

大断面シールドにおける凍結工法を用いた切開き接続工事の計画と施工

並川 賢治¹・松田 満¹・石原 陽介²・
中山 正夫³・松原 健太³・伊藤 信次³

¹正会員 首都高速道路(株)東京建設局設計第一グループ(〒160-0023 東京都新宿区西新宿6-6-2)

²正会員 首都高速道路(株)東京建設局池袋工事グループ(〒171-0021 東京都豊島区西池袋5-13-13)

³正会員 (株)大林組 首都高池袋南JV工事事務所(〒171-0021 東京都豊島区西池袋5-22-19)

本工事は、泥土圧シールドとしては世界最大径となる掘削外径 12.02mのシールド機により首都高速中央環状新宿線の高速道路トンネル(外回り)を築造するものである。本工事では、シールド到達後に外回りトンネルと内回りトンネルを結ぶ連絡坑を構築した。連絡坑の構築は、トンネル坑内よりセグメントを切開いて行い、地下水位以下での施工であったため凍結工法により地盤の自立及び止水性を確保して行った。本報文では、大断面シールドにおいて凍結工法を用いて切開き接続工事を行うにあたって、計画時に留意した事項と施工実績、また、施工中に発生した問題とその対策について報告する。

キーワード: 大断面シールド, 凍結工法, 切開き接続工事

1. はじめに

本工事は、首都高速中央環状新宿線(図-1 参照)のうち豊島区千早一丁目の立教通り立坑から新宿区上落合二丁目の大江戸線中井駅まで、延長約2,020m 区間の外回りトンネルをシールド機外径12.02mの世界最大(発注時点)の泥土圧シールドにより施工するものである。内回りトンネルは別JVの施工で、同一の発進立坑から当JVより約1ヶ月遅れで発進した。シールド機は、平成17年5月に当JVの外回りシールド、同年6月に内回りシールドが到達し、シールド機の解体後は平成18年8月現在に至るまで、トンネル坑内の耐火工事や外回りシールドと内回りシールドを結ぶ連絡坑工事等を行っている。



図-1 事業概要図

今回構築する連絡坑は計3箇所あり、いずれも地下水位以下においてトンネル坑内からセグメントを切開いて構築を行う。そのため、凍結工法によって地盤の自立及び止水性を確保し施工を行った。今回の施工にあたっては、補助工法に凍結工法を用いることに留意して様々な事前検討を行い、無事構築を完了させた。しかしながら、施工途中において凍土の造成が進行しない等の問題も発生した。

本報文では、凍結工法を用いることに留意して行った検討の内容と施工実績ならびに施工途中に発生した問題と対策について報告する。

2. 工事概要

本工事の概要を表-1に、連絡坑の概要図を図-2に示す。

連絡坑施工箇所のシールド土被りは、いずれも1D(D:セグメント外径:11.8m)程度で、連絡坑の長さは3~8m程度である。連絡坑掘削部の土質は、No.1及びNo.2連絡坑部については、N値12~50以上の武蔵野礫層(以下、Mg層)、N値50以上の東京礫層(以下、Tog層)および、シルトを主体に部分的に細砂を挟む東京層粘性土層(以下、Toc層)が主体の互層地盤である。Mg層およびTog層は、いずれも粒径100mm程度の礫が存在し、透

表-1 工事概要

工事名称	SJ51 工区～SJ53 工区(外回り)トンネル工事			
発注者	首都高速道路株式会社	工期	平成 14 年 3 月 14 日～平成 19 年 3 月 28 日	
工事内容	シールド機径	12,020 mm	道路床版工	一式
	トナリ延長	2,018.1m	連絡坑構築工	3箇所
	掘削工法	泥土圧(気泡)シールド工法	凍結工	一式
	一次覆工	セグメント外径: 11,800mm, RC セグメント(ワパセグメント 2): 811 リング(桁高 450 mm, 幅 1,500 mm), ガタイルセグメント: 302 リング(桁高 400 mm, 幅 1,200 mm), 鋼殻セグメント: 287 リング(桁高 400 mm, 幅 1,500 mm)	トナリ耐火工	耐火吹付 10,500m ³ 耐火パネル 11,400m ³
			内装工	一式

水係数が 10^{-2} cm/s 程度の豊富な水量を有する帯水層である。No. 3 連絡坑部については、細砂が主体の N 値 12～50 以上の江戸川層砂質土層(以下、Eds 層)が主体で上部に Tog 層がある。Eds 層の透水係数は 10^{-3} cm/s 程度である。今回の施工では、透水係数が

