

凍結工法によるシールドと分岐シャフトの地中接続工事の計画と施工

石田主税¹・西山秀哉²・増田浩二³・守田貴裕⁴

¹(株)安藤・間 大阪支店土木部大阪北共同溝作業所 (〒576-0017 大阪府交野市星田北7丁目3695)
E-mail:ishida.chikara@ad-hzm.co.jp

²(株)安藤・間 大阪支店土木部綾部作業所 (〒623-0054 京都府綾部市井倉町梅ヶ畠20)
E-mail:nishiyama.hideya@ad-hzm.co.jp

³正会員 (株)安藤・間 土木事業本部技術第一部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20)
E-mail:masuda.koji@ad-hzm.co.jp

⁴(株)安藤・間 土木事業本部技術第一部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20)
E-mail:morita.takahiro@ad-hzm.co.jp

本工事は、既設の共同溝シールドトンネルとシャフト立坑を横坑により地中接続する工事が7個所ある。横坑直上の第二京阪道路は既に供用を開始していたため、横坑掘削時の防護工として、事前に高圧噴射搅拌工法を施工完了していた1個所を除き、シールドトンネル坑内から施工が可能で優れた遮水性と強度をもつ凍結工法が採用された。凍結範囲には軟弱粘性土層が存在し、地下調整池や第二京阪道路の橋脚基礎などが近接していることから、凍結膨張圧による既設構造物の損傷、凍上、解凍沈下による近接構造物および周辺地盤への影響が懸念された。本報告では、地中接続を安全かつ確実に行うために実施した施工計画と施工実績について報告する。

Key Words : ground freezing method, underground connecting, proximity structures, reinforcement for opening segment, 3D inverse analysis

1. 工事概要

大阪北共同溝は、第二京阪道路事業の一環として、副道下に電線、電話線およびガス管を収容し、大阪府門真市から枚方市交野に至る延長約15kmの幹線共同溝である。このうち、本工事は延長約5.7kmで、既設の共同溝シールドトンネルとシャフト立坑を横坑で接続する工事が7個所ある。

横坑は人力掘削により地山を開放した後に鋼製セグメント ($\phi 2.35m$, $\phi 2.58m$) を組立てることから、掘削時には防護工が必要となる。横坑直上の第二京阪道路は供用を開始しており、地上からの施工は不可という条件であったことから、事前に高圧噴射搅拌工法を施工完了していたTB18/EB11を除く6個所の補助工法としては、シールドトンネル坑内から施工が可能で、優れた遮水性と強度を有する凍結工法を採用している。断面図を図-1、全体概要の模式図を図-2にそれぞれ示す。

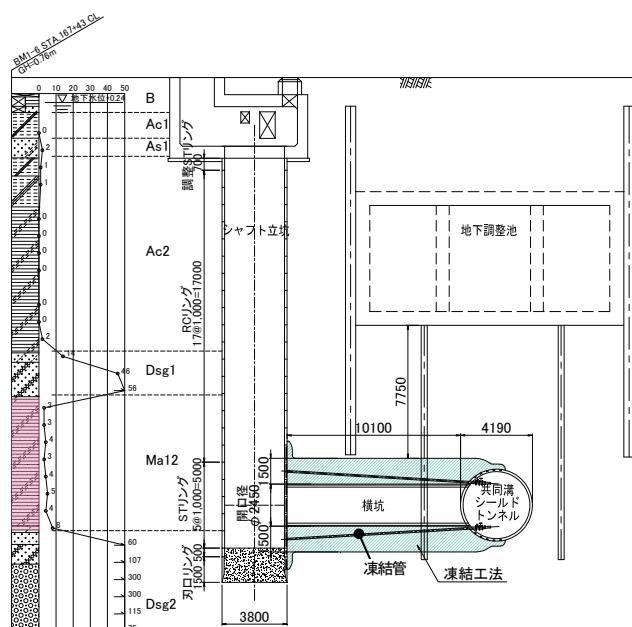


図-1 断面図(TB24/EB14 の例)

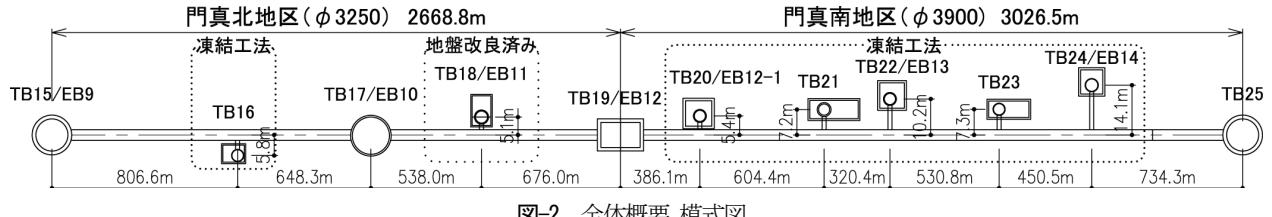


図-2 全体概要 模式図

2. 凍結工法の特徴と課題

凍結工法は、地盤中に埋設した凍結管内に約-30°Cの不凍液を循環することで配管周辺の地盤を冷却し、地盤を凍結固化させ凍土壁を造成する工法である。その得失を表-1に示す。

本工事の凍結対象土質は、海成粘性土（Ma12層）を主体としていることから、凍結膨張圧や開口切断によるセグメントの変形、出水や土砂の流入、凍上変位や解凍沈下による周辺地盤および近接構造物への影響を抑制することが課題であった。また、共同溝シールドトンネルと分岐シャフト、横坑から構成される3次元的な配置に對して適切に評価できる手法が求められた。

