を採用した。

しかしながら、凍結工法はひとたび出水が生じると、それによって凍土の融解が拡大し、接合個所から大量の土砂と地下水の流入を管内に招く恐れがある。この場合、坑内の作業員が危険にさらされ、地下埋設物の沈下や道路の陥没を引き起こす可能性があり、不測の事態への対策が必要であった。また、発進立坑は、接合個所から約 2.5km 離れた勝どきポンプ所建設用地内に設置する必要がある、緊急時対応など、きわめて厳しい施工環境の工事であった。

4. 地中接合工事検討会の設置

凍結工法は、凍土が適切に維持されていれば非常に信頼性が高い工法であるが、地下水の坑内への出水という大きなリスクがあり、小さなトラブルが大規模なトラブルに発展する可能性があることが危惧される。そこで、工事の安全性を高めるため、「地

盤凍結工法による地中接合工事検討会」を設置した。検討会では、凍結工法の設計、施工の経験のある職員をメンバーにするとともに、過去の出水事例の事故原因を究明し、施工上の問題点を抽出した。

出水原因には、構造物の急激な変形に伴う凍土のはく離によるものと、凍土面の温度上昇による融解によるものがある。

そこで、①凍土のはく離を防止するため、シールドマシン内空の変位を限りなくゼロに近づけるための変形解析を行い、施工を実施する、②凍土の融解を防止するため温度管理を徹底する、③事故発生時の被害を最小限にすることを最重要課題とし、施工前および施工段階における検討、緊急時対策について各々実施した。

5. 施工前における検討

凍上、沈下変形の影響を最小限にするため、以下の事前検討を行った。

5-1 変形解析による凍結範囲の検討

凍結工法では、接合作業時のシールドマシンの変形により、凍土がシールド周面からはく離し、出水が始まると、流水に触れた凍土は急激に融解が進み、はく離が開口部まで達すると大規模な出水に至る。そこで、シールドのバルクヘッド解体に伴うシールドスキンプレートの変形解析を実施し、内空側への変形が想定される範囲は凍土で覆うこととした。解析の結果、①上流幹線側は剛性が高く、解析上、変位のないシールド部の撤去端部を不動点とし、そこから2500mmを凍着長とした。②下流幹線側は、解析上、変位のないシールドの中折れ部端部を不動点とし、そこから2500mmを凍着長とした。③下流幹線側凍着部の凍土厚は、貼付凍結管のみで造成可能な400mmとするが、恒久（耐久）グラウトを用いた補足注入により、地中の空隙を充填することで、地下水の侵入を防ぐこととした。④管接合部は、バルクヘッド解体時にシールド外胴のみでも土圧、水圧に対抗できるよう応力計算を行い、凍土厚を1950mmとする、最適な凍土造成範囲（図-3）を決定した。