大きく地下水量が多い地盤において、トンネル坑内よりセグメントを切開いて掘削を行うため、補助工法として凍結工法が採用された。連絡坑の施工ステップを図-3 に示す。

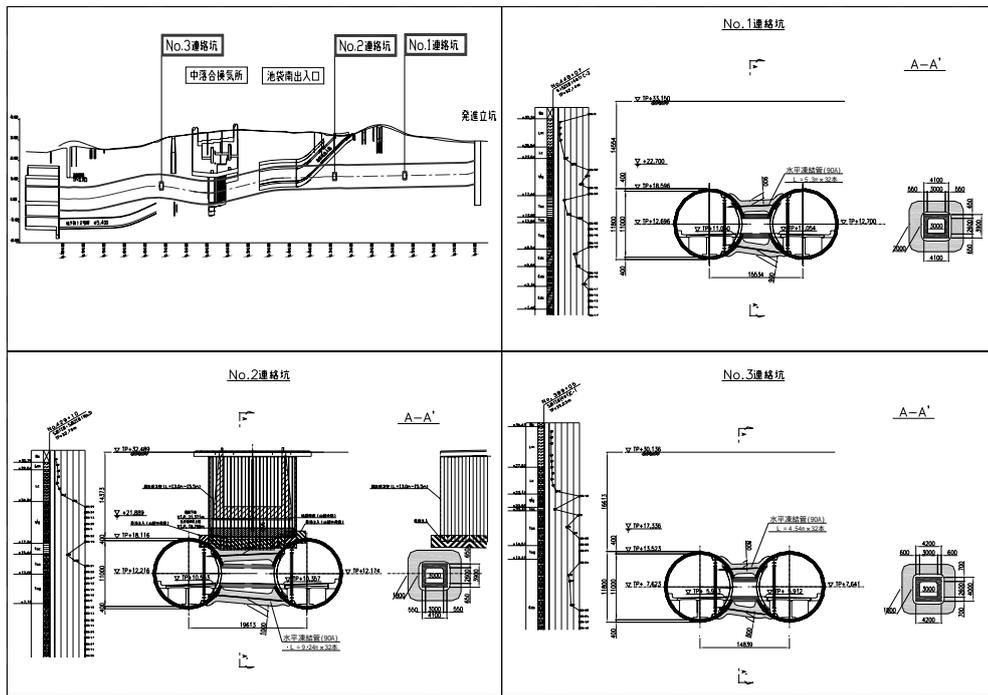


図-2 連絡坑概要図

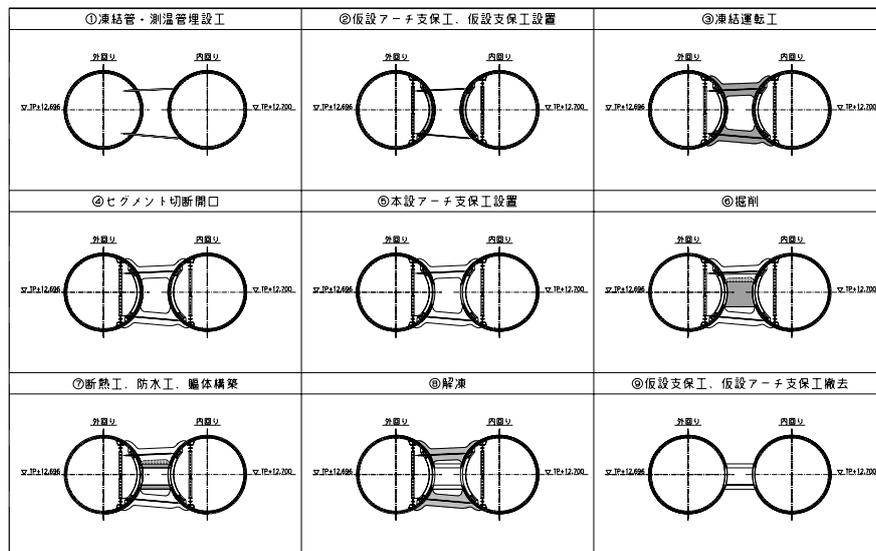


図-3 施工ステップ

3. 検討概要

連絡坑の施工にあたり，凍結工法を用いることに留意して行った検討の概要を表-2 示す．本稿では，表中の網掛けした箇所の検討概要と施工実績について詳述する．

4. 検討概要と施工実績

(1)凍土管理

凍結工法は，地中に凍結管を埋設し凍結管に - 20 ~ - 30 に冷却したブラインを循環させて凍土を造成するものである．今回の工事では，図-2 に示したように，掘削箇所の地山の自立と止水性を確保するために地盤を凍結して掘削範囲を凍土で閉合させる．凍土は温度によって力学的性質が変わるため，設計上必要な厚さは凍土の温度によって相違する．今回の凍土の厚さは，凍土温度が - 10 であるときの力学的性質を用いて算定した．