3. 凍結の施工計画と課題の検討

(1) 必要凍土厚の算定

凍土の必要厚さは、造成された凍土を剛性一様な円環モデルと近似して考え、慣用法にて安全率 $F_s=2$ を満足する厚さ $t=1.5\text{ m}$ 以上とした。

(2) 課題に対する検討

凍結工法の課題として挙げられる凍結膨張に起因するセグメントへの影響、周辺構造物への影響検討を行った。

a) セグメントの開口補強検討

凍結膨張圧と開口切断によるシールドトンネルおよびシャフト立坑への影響を、凍結膨張圧による偏荷重だけでなく、セグメントの継手と支保工剛性的評価ができ、変形が算出できる多リングはりーばねモデル計算法により検討した（図-3）。解析結果の一例を図-4に示す。なお、多リングはりーばねモデルとは、セグメントや内部支保工をはり、セグメント間継手とリング間継手をばねとしてそれぞれモデル化した計算法である。セグメントと内部支保工の接続はピン結合とした。

また、土水圧や凍結膨張圧が作用している状態でセグメントの開口切断を行う際、セグメントの変形により凍土との付着が切れ、出水や土砂の流入が懸念された。そこで、セグメントの変形を抑制するため、鋼製セグメント区間に内部支保工、RCセグメント区間にリング支保工を設置することにした。リング支保工は、H形鋼

(H200×200×8×12)を曲げ加工したものを、坑内の作業スペースを確保するために内面に沿わせる形で配置した（図-5）。

表-1 一般的な凍結工の得失

長所	①対象土質に影響されず、あらゆる地盤に適用可能 ②凍土は高強度で止水性が高い ③地盤や地下水を汚染しない ④地上部の使用範囲が少なく、騒音や汚泥の搬出がない
短所	①細粒分の多い粘性土やシルト層では凍結膨張が起こり、凍結膨張圧による既設構造物への影響や、凍上による地盤隆起が発生しやすい ②解凍時に凍土内に発生した空隙に起因した地盤沈下が生じることがある

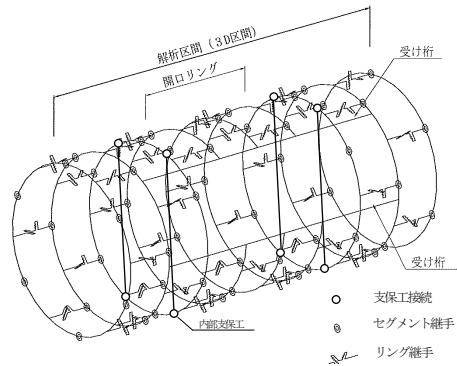


図-3 多リングはりーばねモデルの概念図

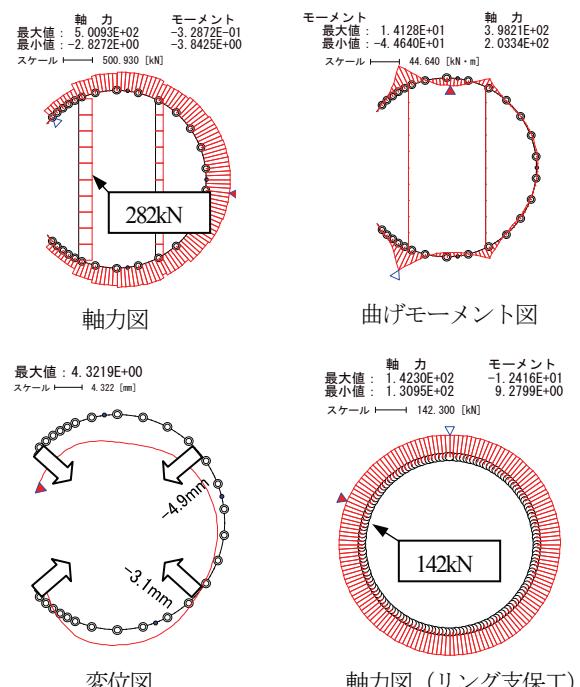


図-4 解析結果

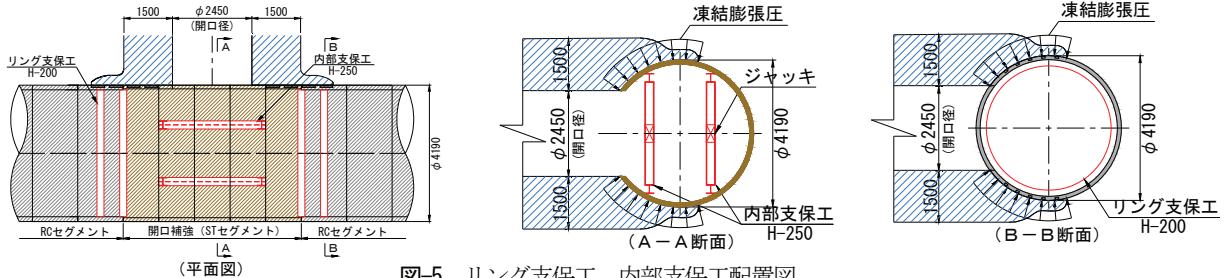


図-5 リング支保工、内部支保工配置図

b) 近接構造物の影響検討

地盤の凍上、解凍沈下による周辺構造物と共同溝本体、分岐シャフトと横坑に対する影響検討を3次元FEM解析を用いて検討した。解析手法は、凍結範囲の地盤要素(平面ひずみ要素)に対して、線膨張係数と温度(1°C)を与えることによりモデル化した。