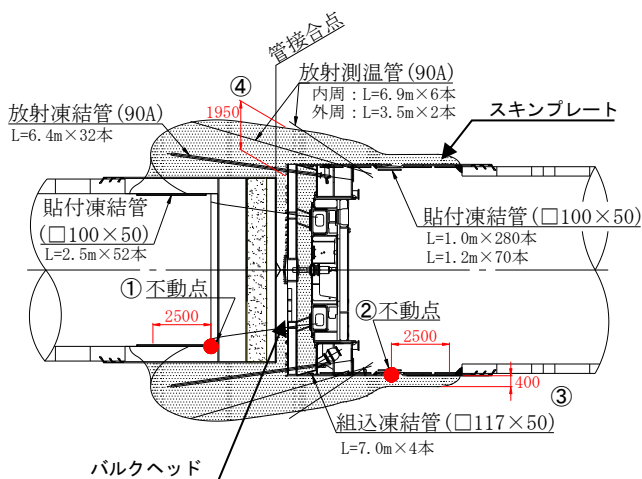


図-3 凍土造成範囲

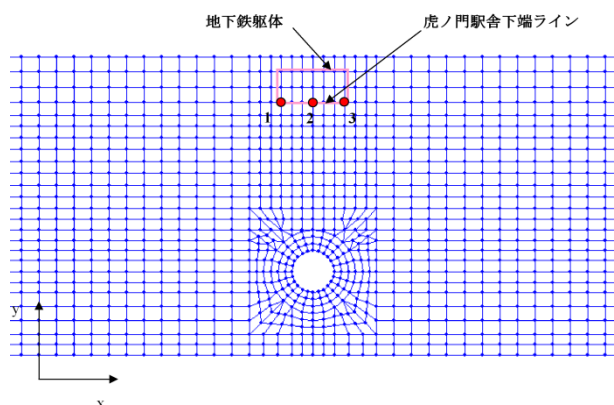


図-4 FEM 解析モデル

5-2 地中接合の施工時期の検討

地中接合時の台風、落雷等による突発的停電による地中温度上昇等のリスクを最小限とするため、地中接合の施工時期を冬季（平成25年12月30日から平成26年3月29日）とし、凍土造成の工程管理を行うこととした。

5-3 凍上、沈下の影響検討

本工事の接合箇所は、東京メトロ銀座線直下に位置するため、凍上沈下状況を常に把握するとともに、凍上沈下の予測を立てて計測管理をする必要があった。そこで、虎ノ門駅舎の凍上、沈下の影響について、シールド掘進時、造成時、解凍時のFEM解析を虎ノ門駅舎下端の3点について行った。解析の結果、鉛直変位が最大で±2.7mmとなり、東京メトロが定める管理値内（±3.5mm）となった。解析モデルを図-4に、結果を表-1に示す。

5-4 変形シミュレーションの実施および変位抑制

シールドのバルクヘッドはシールドのスキンプレーートを補強する機能があるため、これを解体するとシールドのスキンプレーートが変形する。そこで、バルクヘッド分割撤去時のシールドスキンプレーートの変形を最小限にし、凍土のはく離を抑制するため、バルクヘッド解体時の変形逐次解析および変位抑制対策を検討した。内空変位を限りなくゼロに近づけるために、鉛直支保工の設置による変位抑制を行い、また、搬出時の運搬や作業の効率性、経済性を踏まえ、解体を 18 分割して管頂部から小さなブロックずつ解体することで、凍土のはく離を抑制することとした。解析の結果、最小変位はブロック②、④で -0.1 mm 、最大変位はブロック⑩で 0.8 mm に抑えることができた（図-5）。

5-5 シールド解体時における熱影響解析

シールドのバルクヘッドを解体する際、多量の熱を発生するガス溶断を行うと凍土面の温度が急上昇する可能性がある。そこで、熱の発生が少ないウォールソーによる切断を採用することが考えられた。しかし、本工事では、溶断時のスキンプレーート周囲の凍土への温度解析をした結果、一個所の溶断時間を 60 分以内、溶断間隔を 180 分以上とするガス溶断サイクル（図-6）にすることで凍土融解を最小となる解析結果が得られ、施工性を考慮して、ガスによる溶断を採用した。なお、施工時には、ガス溶断による火花がシールド内部にあたることによってシールド外殻の温度上昇も考えられるため、シールド内面を不燃性の防熱材（グラスウール）で防護した。

6. 施工段階における検討

掘削は下流幹線側から行い、シールド内側の鋼材を切断、撤去しながら掘削した。施工実績について、以下に示す。

6-1 凍土造成

(1) 凍土造成、維持

必要凍土厚を確保するために、シールド内部から放射状に埋設する放射凍結管（ $L=6.4\text{m} \times 32\text{ 本}$ 90A）および各部内面に貼付凍結管を配置し凍土を造成した。凍土造成には、ブライン方式を採用し、ブラインと呼ばれる不

表-1 凍上・沈下解析値

施工段階		シールド工	凍結工	
		掘進完了時	造成完了時	解凍完了時
鉛直変位	最大値	-2.7mm	$+2.7\text{mm}$	-1.6mm
	累計値	-2.7mm	0.0mm	-1.6mm
解析方法		FEM	FEM	FEM