凍土の管理は，凍土の造成状況を直接目視確認することはできないため，一般に地中温度を測定し地中の温度分布から凍土の厚さと凍土の平均温度を算出し設計上必要な凍土が造成されているか管理する．凍土の造成範囲や凍土の平均温度の制御は，ブライ

ン温度の変更やブラインを循環させる凍結管の選択といった方法を用いて行う．本工事においても，図-4 に示すように測温管を地中に埋設し，地中の温度分布から凍土の厚さと平均温度を算出し，凍土管理を行った．

また，今回の工事では，凍土が掘削範囲を完全に閉合していなければ，掘削箇所の止水性を確保することができないため，凍土が閉合しているか判断するために，図-4 に示す位置に水圧計を設置しセグメント背面の水圧を計測することによって凍土の閉合状況を判断した．図-5 に示すように，凍土の閉合が進むと閉合された内部の水は行き場が少なくなり徐々に水圧が上昇する．本工事では閉合に伴う水圧の上昇が自然水位による水圧(0.23MPa)よりも高くなった時点で閉合がなされたと判断した．

さらに，今回の施工においては2本のシールド間を掘削するため，凍土が両シールドのセグメントに確実に凍着されていなければ，セグメントに沿って地下水が掘削箇所に流入することになる．地下水が流入しないために必要な凍着長(セグメントと接する地山が 10 以下になっている円周方向の長さ)は，過去の実績より 2.5m 以上とされている．本工事では，図-4 に示すように貼付凍結管をセグメント内面に設置し，凍着長を 2.5m 以上確保できるようにした．

表-2 検討概要一覧表

検討項目	対策概要
凍上に伴う地表面への影響	解析の結果，地表面への影響なし
凍土の膨張圧によるセグメントへの影響	図-10 に示す仮設支保工を設置し，セグメントに作用する膨張圧に対抗 仮設支保工及び仮設アーチ支保工の応力とセグメントの変形を計測し，セグメントの健全性を確認
凍土の管理方法	図-4に示すように測温管を配置し，凍土の温度を管理 図-4に示す位置に水圧計を設置し，凍土造成に伴う閉塞水圧の上昇を管理 図-4に示す位置で凍着温度を管理
コンクリートの凍害防止対策	凍土に接するコンクリートの温度が5℃以上になるよう掘削凍土面に断熱材を設置 セグメントに接するコンクリートの温度が5℃以上になるようセグメント内面に温水管を設置 断熱材の内面に測温計を設置し，コンクリート温度を計測
解凍及び仮設支保工撤去時期の検討	気温5℃の環境で養生を行ったテストピースが設計基準強度を満足した時点で解凍開始 解凍開始後，仮設支保工に作用する応力が除荷された時点で仮設支保工を撤去
解凍時の沈下対策	解析の結果，地表面への影響なし 解析の結果，連絡坑下部の地盤が沈下し空隙が生じると想定されたため，下床版構築時に注入管を埋設しておき解凍後に無収縮モルタルを空隙に充填