現位置で調査ボーリング時に採取した試料を用いて凍上、沈下試験を行い、得られた凍結膨張率などをもとに、実績から慣用的に求める3次元凍上計算式にて地表面での凍上、解凍沈下量を算出した。パラメーターとなる線膨張係数は、3次元FEM解析を行い同等の変位量を得られる値とした(表-2)。

先行して施工を行い、かつ、解析等のモデルケースとなるTB22/EB13の解析モデルを図-6、解析結果を表-3、4、図-7、8にそれぞれ示す。この結果より解凍、沈下時における近接構造物および周辺地盤への影響が多大であることが示されたため、沈下量を低減させるべく、強制解凍、充填工を採用した。

(3) 計測管理

安全性の確認だけでなく、予測解析結果と施工結果の比較を行うため、近接構造物や周辺地盤の変状計測、内部支保工の応力測定を行った。

表-2 線膨張係数の決定値

解析ケース名	変位算出手法	凍結膨張率 (%)	凍上・解凍沈下率 (%)	最大変位量 (mm)
凍結時	3次元凍上計算式	4.38	1.46	2.3
	3次元FEM解析		0.44	2.3
解凍時	3次元凍上計算式		8.92	-14.1
	3次元FEM解析		3.97	-14.1

■ 線膨張係数の決定値

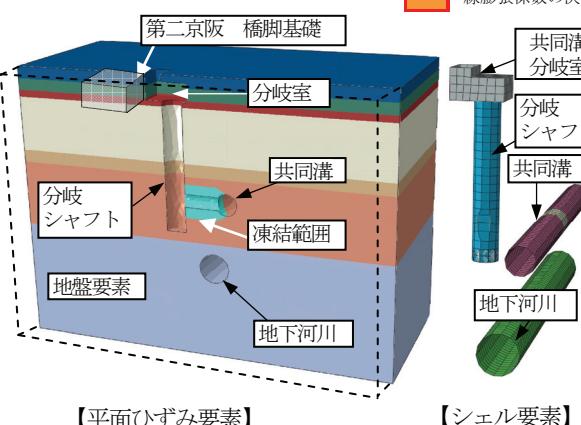


図-6 3次元解析モデル(TB22/EB13)

a) 共同溝、立坑内の変状計測

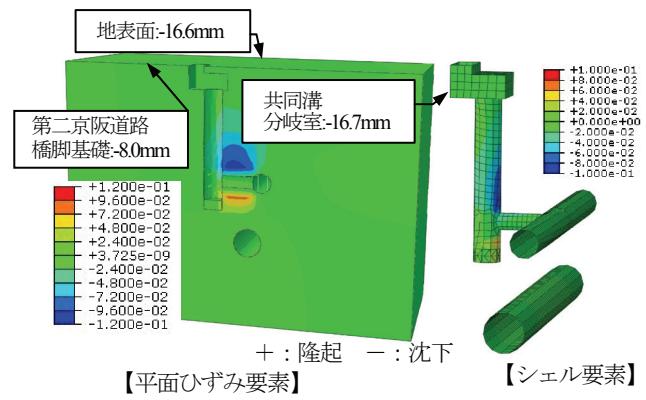
本工事では、凍結部周辺に地下河川や地下調整池、ガス管や下水管、水道管などの埋設管、さらに高速道路の高架基礎、共同溝が近接しており、それらに対する影響を計測管理により把握する必要がある。共同溝および立坑内の計測については、リアルタイムに効率よく測定結果を把握する目的で自動計測を行い、計測結果を15分間隔でインターネット経由にて配信した。測定項目を次頁に示す。

表-3 鉛直変位一覧

着目点	鉛直変位(mm)		備考
	凍結	解凍	
地表面(最大値)	1.7	-16.6	要対策
共同溝 分岐室	1.8	-16.7	〃
第二京阪道路 橋脚基礎	0.7	-8.0	〃

表-4 水平変位一覧

着目点	水平変位(mm)		備考
	凍結	解凍	
共同溝	-28.2	-2.3	要対策
分岐シャフト	6.3	22.0	〃

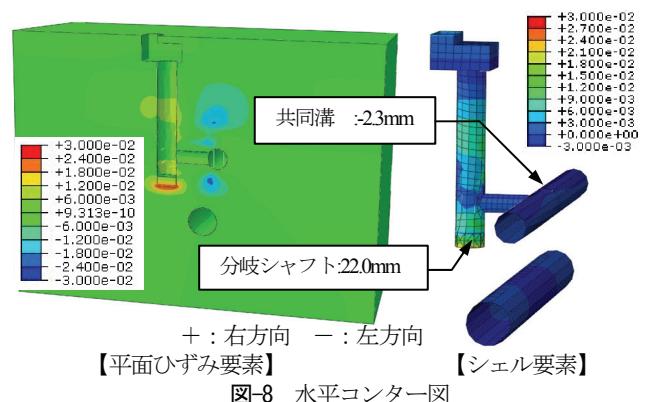


+ : 隆起 - : 沈下

【平面ひずみ要素】

【シェル要素】

図-7 鉛直センター図



+ : 右方向 - : 左方向

【平面ひずみ要素】

【シェル要素】

図-8 水平センター図

- ① 圧力式沈下計を用いた共同溝の沈下計測
- ② 自動追尾式トータルステーションを用いた共同溝の内空と水平、鉛直方向の動態観測
- ③ ひずみゲージを用いた内部支保工の応力測定

