

凍結工法による営業線直下のシールドトンネル 切掘げ工の計画と施工

THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE CUT AND OPEN SHIELD TUNNEL UNDER THE EXISTING RAILWAY WITH THE ARTIFICIAL SOIL FREEZING METHOD

兜 俊彦^{1*}・佐藤 賢一郎²・上野 修彦²・尾関 孝人³

Toshihiko Kabuto^{1*}, Kenichiro Satou², Nobuhiko Ueno², Takato Ozeki³

The project for continuous underpass and quadruple track were carried out simultaneously in about 2.2km of the distances between Yoyogi-uehara Station and Umegaoka Station. In the Shimo-Kitazawa station, the structural form is Two line two layer type that uses the shield tunneling with cut-and-open method. In the ventilation shaft section, taking into account the conditions of cut and open shield tunnel, the artificial soil freezing method is adopted as excavation between the two shield tunnels. In this thesis, the concept of the design and construction of the cut and open shield tunnel with the artificial soil freezing method, and the result of the measurement is described.

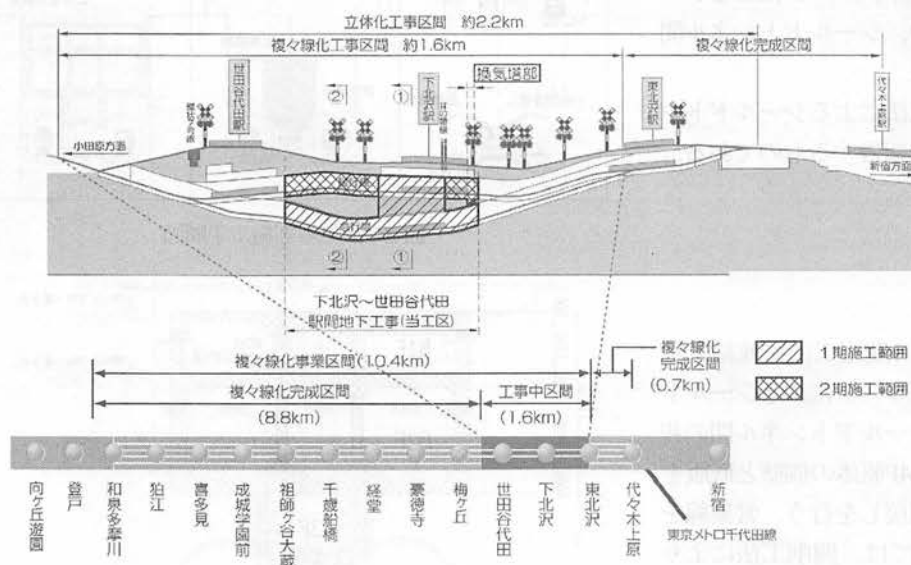
Key Words : the artificial soil freezing method, under the existing railway, cut and open shield tunnel

1. はじめに

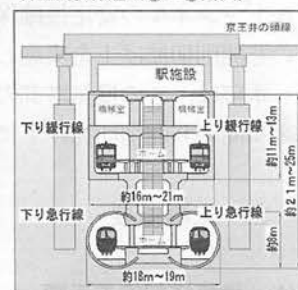
小田急線は新宿を起点とし、都心と神奈川県西部方面を結ぶ延長約120kmにわたる鉄道路線で、1日約194万人が利用する首都圏の重要路線である。そのため、最混雑区間である世田谷代田駅～下北沢駅間では、朝のラッシュ

時の混雑、さらに過密ダイヤによる列車速度の低下等、輸送改善が必要となっている。また、これに関係する踏切は長時間遮断するため、周辺道路は慢性的な交通渋滞が生じている。

これらの問題を解決するため、東京都と小田急電鉄は図-1に示すような連続立体交差事業と複々線化事業（4



下北沢駅付近 (①-①断面)



下北沢駅部以外 (②-②断面)

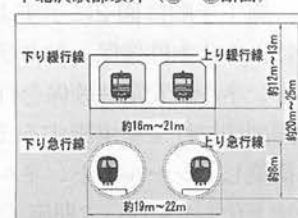


図-1 複々線化事業区間

キーワード：凍結工法，営業線直下，非開削，シールドトンネル切掘げ

¹非会員 小田急電鉄株式会社複々線建設部 下北沢工事事務所 Odakyu Electric Railway, Multiple Double Track Construction Department
E-mail: toshihiro.kabuto@odakyu-dentetsu.co.jp

²非会員 小田急電鉄株式会社複々線建設部 下北沢工事事務所 Odakyu Electric Railway, Multiple Double Track Construction Department

³正会員 大成建設株式会社東京支店 小田急下北沢作業所 Taisei Corporation, Tokyo Office

線化)を代々木上原駅～和泉多摩川駅間において一体的に進めており、現在は代々木上原駅～梅ヶ丘駅間の2.2kmの地下化工事が行われている。このうち下北沢～世田谷代田区間における地下化工事は、図-1に示すとおりシールド工法と開削工法により2線2層構造のトンネルを1期施工、2期施工に区分して施工する。

1期施工では、シールドマシンにより現在営業中の小田急小田原線の直下を掘り進み、シールドトンネルを2本築造する。同時に下北沢駅部については軌道の仮受けを行い、その直下を掘削しシールドトンネルを切抜けて、地下の駅構造物となる上部ボックスカルバートを構築する。工事完了後、既設路線を下部シールドトンネル内に切り替え、地下化を行う。