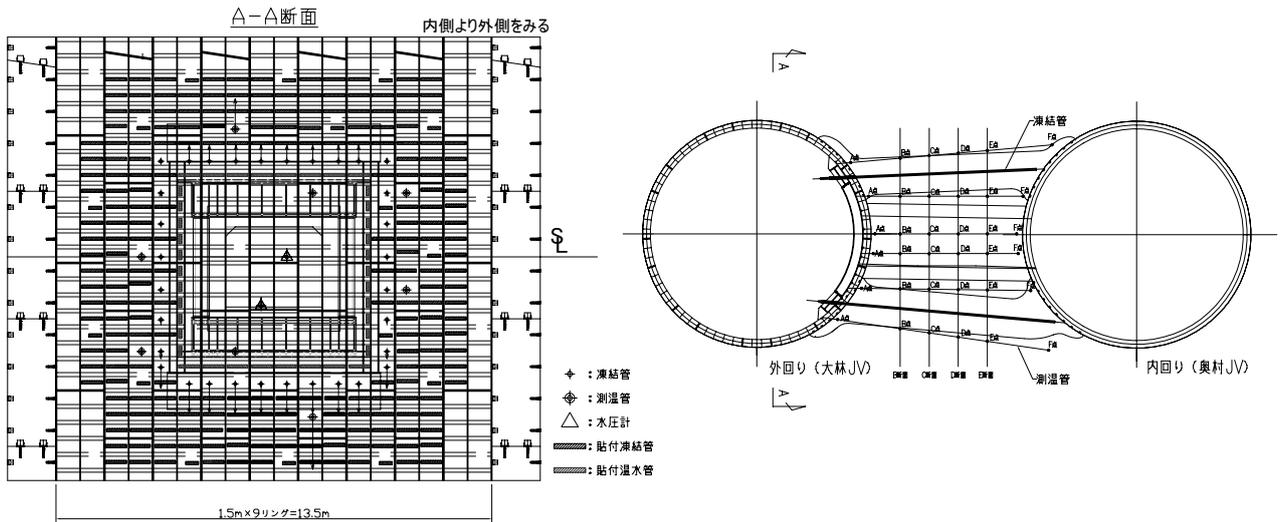


図-4 温度及び水圧測定位置図

(2)コンクリート凍害防止対策

連絡坑の構築は、セグメントを切開いて地山を掘削し、地山を裏型枠としてコンクリートを打設する。今回、凍結工法を採用しているため、コンクリートが接する地山及びスチールセグメント部は 0 以下になっているため、コンクリートを直接打設すると凍害が生じることになる。そのため、凍土面に対しては断熱材を設置し、コンクリート温度が 5 以下にならないようにした。断熱材の性能は厚さによって変わるため、断熱材の選定にあたっては、熱解析を実施して、コンクリートの自重によって断熱材がつぶれた状態でも、断熱材内面でコンクリート温度が 5 以上になるものを選定した。今回、断熱材にグラスウール ($t = 50\text{mm}$) を選定したが、本断熱材は、コンクリートの自重によって想定されるつぶれ量 40mm よりもさらにつぶれて厚さが 5mm になってもコンクリートの凍害を防止できるものである。本工事においては、断熱材の効果が確実に得られているか確認するために、断熱材の内面に測温計を設置しコンクリート温度の経時変化を観察した。その結果、図-6 に示すように、コンクリート温度はいずれの段階においても 5 以上となっており、コンクリートの凍害防止を図ることができた。

スチールセグメント部に対しては、図-4 に示すように、セグメント内面側に貼付温水管を設置し、20 程度の水を循環させることによって凍害を防止することとした。しかし、貼付温水管を設置することによって、必要な凍着長 (2.5m以上) を確保できなくなることが懸念されたため、凍害を防止し且つ凍着長を満足できるよう熱解析を実施して、貼付温水管と貼付凍結管の配置検討を行った。