このほか、多段式傾斜計を用いた立坑の水平変位計測、距離計を用いた立坑内空の変位計測を実施した。共同溝内、立坑内での計測位置を図-9に示す。

b) 層別沈下計による地中の鉛直変位計測

現位置土を採取する際のボーリング孔を利用して、層別沈下計を設置し、地中変位を自動計測し予測解析との比較を行った。図-10に層別沈下計の配置図を示す。

4. 地中接続の施工

凍土造成が完了してから横坑セグメント組立てまでの施工手順を図-11に示す。

(1) 凍土造成

ブライン配管は地上に設置した凍結用プラントより立坑シャフト内を経由し、水平ボーリングにより共同溝シールドトンネルの横坑接続部へ配管した。

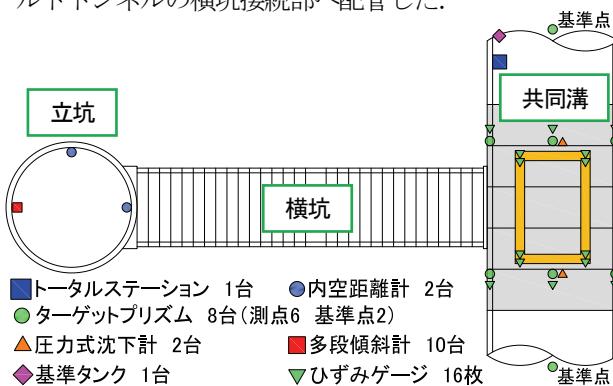


図-9 計測器設置位置図

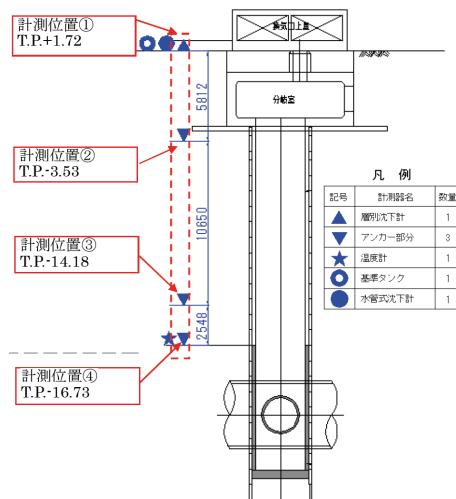


図-10 層別沈下計配置図

凍結管は立坑側と共同溝側の両方から削孔し、凍結管を水平に埋設し、凍土を水平に造成する計画とした。これは凍土造成量を必要最小限まで抑制することで、近接構造物への影響を低減するためである。ボーリングの際は、削孔個所から土砂や地下水の流出を防止するためにパッカー、バルブを取り付けた。その後、Φ90mmの凍結管外管を埋設しその間にΦ20mmの凍結管内管を配置した。ブラインは内管から送り、内管と外管の隙間を戻ってくるという経路である。

凍結管の埋設後、開口周辺部分の既設セグメントに貼付凍結管を取り付け、開口周辺を凍結し、セグメントと凍土との付着を増強した。また、凍土状態を把握するため地中に温度管理用の測温管を放射状に設置し、凍土平均温度-10°C、凍土厚1.5mを満足するよう温度管理を行った。

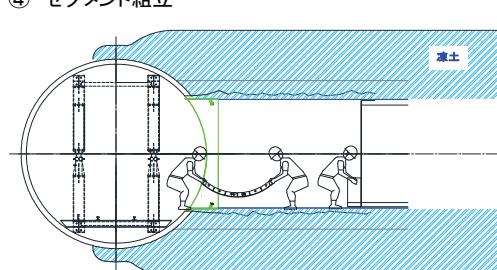
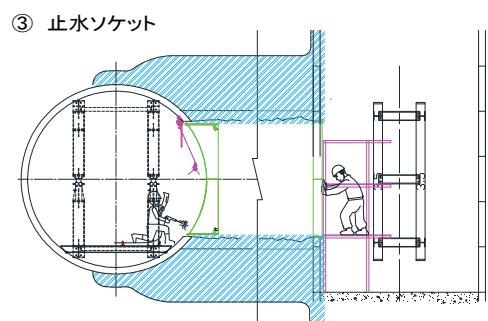
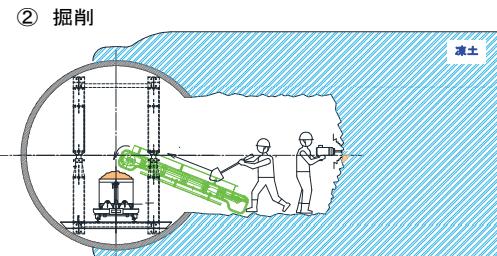
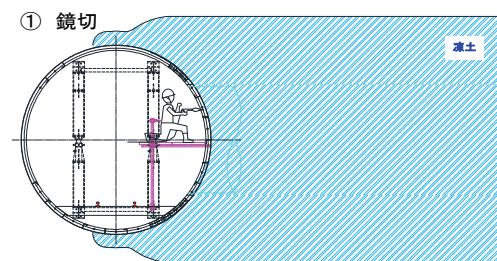


図-11 横坑の施工手順

(2) 開口切断と横坑施工

鏡切の際が最も内部支保工に応力がかかることもあります、作業には慎重を期した。

開口切断の手順としては、内部支保工および鋼製セグメントに設置した応力計を用いて、まず20cm×20cm程度の小さな開口をあけ、漏水のないことを確認し、許容応力と実際の応力を計測画面で比較確認しながら、徐々に開口を広げていき、最後に全断面の開口切断を行った。横坑掘削はすべて共同溝側から人力施工し、掘削した凍土は坑内をバッテリーロコにて運搬した。セグメントの組立は人力によって行った（写真-2,3）。