2期施工では、下北沢駅を中心にした残りの約470m区間を地上から開削工法により、シールドトンネル直上を低土被りで掘削し、ボックスカルバートを構築する。完成後は、この上部ボックスカルバートを緩行線が、下部シールドトンネルを急行線が運行することとなる。

これらの区間のうち、下北沢駅から新宿側に位置する換気塔部(施工区間:約16m)は、1期施工において地上に営業線があることに加えて、既存の橋上駅舎が直上に位置するため、開削工法による上部ボックスカルバートの構築およびシールドトンネル間の切抜けができない。また2期施工においてシールドトンネル間の切抜けを行うことは、営業線間の切抜けとなり、かつ支保工の設置もできないため列車運行に支障を及ぼすおそれがある。

上記の理由により、換気塔部については1期施工中に凍結工法による止水性の確保、パイプルーフによるシールドトンネルの安定性確保を行い、シールドトンネル間の非開削切抜け工を実施した。

本稿は、この換気塔部の凍結工法によるシールドトンネル間の非開削切抜け工について報告するものである。

2. 工事概要

(1) 換気塔部施工手順

施工手順は図-2に示すように、1期施工にて凍結工法による止水性確保、およびパイプルーフによるシールドトンネルの安定性確保を行い、シールドトンネル間の非開削切抜け工を実施する。その後B4F躯体の側壁と底版を構築し、シールドトンネル間の埋戻しを行う。営業線を地下化したのち、2期施工においては、開削工法によりB4F頂版から上部の躯体を構築する順序となる。1期施工時は地上で、2期施工時はシールドトンネル内で、それぞれ営業線を運行しつつ施工を行うため、営業線の運行に支障のないよう安全性を確保する必要がある。なお、凍結工、および非開削切抜け工の詳細な施工ステップは後述する。

(2) 換気塔部構造概要

換気塔部は、施工区間が約16mであり、急行線階(B4F)からB1Fまでダクトスペースを確保するために、B4Fの壁とB3F～B1Fの床版に開口部を設ける構造となる。図-3に構造概要を示す。非開削工法を行うシールドトンネル間切抜け部は、土かぶり約14mのB4Fであり、堅固な細砂層(N値50以上)に位置している。しかし、この層には介在砂層が存在し、地下水の流れがある懸念があった。そのため、シールドトンネル間を切り抜けるにあたっては、止水性の確保が重要な課題であった。

(3) 凍結工法の選定理由

換気塔部は、安全で確実な非開削によるシールドトンネル間の切抜け工を行うため、この区間の止水性および強度を確保する必要がある。そのような条件のもとで施工を行うためには、図-4に示すような工法が考えられる。

ここで、薬液注入工法については適用地盤がN値<50程度の砂質土であること、切抜け施工時にセグメントの変形により改良体とセグメントとの縁が切れ、止水性の確保が困難となることから、本工事には不相当であると

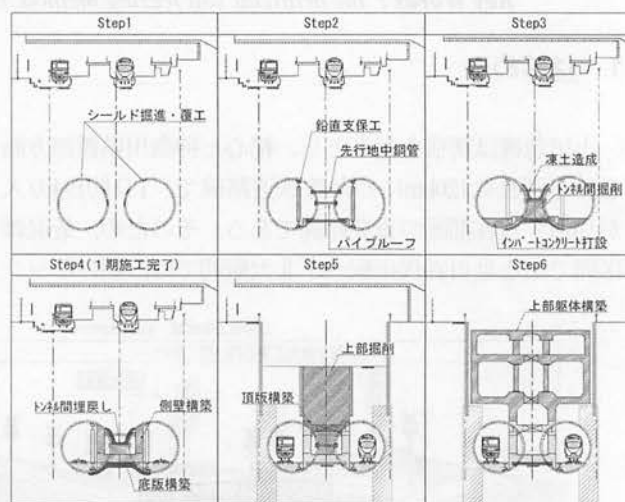


図-2 換気塔部施工手順図

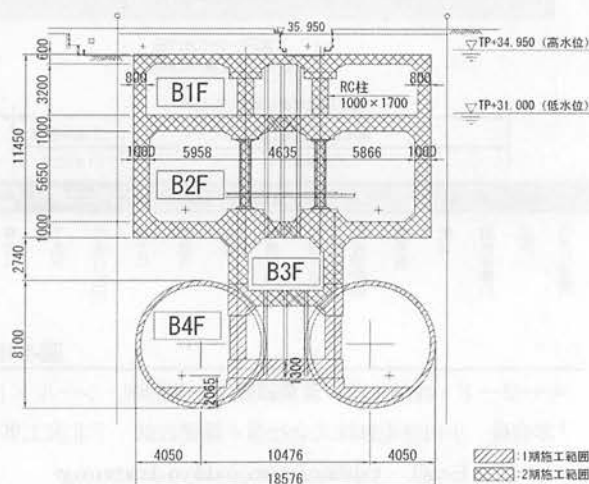


図-3 換気塔部構造概要図

判断した。

一方で、凍結工法は凍上・沈下等の懸念はあるものの、土質に関わらず均一に凍土の造成が可能であること、凍土の造成範囲の確認が可能であり完全に止水性を確保できることから、止水性の確保が課題であった本工事に対してはもっともリスクの小さい工法であると判断し採用した。

3. 施工計画

(1) 仮設構造

非開削工法によるシールドトンネル間切掘げ時には、シールドトンネル間の土が掘削されることにより、トンネル同士が掘削側に変位することが予想される。このようなトンネル同士の掘削側への変位抑止を目的として、シールドトンネル間に先行地中鋼管およびパイプルーフを設置する。また、シールドトンネル内には掘削に伴う変形防止のため、鉛直支保工を設置する。上記の仮設構造物を設置したのち凍土造成を開始することとした。こ