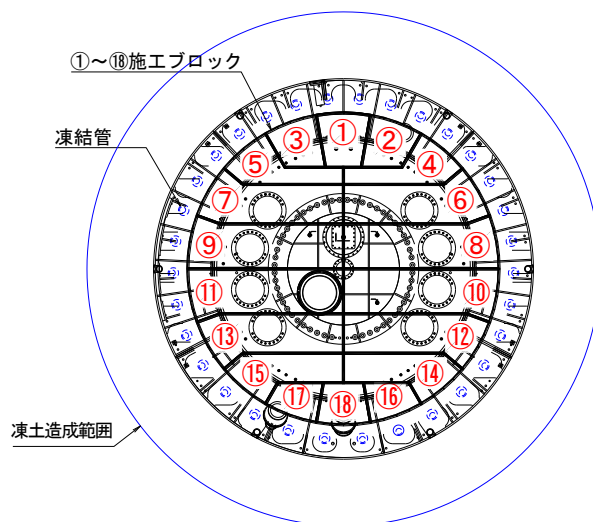


図-5 18分割解体断面図



図-6 ガス溶断サイクル



写真-1 管接合部凍土造成状況

凍液を循環させることで、凍土造成、維持を行った（写真-1）。

(2) 凍土管理

凍土の状態（凍土造成範囲、温度状況）やシールド周囲の止水状況を把握するため、地中およびシールド周囲に図-7のように6本の測温管を放射状に設置し、一本の測温管に5つの測点を設け、測点全30地点で凍土の品質を管理した。また、凍結設備の稼働状況を確認するために、専任の管理者が8時間ごとに設備点検、ブライン、冷却水の温度測定を行った。

凍土温度が -10.0°C 以下になると、設計強度を持った凍土が形成されたものとして、地中接合作業を開始するが、凍土の強度不足による掘削面の崩壊が起こらないよう、表-2のような温度管理基準を定め、凍結速度のチェックや凍土造成範囲の予測を行い、温度変化には細心の注意を払いながら凍土温度を管理した。

なお、凍土造成開始後148日でマシン解体を開始し、管接合に90日の期間を要した。必要以上の凍土造成を防止するため、管接合の間、1次管理値である -15.6°C を基準に管理し、凍土温度は -13.9°C から -17.8°C で推移した（図-8）。

6-2 凍上、沈下計測

本工事では、地中接合工事による東京メトロ銀座線の影響を監視するために、駅軌道階に沈下計を設置し、軌道の隆起と沈下を自動計測した。計測は、遠隔監視と管理値超過時に携帯電話に通知できるシステムを導入し、現場事務所で監視した。なお、凍土の解冻には強制解冻を採用し、空隙部に充填注入を行い沈下を抑制した。計測の結果、事前のFEM解析結果（表-1）よりも凍上、沈下の影響が少ない結果（表-3）が得られた。これは、凍結管の間欠運転および冷却液の温度調整を適切に行いながら、凍土の必要以上の成長を防止して隆起を抑制したことによるものと考えられる。

表-2 凍土温度管理基準

①凍土の厚さ（地中温度計測結果より得られる凍土厚）

LEVEL	状態	管理基準
1	注意段階	凍土厚 1.85m
2	警戒段階	凍土厚 1.70m
3	緊急事態	凍土厚 1.60m

②貼付凍結部の温度

LEVEL	状態	管理基準（T：貼付凍結部の温度）
1	注意段階	-8°C より高い
2	警戒段階	-5°C より高い
3	緊急事態	-2°C より高い

③凍着部の温度勾配（温度/日）

LEVEL	状態	管理基準
1	注意段階	$+1.0^{\circ}\text{C}/\text{day}$ を超過
2	警戒段階	$+2.0^{\circ}\text{C}/\text{day}$ を超過
3	緊急事態	$+3.0^{\circ}\text{C}/\text{day}$ を超過

警戒段階：作業を中断し、防熱措置実施、凍結運転強化して待機。

緊急事態：出水の恐れがあり作業継続不可能な状態。

各判断基準のいずれかがLEVEL 3に達した場合、緊急事態対応に移行する。

表-3 凍上、沈下計測値

施工段階		シールド工	凍結工	
		掘進完了時	造成完了時	解冻完了時
鉛直変位	最大値	-0.4mm	+2.4mm	-1.9mm
	累計値	-0.4mm	+2.0mm	+0.1mm