(3) 強制解凍、充填工

強制解凍は、凍結運転完了後、配管内に流す液体を-25°Cのブラインから+60°Cの温水に切り替えて凍土を強

制的に解凍する方法である。その際、細粒分の多い粘性土は、吸水作用により発生したレンズ状氷塊が解け、発生した空隙が原因で砂層よりも大きな沈下が生じる。この沈下を抑制するため、横坑周囲の粘性土中に生じた空隙はセメントベントナイトにて充填した。また、自然解凍を行った場合の工期は約5ヶ月必要となるが、強制解凍の場合は概ね1ヶ月程度であり工程が大幅に短縮できた。

5. 計測結果の評価

凍結開始から強制解凍、注入工の完了までに計測したセグメントの内空変位や支保工の軸力の代表的な計測結果を図-12に示す。



写真-1 凍土造成状況



写真-2 横坑掘削完了



写真-3 セグメント組立て完了

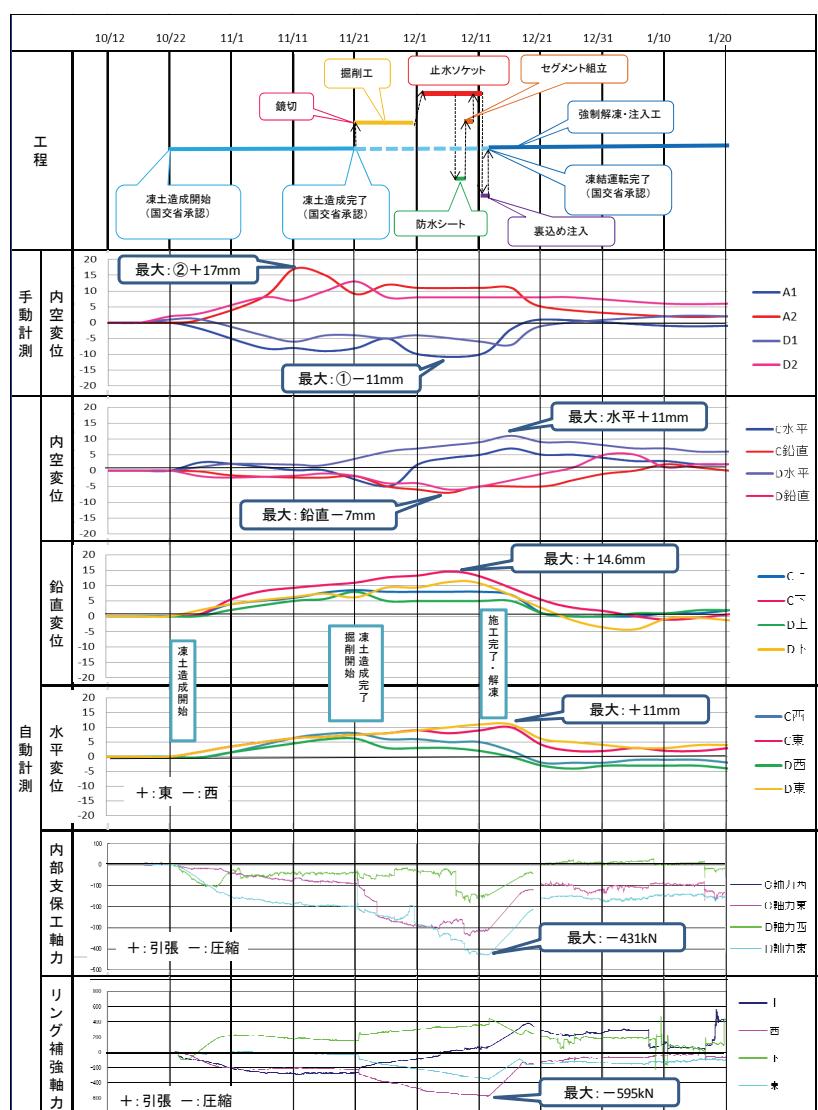


図-12 横坑接続の工程と計測結果

(1) 支保工の軸力

内部支保工に作用する軸力は、凍結膨張圧がリング中心方向へ作用することで、内部支保工には総じて圧縮力が作用する。ただし、下方から上方へ作用する凍結膨張圧が卓越しており、下方のリング支保工には曲げモーメントが発生し、内フランジ側に引張力が生じた。これらの計測結果より、凍結膨張圧や開口切断による荷重が確実に内部支保工やリング支保工に受替えられていると考えられる。

a) 内部支保工

内部支保工の軸力は、凍結開始から徐々に圧縮力が作用し、開口切断を行った後、さらに圧縮力が増加した。横坑の裏込め注入完了時に圧縮力は最大となり、解凍開始から減少傾向となった(図-12)。軸力の模式図を図-13に示す。内部支保工の最大圧縮力は-431kNとなり、許容軸力1500kNの約30%である。

b) リング支保工

リング支保工の軸力は、上部と開口側に圧縮力、下部に引張力が凍土造成開始から徐々に作用している。掘削開始後は開口側と反対側に圧縮力が増加した(図-14)。最大の圧縮力は凍土側に作用した595kN、許容軸力1333kNの約45%程度である。

(2) 内空およびセグメントの変位

凍結時の内空およびセグメントの変位は、地盤の凍上の影響により、総じて下方から上方へ作用する荷重が大きくなり、水平方向についても凍結膨張圧の作用方向へ変位する結果となった。

a) セグメント(開口部)の内空変位

手動計測と自動計測を併用して自動計測の確実性を検証したが、双方の結果に大きな隔たりはなく、同じ傾向であることが確認できた。

内空変位は、凍結開始から凍結膨張圧によって徐々に既設シールドトンネルを下方から持ち上げるような荷重が作用したことで、セグメントは内空側へつぶれるような変形が生じ、その対角方向のセグメントは地山側へ押出されるような変形が生じた(図-15)。解析ではセグメントの上下に均一な凍結膨張圧を作用させているが、実際には、下方の凍結範囲は構造物で閉塞されていることもあります。想定より大きな凍結膨張圧がセグメントに作用し、変位量が増大したものと思われる。なお、解凍時は応力が開放され、徐々に真円に戻っていく挙動を示した。

b) セグメント(開口補強部)の変位

凍結開始から鉛直変位は上方へ変位し、解凍開始前で最大14.6mmの変位が発生したが、解凍により約10日間で凍結前の値に戻っている。水平変位については、凍結開始から凍結膨張圧の作用方向である東側へ最大