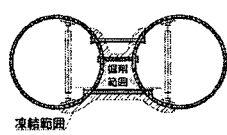
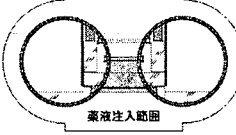
項目	凍結工法案	薬液注入(低圧浸透注入)工法案
概略図		
工法の概要	凍結管を坑内よりボーリングして埋設し、冷却されたブラインを各凍結管に循環して、所定の凍土壁を造成。	注入孔の中をインナーロードで削孔し、ロングゲルを注入。
適用地盤	砂質土 粘性土	特になし
特徴	完全止水ができる透水壁である。 土質にかかわらず均一改良できる。 壁体と密着し完全止水が得られる。 改良範囲や強度の確認が確実に見える。	砂質土に対する改良効果は高い。 N値、土質によって改良にむらがあり、特に粘性土や硬層の場合、効果が得にくい。 改良範囲が大きい。
今回適用について	対象土質はすべて対応するため、適用可能。 切広げ施工時におけるセグメント変形後も完全止水が出来る。	対象土質は、N>50のため適用不可能。 切広げ施工時におけるセグメント変形後に縁が切れ、止水確保出来ない。
評価	○	△

図4 シールドトンネル間非開削切掘げ工法比較

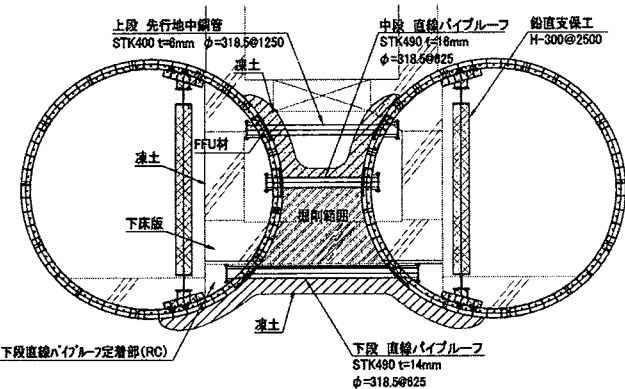


図5 換気塔部仮設構造概要図

の換気塔部の仮設構造概要図を図-5に示す。

1期施工時においては、中段・下段パイプルーフ間を掘削し、B4F底版と側壁を構築したのち鉛直支保工を撤去する。また2期施工時においては、B4F頂版を構築したのち、上段の先行地中鋼管と中段の直線パイプルーフを撤去する。

(2) 凍結工

凍土厚の設定にあたっては、0.625m間隔で配列されたパイプルーフが土水圧などの荷重を受け持つものとし、凍土は止水性の確保のみを目的とする構造とした。したがって、凍土に対してはせん断に対してのみ照査を実施し、必要凍土厚は0.5mと設定した。

一方で、凍土厚が厚い場合は、シールドトンネルに作用する凍結膨張圧が大きくなり、シールドトンネルの断面力が増大してしまう。そのため、シールドセグメントの健全性に影響を与えない凍土厚の上限値として1.0mを設定した。

なお、凍結工の影響により下床版コンクリートの温度が5℃を下回った場合、打設コンクリートが凍害の影響を受けるおそれがあったことから、打設時のコンクリート温度が5～20℃となるよう打設箇所下部に防熱材及びヒーター(配置間隔：0.5m)を埋設することとした。図-6に凍土部断面図を示す。

(3) 想定されるリスクおよび対策

本工事の凍結工および非開削工において、想定されるリスクおよびその対策を図-7に示す。

a) 凍土の融解

凍土の融解により止水性が損なわれ、地下水の流入が生じる事象が懸念される。このようなトラブルを防止するため、凍土の温度管理を確実に行うことが重要となる。

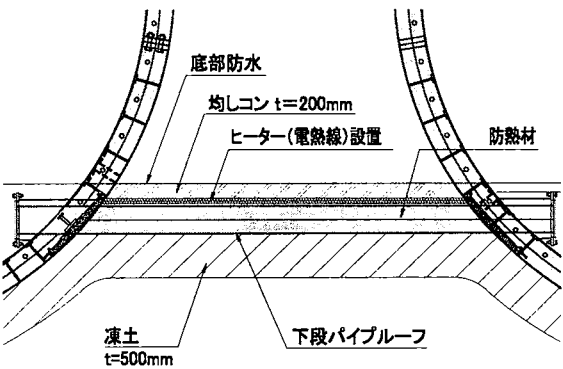


図6 必要凍土厚および凍土部断面図

本工事では、必要凍土厚0.5mを確実に確保できるよう、温度上昇が確認された場合は、防熱の強化・ブライン（冷却された塩化カルシウム溶液）の循環管理の調整を行うこととした。更に温度上昇する場合は、緊急時の対策として、作業の中止・防熱の再強化・貼付凍結管の増設を行うこととした。

b) 凍土造成に伴う凍上・沈下

凍上・沈下については、営業線が直上に位置するため、最も懸念される事象のひとつである。地盤の凍結を行った場合、地盤中に20 μ 以下の微粒成分を含むときは、凍結膨張及び解凍収縮が起こる事は避け難い¹⁾。これにより地表面の上昇・沈下が生じ、地表面・埋設物・付近の構造物等に影響を与えることになる。