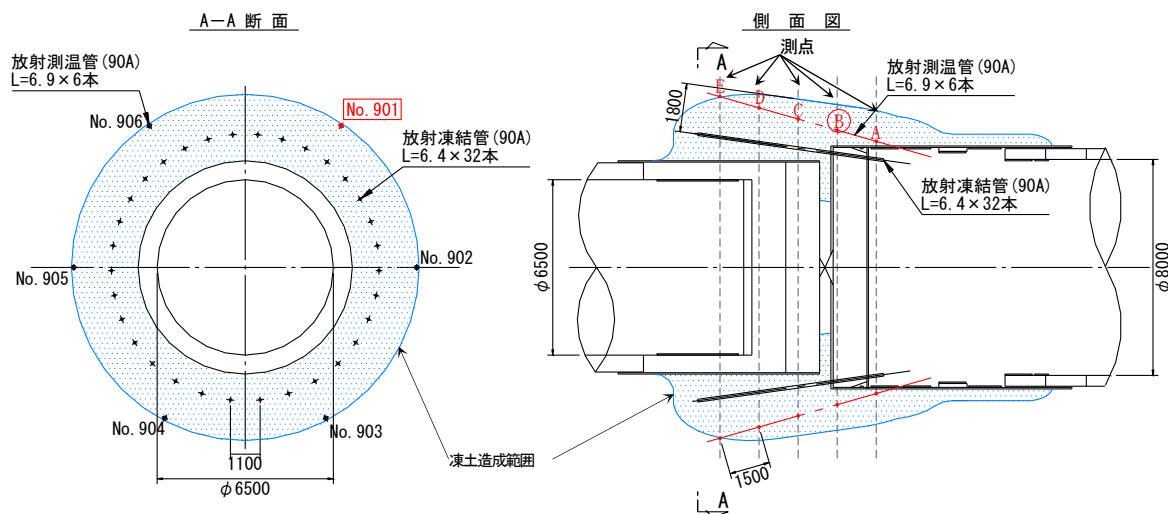


図-7 測温管断面図

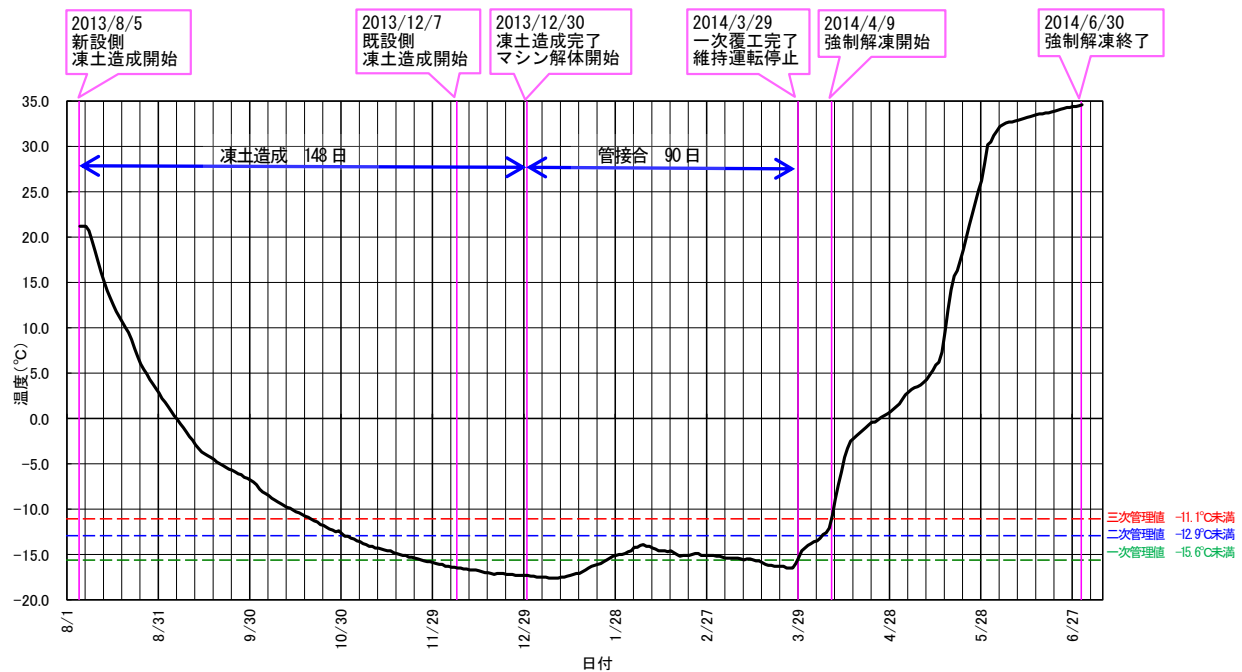


図-8 凍温度の時系列変化（測温管 901-B）

6-3 地中接合

(1) 仮設工

シールドのバルクヘッド解体に伴う開口部の急激な変形を抑制し、凍土がスキンプレートからはく離して出水する不測の事態に備えるため、鉛直支保工（上流幹線側 H400×400×2 本 下流幹線側 H498×428×2 本）をシールド内に設置し、開口部補強を行った（写真-2）。鉛直支保工は、①変形量大きい切羽側のバルクヘッドの直後に 2 箇所、②止水構造上重要である凍着部の変形を抑制するために凍土造成範囲の端部に 2 箇所、合計 4 箇所配置した（図-9）。

(2) 掘削工および止水工

バルクヘッド解体時の変形逐次解析をもとに、管頂から円周方向に 18 分割に区切って順次、掘削を行うこと



写真-2 下流側シールド鉛直支保工

でシールドの変形を最小限にし、凍土の融解とはく離を防止した。掘削は、下流側から、シールド内側の鋼材の切断、撤去と人力のはつりを繰返しながら掘削を進め、上流側に到達した個所から順次、止水鉄板を貼り付け、水みちが発生していないことを確認しながら施工を進めた。さらに、掘削および止水鉄板の設置を全周完了後すぐに鋼製セグメントを組み立て裏込め材を注入することで、確実な止水が可能となった（図-9）。

(3) 内空変位管理

施工中は、レーザー距離計でシールドの内空変位の変化を表-4 のような管理値を定め、常時計測した。鉛直支保工による変位抑制対策の結果、バルクヘッド解体時の鉛直方向の変位は-0.5 mm 以下、水平方向の変位は 0.25 mm 以下に抑えることができ、内空変位を限りなくゼロにすることができた（図-10）。