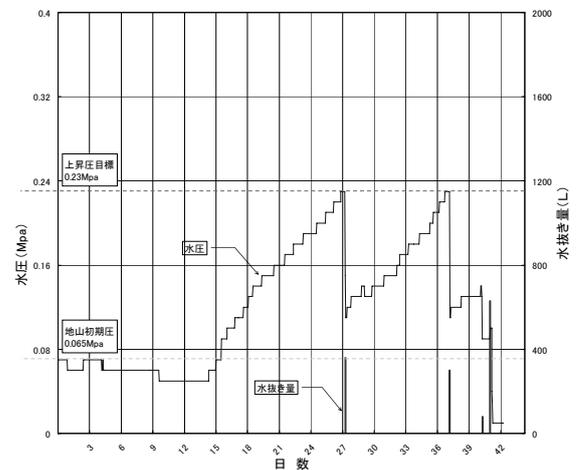


図-5 水圧経時変化図

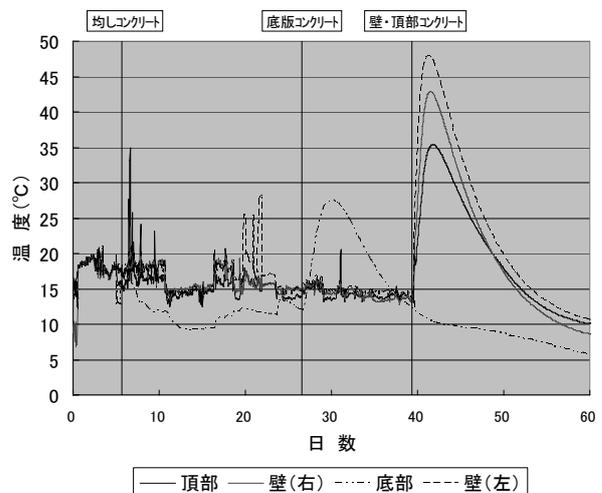


図-6 断熱材内面の温度履歴

5. 施工時に発生した問題点と対策

(1) 凍土の造成不良

本工事では、3箇所ある連絡坑のうち No. 2 連絡坑で、図-7 に示すように、トンネルスプリングライン付近の地中温度が低下せず凍土が造成されないといった問題が発生した。凍土が造成されない原因としては、トンネル坑内から熱が供給されている、地中内に熱を供給しているものが存在する、地下水の流れが存在する、といったことが考えられた。これらのうち については、図-7 に示すようにセグメント側の温度は低下しているため、今回の原因ではないと考えた。また、 についても外・内回りのシールド間に埋設物等がないため、原因としては考えにくい。よって、凍土が造成されない原因として を考えた。

一般に、凍結工法においては、地下水の流れが

2m/日以上であると、凍土の造成が進行しないといわれている。当該箇所の近傍の土質データによると地下水の流れは 50cm/日であるが、土質調査が行われた後、現在は開削工事が当該箇所近傍で行われており、地下水の流れが早くなっている可能性も考えられた。図-8 は、地中温度の測定結果から凍土の造成状況を想定したものであり、Tos 層と Tog 層の間で凍土が造成できていないため、この層境に地下水の流れが存在していると推察した。

そこで、地下水の流れを抑制することを目的として、図-9 に示す位置に薬液注入（二重管ストレーナ）を一行行った。なお、薬液注入を凍土の近傍で施工するため、0 以下であってもゲル化し強度が発現する注入材（トクヤマエムテック「ジオキープ」）を使用することとした。その結果、薬液注入後 1 日程度で地中温度が低下し始め、凍土造成が可能となった。