本工事における凍結対象地盤は粘土・シルト分を含む細砂層であり、過去の実績およびサンプリングした試料を用いた室内試験に基づき、この土層の凍上率・沈下率を設定し解析を実施した。その結果、地表面の上昇変位及び沈下変位は2mmと算定され、軌道の管理値 ± 8 mm以下であることが確認された。また、施工においては毎日軌道、および周辺構造物のレベル計測を実施し、管理値以下であるかの確認を行った。

c) 打設コンクリートの凍害

凍結工の影響により、凍土上部に構築する下床版コンクリートの温度が5℃を下回り、打設コンクリートが凍害の影響を受けるおそれがあった。そのため、打設コンクリート下部に防熱シート、およびヒーターを埋設し、凍害を防止する対策を実施した。一方で、ヒーターの影響により、凍土が解凍され必要凍土厚が確保できない

懸念もあった。このようなトラブルを防止するため、打設コンクリートおよび凍土の温度管理を確実に実施しながら、施工を行った。

d) セグメント・支保工断面力の増加

凍土厚が大きいことによる凍結膨張圧の増加、および土質条件等の設計時の条件との差異により、セグメント・支保工断面力が大きくなり、構造部材の健全性に影響を及ぼす懸念があった。そのため、凍土厚が1.0m以内に収まるよう凍土の温度管理を行い、凍結膨張圧が設計時の想定を超えないよう管理を実施した。また、セグメント・支保工についてはひずみ計測を行い、施工ステップ毎に計測値と設計値を比較し、次の施工ステップ時の挙動を評価しながら施工を進めていった。

4. 施工概要

凍土壁は、図-8に示すような予め設置されたパイプルーフ（外径 $\phi 318$ mm）内に挿入した凍結管および、切抜き区間両側部へ埋設された水平凍結管によって造成する。

施工ステップ図を図-9に示す。まず、パイプルーフ内凍結管は、パイプルーフ設置完了後に挿入し、挿入完了後にパイプルーフ内に充填材を注入した（STEP1、写真-1、写真-2参照）。貼付凍結管は、アングルピースをセグメントに溶接し、アングルピースと貼付凍結管を溶接し設置した（STEP2、写真-3参照）。上記の作業と併行して凍結基地仮設、凍結設備、ブライン配管、防熱及び計測配線等を行い、凍結運転準備を進めた。（写真-4、写真-5参照）。

上記仮設工事完了後、凍結設備で冷却されたブライン（塩化カルシウム溶液）を各凍結管に循環し、下り線側、上り線側の順に約1.5ヶ月の運転期間で所定の凍土壁を造成した（STEP3参照）。凍土造成及び維持運転期間中は、管理室内のモニターで地中温度を集中監視し、凍結

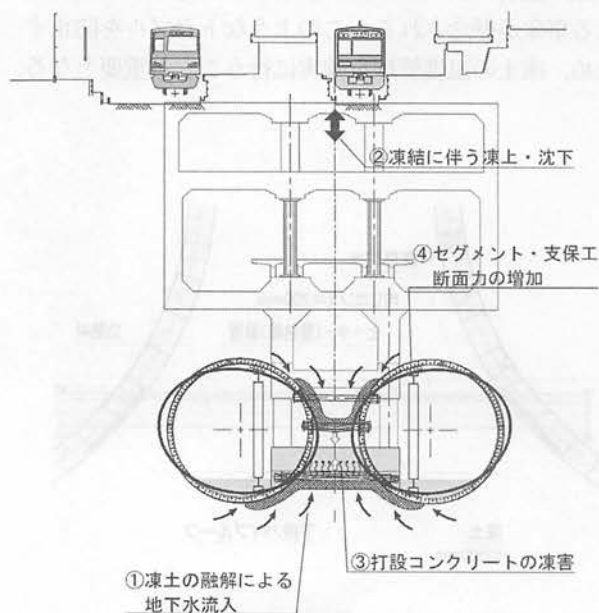


図-7 想定されるリスク

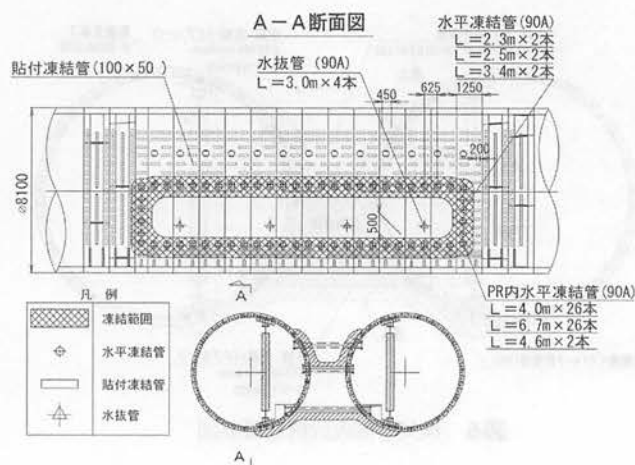


図-8 凍結管の配置

設備の運転管理および冷却ラインの循環管理を行った。

凍土予想による所定の凍土壁造成を確認後、シールドトンネル間の切詰め作業を開始し（STEP4、写真-6参照）、シールドトンネル間掘削・コンクリート打設を実施（STEP5参照）した。埋戻し・スキンプレート復旧完了後（STEP6参照）、凍結設備の運転を停止し、凍結設