11.0mm変位し、解凍後は凍結前の位置に戻っている。セグメントの変位の模式図を図-16に示す。

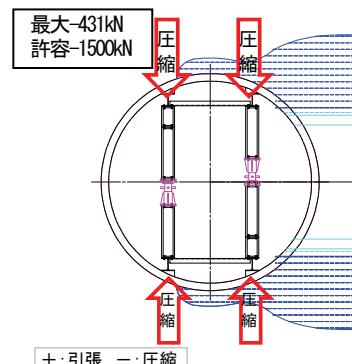


図-13 内部支保工の軸力模式図

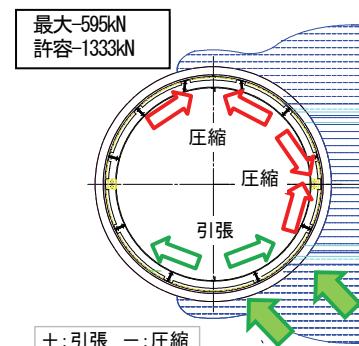


図-14 リング支保工の軸力模式図

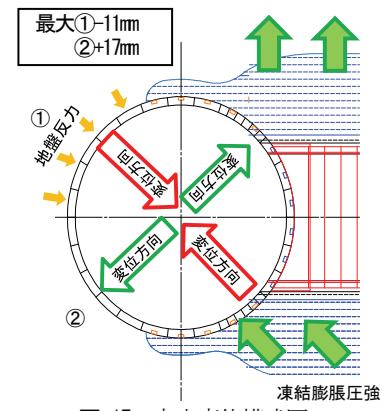


図-15 内空変位模式図

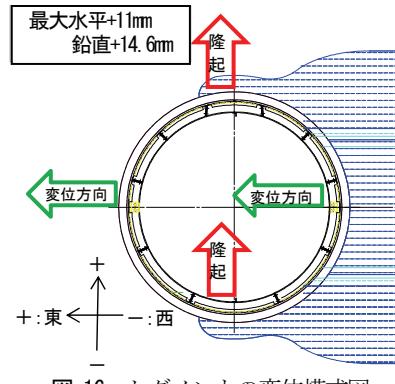


図-16 セグメントの変位模式図

(3) 地中変位

凍結の地盤の鉛直変位の計測結果を図-17に示す。地盤の鉛直変位は凍土に近いほど大きな値を示し、造成完了の前後に最大値を示している。また、計測結果の最大値と予測解析の比較を表-5に示す。両者を比較すると凍結範囲の近傍で差は2.0mm、地表面付近では0.2mmと概ね同程度の値を示している。

6. 逆解析と次施工への反映

(1) 目的

凍結工法における地盤や近接構造物に対する影響は、凍結対象地盤の構成、近接構造物の形状や離隔に依存するため、各施工位置で影響検討が必要である。ここでは、予測解析の妥当性を検証し、次施工に反映させることを目的として、先行施工したTB22/EB13で実施した地中変位の計測結果をもとに逆解析を行った。逆解析は地表面での地盤変位の実測データを用いて、同等の変位量を得られる線膨張係数を採用している。

(2) 逆解析結果

逆解析結果を表-6、7に示す。鉛直変位では、トータルステーションを用いて計測を行っている第二京阪道路橋脚基礎を除き、計測位置①の地表面、分岐室といった近接構造物の変位量は同程度の値を示す結果となった。また、水平変位については予測解析に対して約80%の値を示した。以上より、予測解析だけで十分に凍土造成による影響度を判断できることが確認できた。

表-5 計測結果と予測解析の比較

計測位置	計測値 (mm)	予測解析値 (mm)
計測位置① 地表面(T.P.+1.72)	1.0	1.2
計測位置② T.P.-3.53	1.2	1.3
計測位置③ T.P.-14.18	3.7	2.0
計測位置④ T.P.-16.73	4.0	2.0

表-6 鉛直変位一覧

着目点	予測解析 (mm)	計測値 (mm)	逆解析 (mm)
計測位置① 地表面(T.P.+1.72)	1.2	1.0	1.0
分岐室	1.8	1.2	1.4
第二京阪道路 橋脚基礎	0.7	2.0	0.6