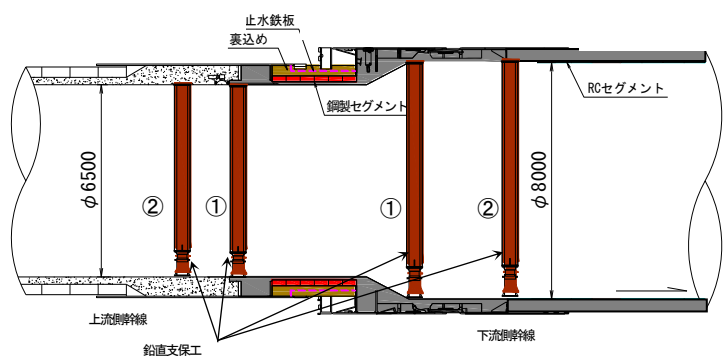


図-9 鉛直支保工設置位置、止水工詳細図

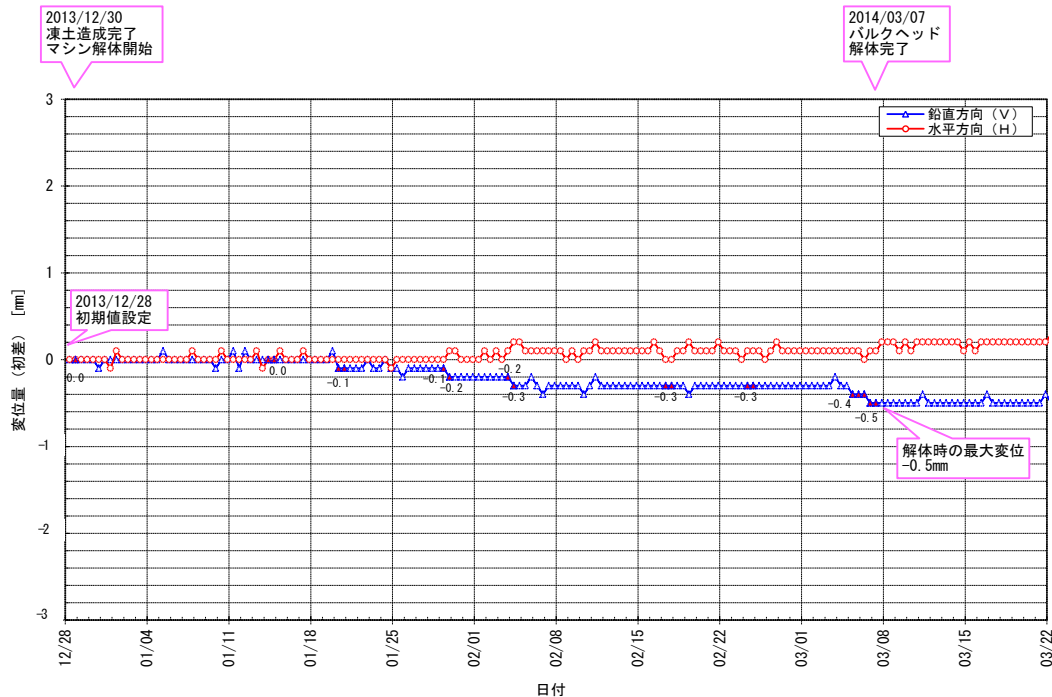


図-10 内空変位の計測結果

表-4 内空変位管理値

管理値	内空変位量 (mm/日)	対応
1次管理値	±3mm (2次管理値の80%)	シールド内での火気及び水の 使用禁止
2次管理値	±4mm (限界値の80%)	作業の一時中止 作業員は待機
限界値	±5mm (過去事例値)	作業の中止 作業員退避

7. 緊急時対策

本工事発進立坑は、前述のように、地中接合個所から約2.5km下流にある勝どきポンプ所建設用地内にあり、緊急時対応について、以下の対策を実施した(図-11)。

7-1 断水、停電時対策

凍結設備の故障などによる運転停止から復旧までにおいて、防熱措置を施すことによる凍土維持可能時間を解析し、その時間内に設備を復旧できるよう訓練を実施した。また、断水時にも凍結ブライン冷却水を供給できるよう、場内に清水槽(写真-3)を常備した。東京電力からの電力供給がストップした場合に備え、凍結プラントの稼働を維持できるよう、非常用電源(写真-4)を地上部に配備し、停電時に電源供給の切り替えを自動でできる受変電設備を常備した。

7-2 浸水対策

万が一出水による2次災害を防止するため、シールド内に地下水、土砂などの流入量を最小限に抑える目的で仮壁(写真-5)を3箇所設置した。また、仮壁内への流



写真-3 ⑤清水槽



写真-4 ⑥予備発電機



写真-5 ②仮壁

入水を抑え、構造物や地盤への影響を最小にするため、坑内に水を貯留し仮壁内への注水設備を常備した。さらに、仮壁の閉塞、注水方法等の緊急時防災訓練を繰り返し実施した。結果としては、重大事故や出水事故はなく、緊急時対策を活用することなく安全に地中接合を終えることができた。