備の撤去を行った。

凍結運転停止後、凍結管・測温管は管内に充填材を中詰めして頭部を切断撤去後、口元に鉄板を溶接した。また、ライン配管・防熱材などの撤去を行い、凍結工を完了した。

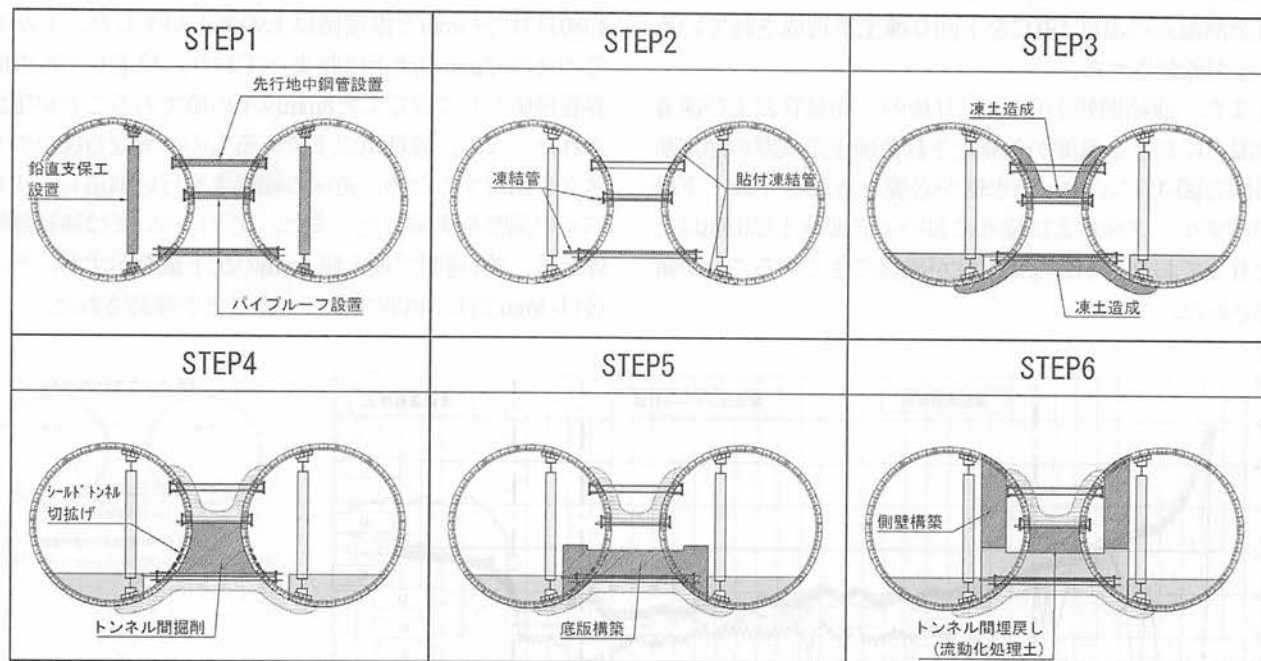


図-9 施工ステップ図

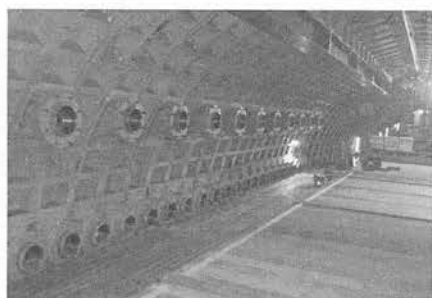


写真-1 パイプルーフ設置状況

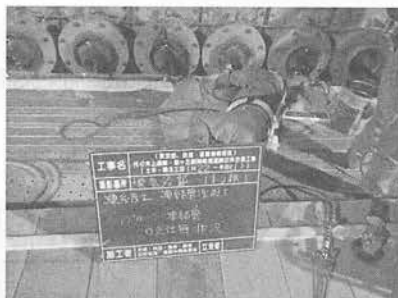


写真-2 パイプルーフ内凍結管



写真-3 貼付凍結管設置状況

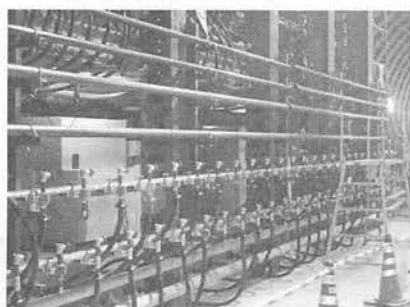


写真-4 ブライン配管状況

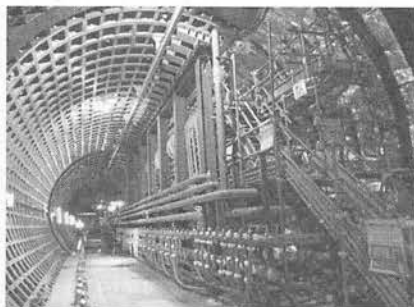


写真-5 凍結設備全景



写真-6 シールドトンネル間掘削状況

5. 計測結果

(1) 凍土造成状況

凍土温度についての測温点は計121点（測温管65点、凍着44点、その他12点）として温度管理を行った。図-10に、凍結区間中央部下段に配置された測温管中の6測点から得られた地中温度推移グラフを示す。まず凍結運転を開始した下り線側から温度が低下し、約1ヶ月後には全測温点の温度が0℃を下回り凍土が造成されていることが確認された。

また、凍結開始から約1ヶ月後の、測温管および凍着測温点における温度から算定された凍土造成厚の想定断面図を図-11に示す。止水性が必要とされる中段・下段パイプルーフ部および棲部において必要凍土厚0.5m以上を有しており、十分な止水性が確保できていることが確認された。