+ : 隆起 - : 沈下

表-7 水平変位一覧

着目点	予測解析 (mm)	計測値 (mm)	逆解析 (mm)
共同溝	-28.2	-15.0	-22.4
分岐シャフト	63	2.9	5.0

+ : 右方向 - : 左方向

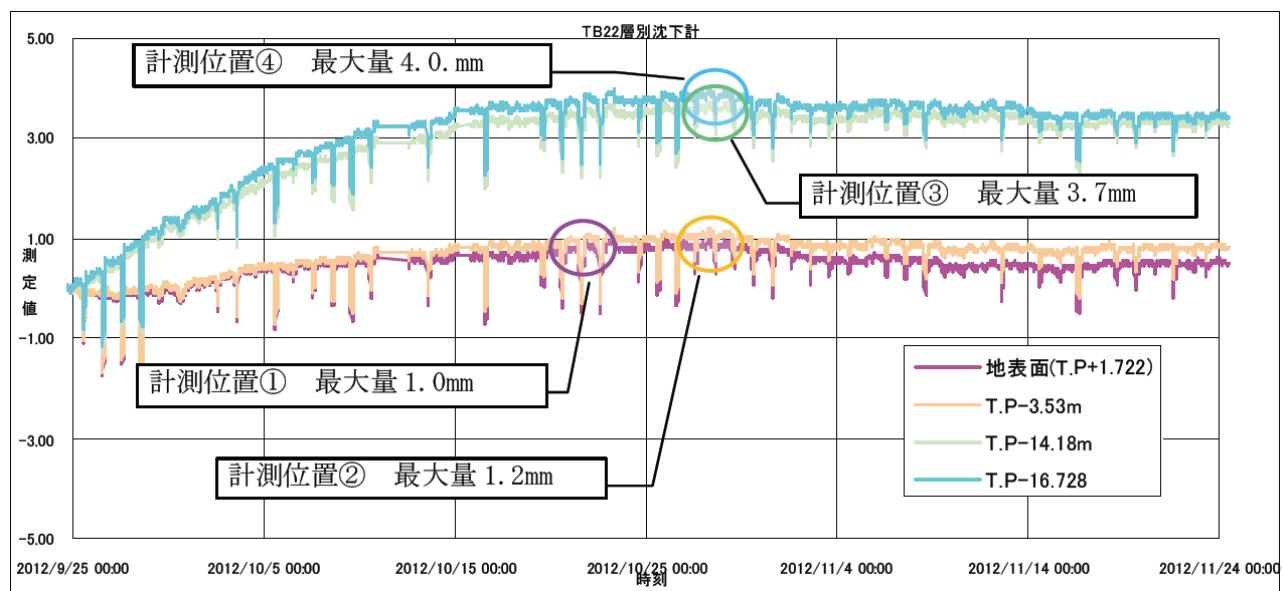


図-17 地盤の鉛直変位の計測結果

(3) 次施工への反映

解析モデル図-18に示すようにTB24/EB14はTB22/EB13に対して凍結造成範囲が約1.5倍であり、また、土留め壁で囲まれた地下調整池の直下に凍土を造成するため、凍結膨張の影響が最も大きくなることが懸念された。逆解析で修正された予測解析結果は図-19、20に示すとお

りで、管理基準値以内ではあるが、他の施工箇所に比べ大きな変位が予測された。そこで、凍上抑制対策として新たに次の3つの対策を行った。

- ①昼夜間施工による凍土造成期間の短縮
- ②近接構造物の計測の強化
- ③シールドトンネル内の支保工の増強

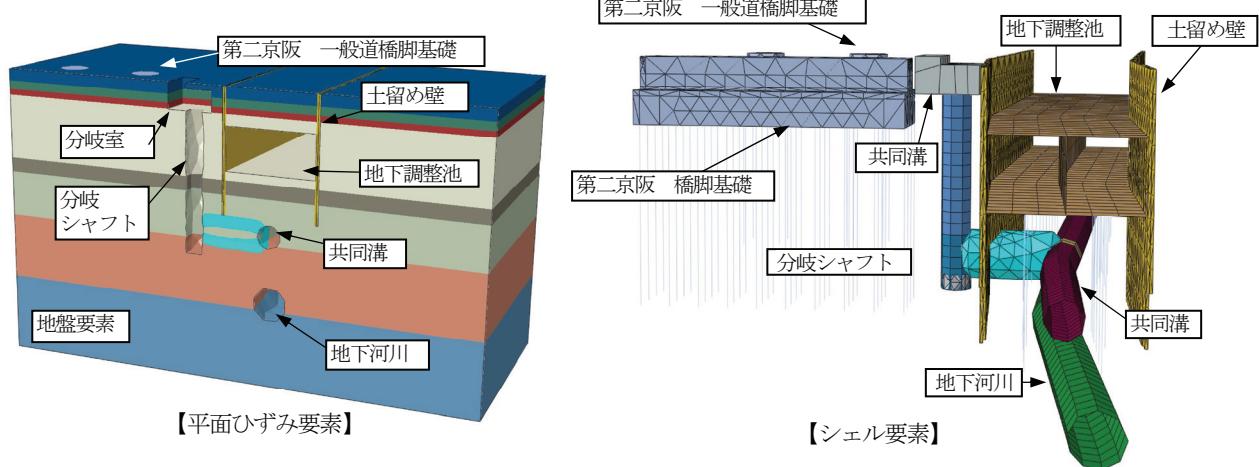


図-18 解析モデル(TB24/EB14)