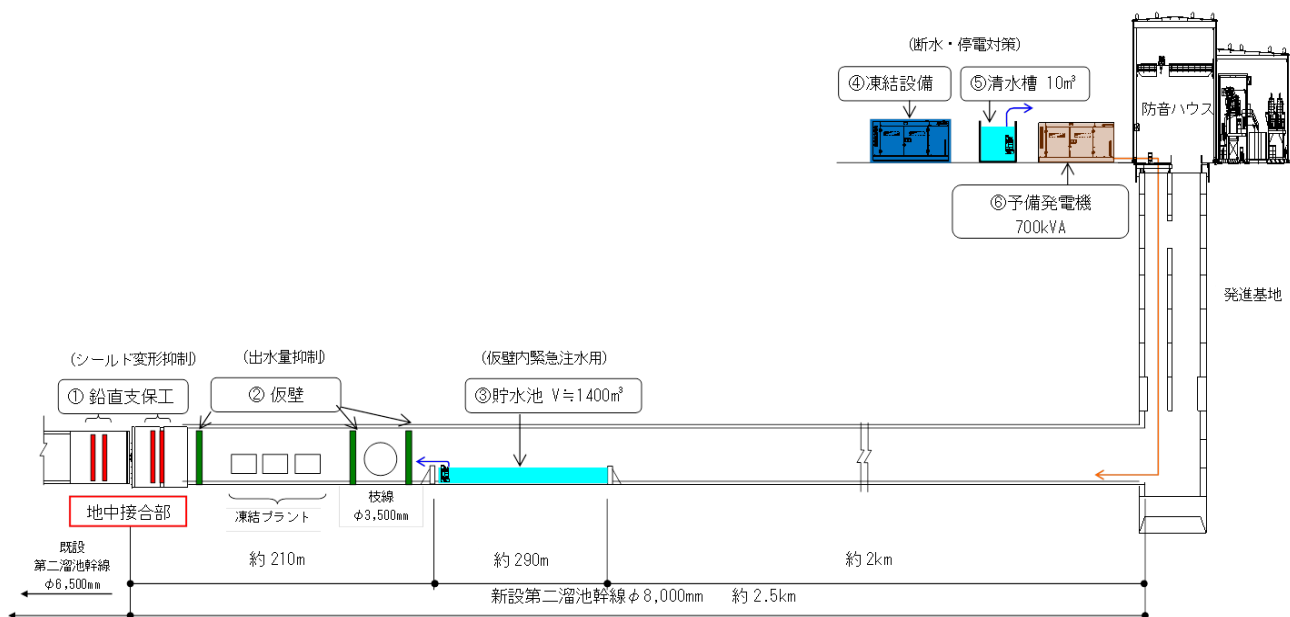


図-11 緊急設備模式図

8. おわりに

シールド工の接合箇所は、立坑を設置して接続することが基本である。しかし、都心部のような大都市エリアにおいては、立坑用地の確保が年々困難になっており、道路占用に伴う交通規制による交通環境の影響を考えると必ずしも立坑用地を確保できるとは限らない。

本地中接合工事は、虎ノ門駅という重要構造物の直下にあるとともに、地下埋設物も多数輻輳し、大深度、高水圧という厳しい施工環境であった。そのため、万一の場合、都市活動に大きな影響を与えることとなる。そこで、局内に検討会を設置して発注者、受注者の協力体制のもと、凍土の融解を防止し、凍上、沈下量を管理値以下に抑えることができた。また、鉛直支保工による変位抑制対策が有効に働き、シールドの内空変位が鉛直変位 -0.5 mm 以下、水平変位 0.25 mm 以下となり、変位を限りなくゼロに近づけることができた。

今後は、凍土造成範囲検討時に鉛直支保工の形状、数量を考慮することで、より安全に配慮した凍土造成ができると考えている。現在、強制解凍による凍土の解凍も完了し、平成 26 年 8 月現在、事後計測段階にあり、工事事も完了に向かっていているところである（写真-6）。今後も大都市において大深度、高水圧下における地中接合工事の増加が想定されるなか、本報告が参考になれば幸いである。



写真-6 地中接合部

参考文献

- 1) 泉谷信夫, 中村雄一郎, 滝沢究, 岩崎広幸, 凍結工法を活用し虎ノ門交差点直下で既設シールドと地中接合, トンネルと地下, Vol.42, No.9, pp47-53, 2011.9

(2014.9.15 受付)