(2) 凍上・沈下状況

凍上・沈下に対する計測は、凍結区間直上に位置する橋上駅舎柱、駅ホーム、軌道レール、坑内インバート位置において、レベル測量を凍結運転期間中毎日実施した。図-12に、軌道レールレベルでの計測位置図および凍上・沈下のレベル計測結果を示す。施工実施前の算定結果では最大+2mmの凍上が予想されたが、軌道レールレベルでの計測結果は凍結運転開始後、約60日目で+2mm、約80日目で+3mmと推定値以上の凍上が生じた。しかし、その後は+3mmで凍上は収まっており、軌道レベルの限界管理値として設定した8mm以下の値であることが確認された。なお、管理値以下であるものの更なる凍上のリスクを回避するため、道床の総搗きを行い軌道レベルの調整を実施した。また、沈下については凍結運転停止後、約1週間で最大値-3mmの沈下量を示すが、その後は-3mmで沈下は収まっていることが確認された。

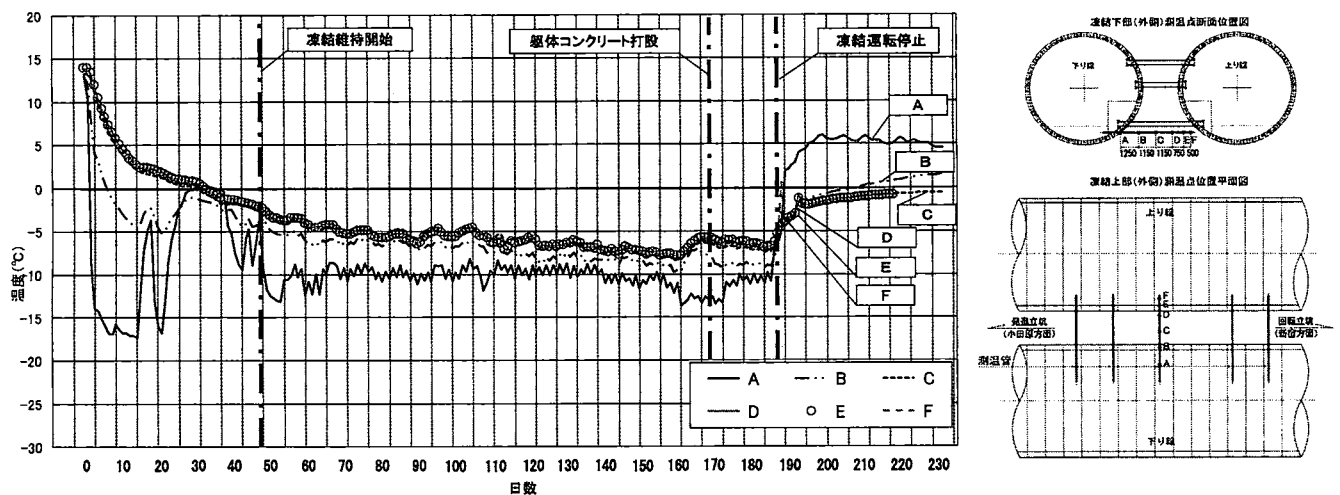


図-10 地中温度推移グラフ（凍結区間中央部，下段）

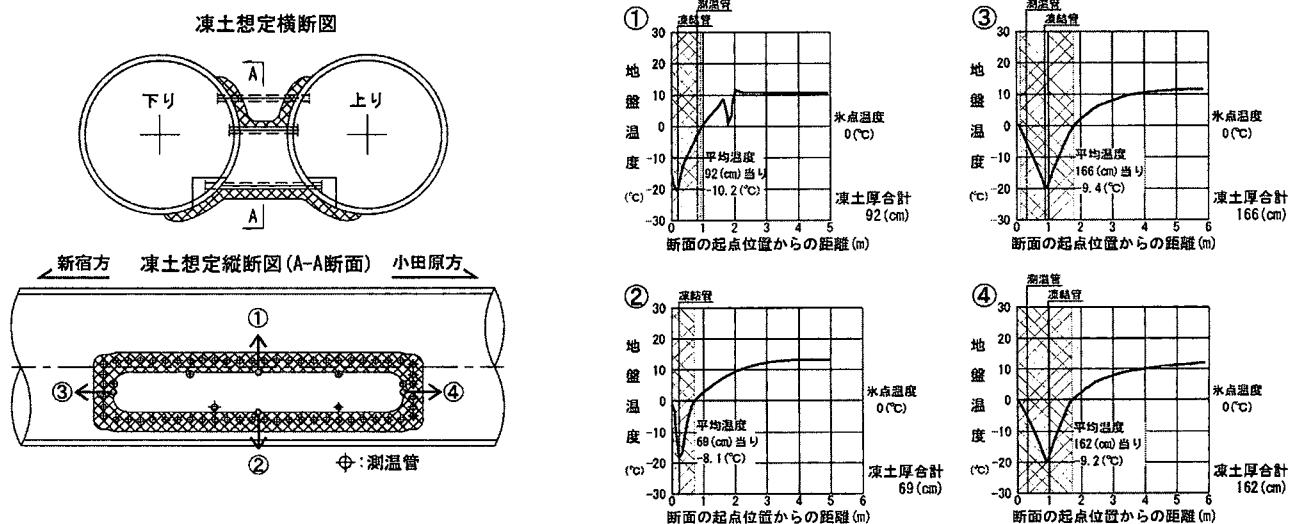


図-11 凍土造成状況想定図

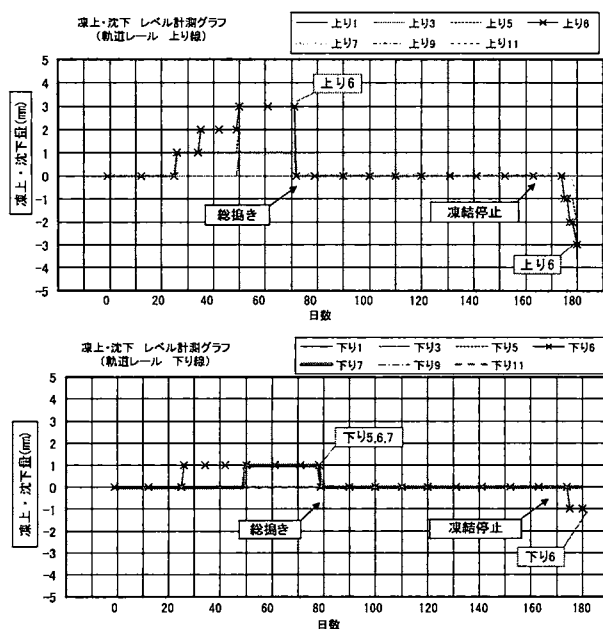
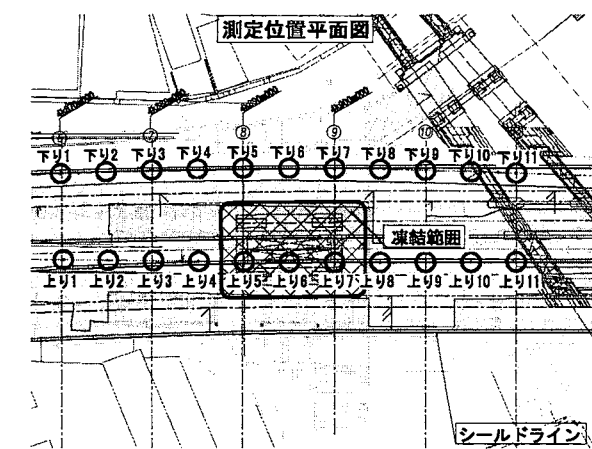
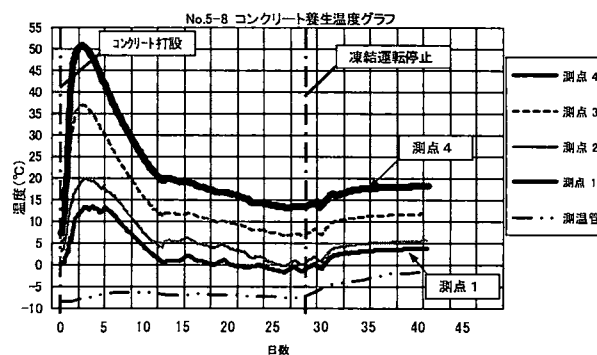


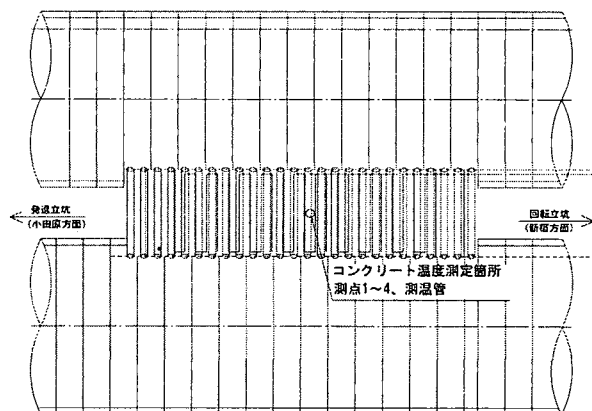