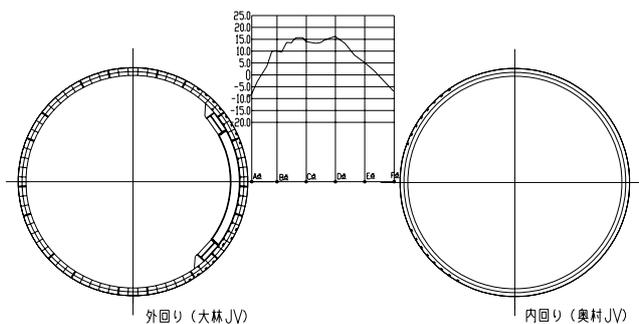


図-7 地中温度分布

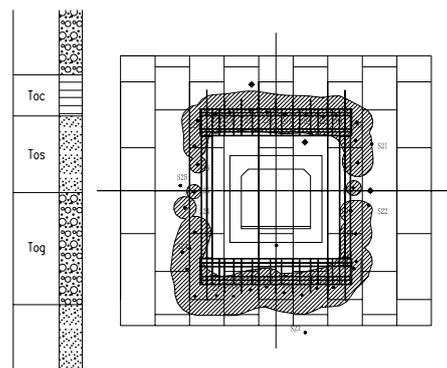


図-8 凍土造成状況想定図

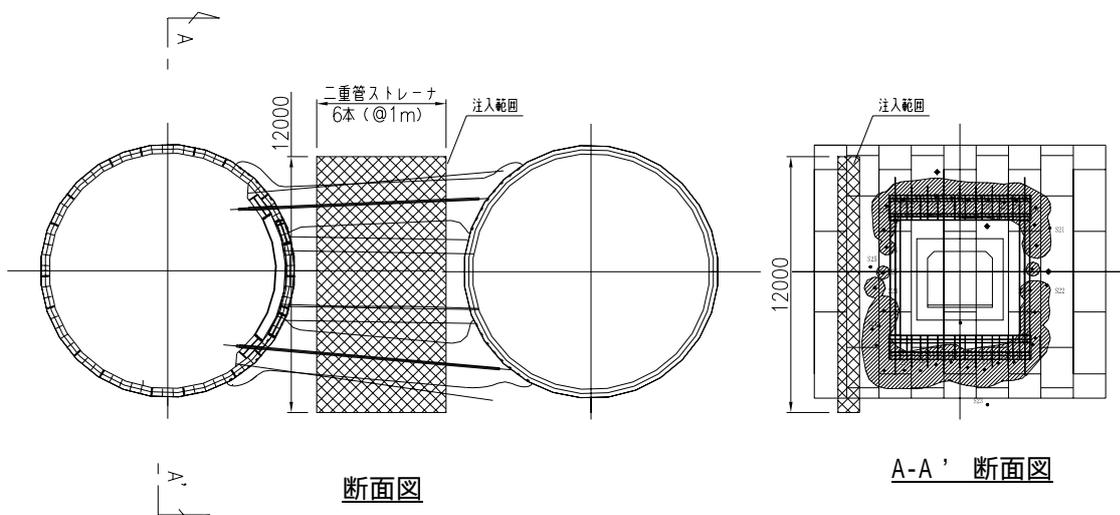


図-9 薬液注入施工位置図

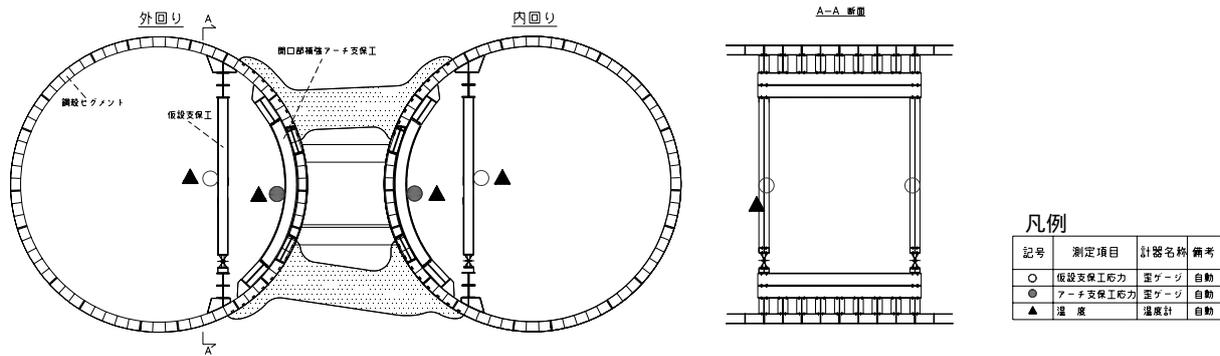


図-10 仮設支保工及び計測位置

表-3 設計値と計測値の比較

膨張圧作用図	No. 1連絡坑 支保工応力(断面力)			セグメントの変形 (凍結開始からの最大値)
	仮設支保工	仮設アーチ支保工		
	軸力(kN)	軸力(kN)	モーメント(kN・m)	
	設計値: 1235 計測値: 1985	設計値: 3819 計測値: 3973	設計値: 598 計測値: 2096	

(2)凍土の膨張圧によるセグメントへの影響

凍結工法では細粒分が多い地山を凍結すると間隙水が凍結することによって膨張して凍上が生じる。本工事においては、凍結範囲にToc層やEds層といった細粒分が多い地山があるため凍上が生じ、凍上による膨張圧がセグメントに作用することが予想された。そのため、図-10に示すように仮設支保工を設置し膨張圧に対抗することとした。

実施工にあたっては、膨張圧は地山の細粒分の状態によって設計上考慮したものと相違する可能性があるとして想定されたため、図-10に示すように支保工の応力を計測するとともに、セグメントの変形も計測して、膨張圧の作用状況を監視することとした。

その結果、表-3に示すように、仮設アーチ支保工に生じた曲げモーメントが設計で考慮していたものよりも大きな値を示し、セグメントの変形については「縦つぶれ」と変形モードが相違していた。

原因としては、設計上、膨張圧はこれまでの施工実績からトンネル中心方向に作用するものとしていたが、上記の現象から推察すると、トンネル中心方向よりもトンネル水平方向に作用する膨張圧が卓越

していたと考えられる。今回の工事については、支保工に生じた応力は許容応力以下であり、セグメントにも有害な変状が見られなかったため、大きな問題にはならなかったが、今後の類似工事にあたっては、膨張圧の作用方向について留意して計画を行う必要があると考えられる。

6. おわりに

本工事においては、凍結工法を用いて切開き接続工事を行うにあたって、適切な凍土管理を行い、コンクリートの凍害対策に留意することによって、安全に品質の良い構造物を構築することができた。一方で、凍土造成中におけるセグメントの健全性を確保するためには凍土の膨張圧に留意することが重要であるが、本工事においては、膨張圧の作用する方向が設計と実施工において相違したといった問題が生じた。この件については、今後留意すべき事項と考えられる。本稿が今後の類似工事の計画において参考になれば幸いである。