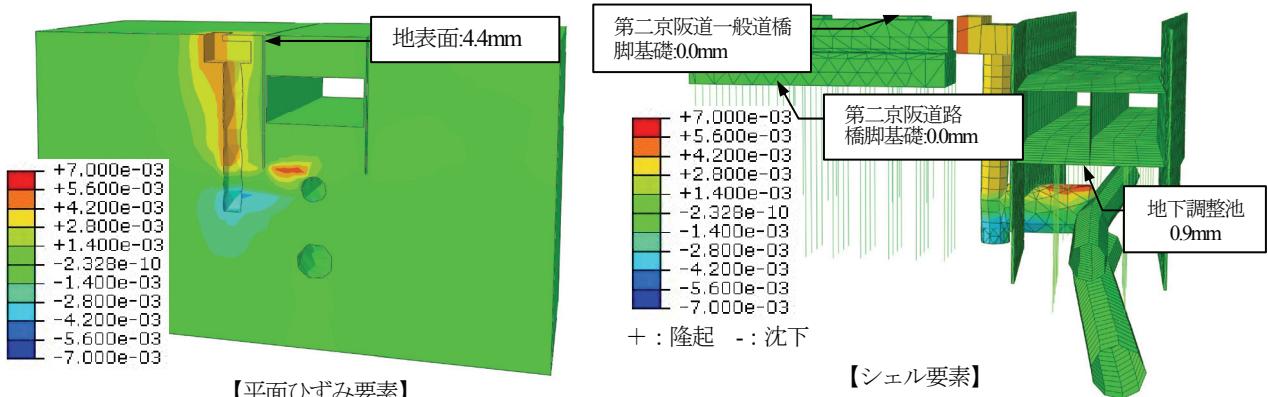


図-19 鉛直センター図

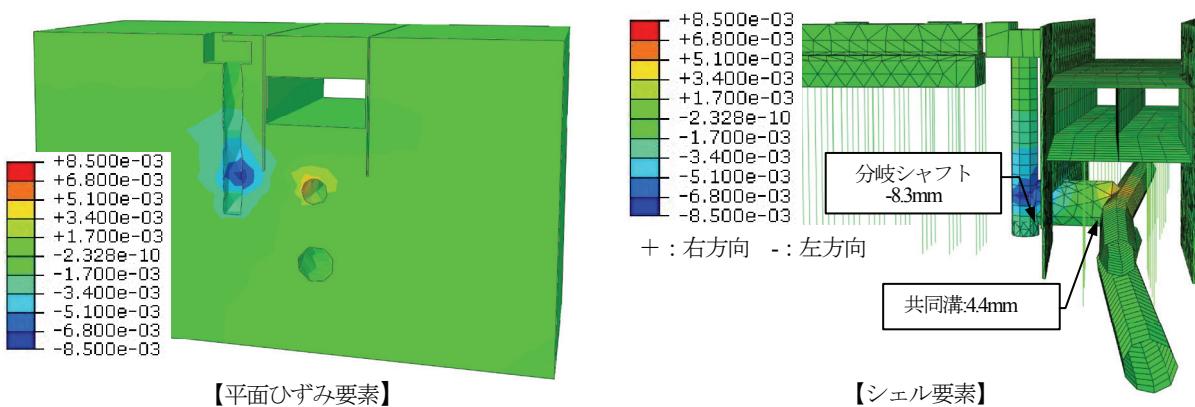


図-20 水平センター図

計測結果を表-8, 9 に示す。計測結果はすべて管理値以内に収めることができておらず、概ね予測解析結果に対して小さい変位量で抑えることができている。しかし、凍土の造成範囲に近い地下調整池、共同溝シールドトンネルにおいて予測解析値以上の変位が発生したが、管理値以内であり経過を観察し、無事に施工を終えることができた。

表-8 鉛直変位一覧

着目点	予測解析 (mm)	計測値 (mm)	管理基準値 (mm)
地表面	4.4	2.0	±40.0
第二京阪道路 橋脚基礎	0.0	3.0	-6.0
第二京阪道路 一般道橋脚基礎	0.0	3.0	-6.0
共同溝 分岐室	4.5	2.3	-30.0
地下調整池	0.9	3.9	-30.0

+ : 隆起 - : 沈下

表-9 水平変位一覧

着目点	予測解析 (mm)	計測値 (mm)	管理基準値 (mm)
共同溝	4.4	9.1	±15.0
分岐シャフト	-8.3	-7.0	±11.0

+ : 右方向 - : 左方向

6. おわりに

本工事は、6箇所の凍結工法による地中接続において、セグメントの補強、計測管理、凍土造成管理を実施するとともに、先行施工したTB22/EB13の計測データをもとに逆解析を行い、次施工へ反映させることで、無事に施工を完了することができた。ただし、シールドトンネルやシャフト立坑等、凍土造成領域に近い構造物に対しては、予測解析値より変形が大きくなる傾向がみられた。これは、構造物などで閉塞された地盤を凍結した際の凍上率が、実際は想定以上に大きかったこと。また、構造物の剛性、地盤の評価など、解析条件のモデリングに実状と相違があったためではないかと考えられる。今後は、計測結果から判断できる凍上、解凍沈下の挙動や施工条件等を十分考慮したモデル化を行うことで解析精度の向上を図り、凍土造成範囲、凍結維持期間、補強構造などの合理的な施工計画に反映させていく必要があると考える。

参考文献

- 1) 本田葉子、石田主税：凍結工法を用いた共同溝と分岐シャフトの地中接続について、第75回施工体験発表会（都市），pp19-27、日本トンネル技術協会、2014。

(2014.9.15受付)

PLANNING AND CONSTRUCTION OF UNDERGROUND CONNECTING CONSTRUCTION OF BRANCH SHAFT AND SHIELD BY GROUND FREEZING METHOD

Chikara ISHIDA, Hideya NISHIYAMA, Koji MASUDA, Takahiro MORITA

As for this construction, there are existing utility tunnel shield tunnel and construction seven places to connect a shaft shaft to the underground by a drift. Because the second Keihan road of the drift direct top had already started service, construction was possible, and, except one place that I constructed a high pressure jet stirring method of construction as a protection mechanic at the time of the drift digging beforehand and completed, a freeze method of construction to have superior and strength was adopted by the shield tunnel pit. Because there was a soft viscous earth layer in the freeze range, and an adjustment reservoir under the ground or the supporting beam foundations of second Keihan road approached it, influence on damage of the established structure by the freeze expansion pressure, proximity structure by frost heaving, the thawing subsidence and outskirts ground was concerned about. I report a construction plan and the construction results that I carried out to perform underground connection in this report safely and surely.