図-12 凍上・沈下状況

(3) コンクリート温度

図-13に下床版コンクリートの養生温度経時変化グラフを示す。下床版コンクリートの温度は5℃以上を維持し、凍害の影響を受けることなく養生されていることが確認された。また、凍土中の測温管温度は下床版コンクリートの打設の影響をあまり受けず、凍結運転停止まで-5℃以下のほぼ一定値となっていることが分かる。これらのことから、今回工事において凍土に対し、コンクリート打設・ヒーター線等の影響は小さく、凍土の温度管理を確実に行うことができたことが分かる。一方で下床版コンクリートに対しても、凍土の影響は小さく、凍害の影響を受けることなく下床版コンクリート構築を行うことができたと考えられる。



ヒーター線及び測温素子設置位置図 (Heater Line and Temperature Sensor Installation Position Diagram)



底部断面 詳細図 (Bottom Section Detailed Diagram)

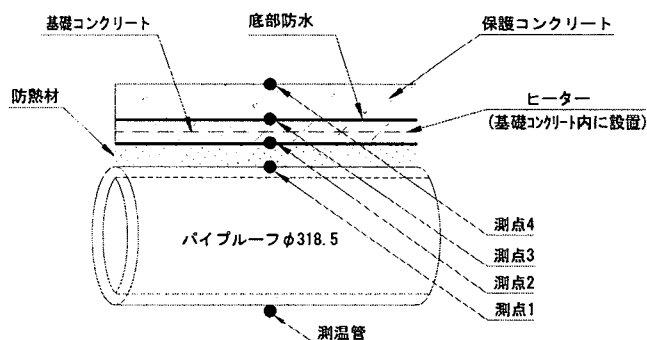


図-13 コンクリート温度

(4) セグメント・支保工断面力

図-14、図-15にセグメントおよび支保工（鉛直支保工、パイプルー、先行地中鋼管）の断面力について、設計値と計測値を比較したものを示す。なお、ここでは代表的な施工ステップとして、トンネル間掘削時、および躯体構築・埋戻し・凍結融解時点の施工ステップのものを示している。

まず、セグメントの断面力については、設計値と比較して計測値は、トンネル間掘削と反対側において、局所的に断面力が大きくなっている。これは、インバートコンクリート端部で生じており、セグメント剛性の急変部に位置していることや、シールドトンネル間の狭溢な部分での凍結であったため、設計時の想定よりも大きい凍結膨張圧が作用したことが原因である可能性がある。こ

のように断面力は局所的に大きくなっているものの、応力度としては許容応力度の7割以内に収まっており、セグメントの健全性に影響ないことは確認されている。また、曲げモーメント・軸力ともに、凍結融解に伴いピーク値は減少しており、凍結膨張圧の除荷により安定化していることが分かる。

また、支保工については、計測値は設計値とほぼ同等の値を示している。また、セグメントと同様に、凍結融解に伴い支保工に生じていた引張力は減少していることが分かる。

6. まとめ

本工事は営業線直下において、シールドトンネル間の切掘りを凍結工法により施工したものである。凍結運転開始後、凍土造成・シールドトンネル間掘削等の作業を経て、凍結運転停止までの間大きなトラブル・工程遅延もなく、無事に施工を完了した。本工事の施工結果について以下にまとめる。

・凍土の融解などのリスクに対して、凍土の温度管理を確実にし、漏水等のトラブルもなく止水性を確保しつ

つシールドトンネル間の切掘り作業を完了することができた。

・凍上・沈下量については、当初予想された解析値と同程度であり、営業線に影響を与えることなく施工を完了した。

・打設コンクリートへの凍害についても、確実に計測管理を行い、凍害を生じさせることなく施工を実施した。

・セグメント、支保工断面力について、計測値と設計値との比較を行いながら、施工を進めていった。設計値との差異はあったものの、計測値は許容応力度以内であることを確認した。このような情報化施工により、セグメントの健全性を確保しつつ、施工を進めていくことができた。

今後は2期施工において、上部掘削、ボックスカルバート構築、およびシールドトンネルとの接続等の換気塔部躯体の構築を行う予定であり、計測管理等を引き続き行いながら安全に施工を進めていく必要がある。

参考文献

1) 日本建設機械化協会：地盤凍結工法—計画・設計から施工まで—、1982.2

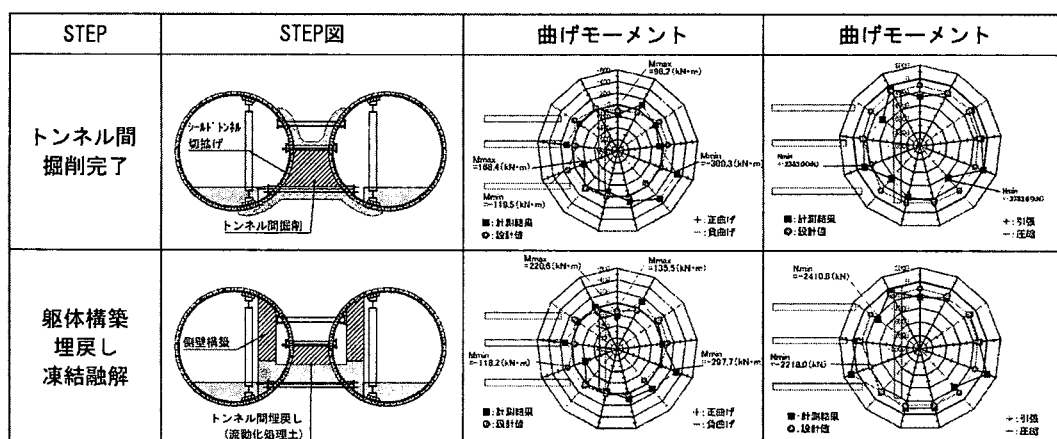


図-14 セグメント断面力

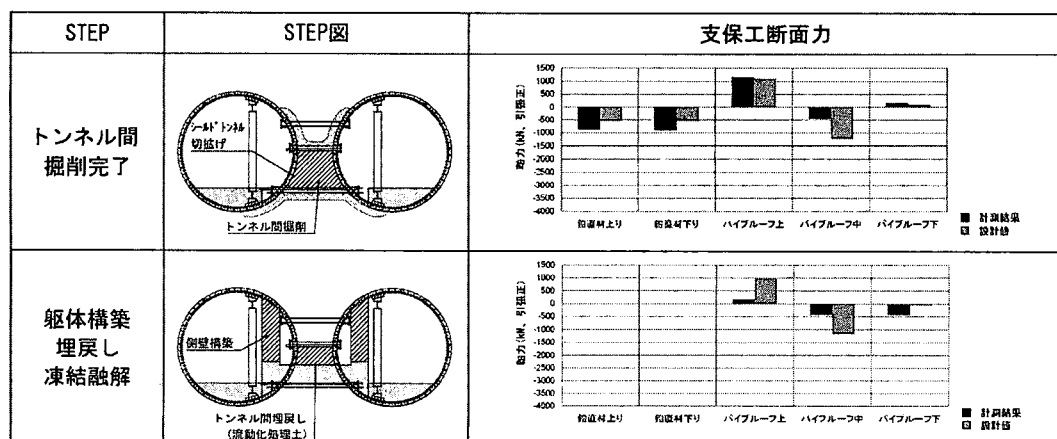


図-15 支保工断面力