

大阪北共同溝における凍結工法を用いた地中接続について

本田 葉子¹・増田 浩二²

¹(株)安藤・間 大阪支店土木部大阪北共同溝出張所 (〒553-0003大阪府大阪市福島区福島6-2-6)

²(株)安藤・間 本社土木事業本部技術第一部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20)

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する幹線共同溝である。このうち、大阪北共同溝寝屋川・門真地区洞内設備他設置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で地中接続する工事で、防護工として優れた遮水性と強度をもつ凍結工法が6箇所計画されている。施工箇所は地下調節池、第二京阪道路の橋脚基礎などに近接し、凍結範囲に粘性土が存在することから、凍結膨張圧の発生、凍上変位や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。本稿では、地中接続を安全かつ確実にを行うために実施した計画と施工実績について報告する。

キーワード 凍結工法、地中接続、セグメント補強、計測管理、近接構造物、逆解析

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接続する工事である。

横坑は人力掘削により地山を開放した後、鋼製セグメント(φ2.35m、φ2.58m)を組み立てるため、掘削時の防護工が必要となる。TB24/EB14の断面図を図-2に示す。しかし、横坑直上の第二京阪道路は供用開始しており、高圧噴射工法の施工は不可能であることより、事前に高圧噴射攪拌工法を施工完了していたTB18/EB11を除く6箇所の補助工法としては、シールド坑内から施工可能で、優れた遮水性と強度を有する凍結工法を採用している。

TB24/EB14の断面図を図-2に示す。

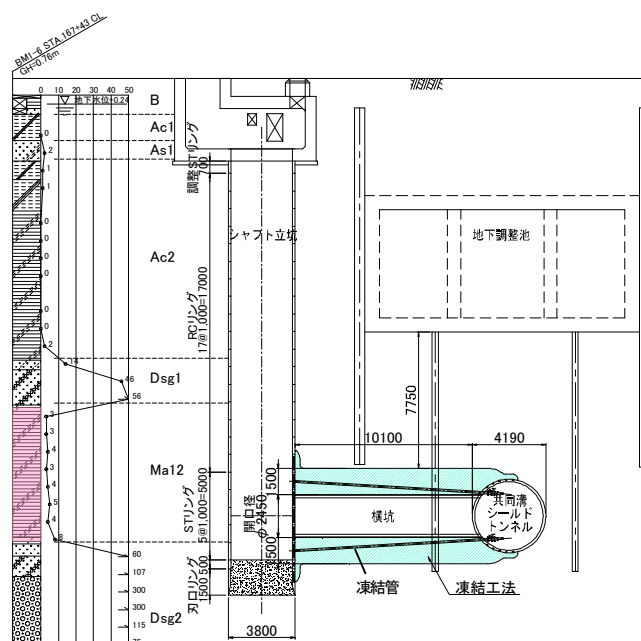


図-2 断面図 (TB24/EB14の例)

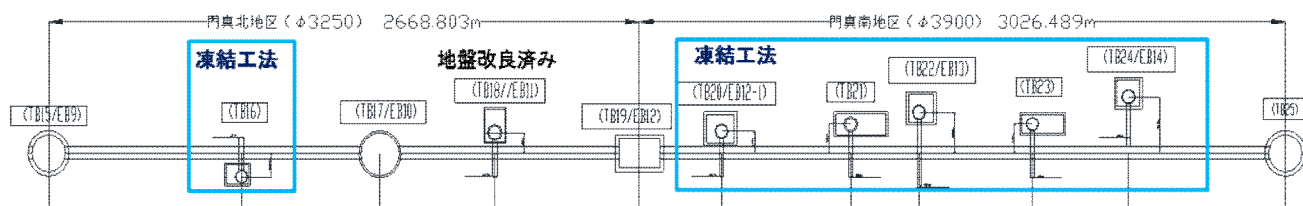


図-1 全体概要図

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マイナス30度の不凍液(塩化カルシウム水溶液、通常ブラインと呼んでいる)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。

一般的特徴を以下示す。

(長所)

- ・対象土質に影響されず、あらゆる地盤に適用可能。
- ・凍結した地盤は高強度で止水性に富んでいる。
- ・地盤や地下水を汚染しない
- ・地上部の占用範囲が少なく、騒音や産廃の搬出がない。

(短所)

- ・細粒分の多い粘性土やシルト層では凍結膨張が起こり、凍結膨張圧による構造物への影響や、凍上による地盤隆起が発生しやすい。
- ・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。
- ・当現場においては既設立坑とシールドトンネルに凍結膨張圧による影響が出る。

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。

3. 凍結の設計と計画

(1)必要凍土厚の算定

凍土の設計強度は、平均温度が -10°C の時の値、開放地山に対する安全率を $F_s=2$ として、剛性一様な円形構造に近似して必要凍土厚を算定し、1.5m以上とした。

(2)セグメントの補強検討

凍結膨張圧と開口切断によるシールドトンネル・シャフト立坑への影響を、多リングはりばねモデル計算法により検討した。土水圧、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。各支保工の配置図を図-3に示す。

(3)計測管理

現位置での調査ボーリングによる凍上・沈下試験結果の値を用いて、FEM解析による凍上量・沈下量の予測解析を行った。予測解析の妥当性を確認するため、近接構造物や周辺地盤の変状を計測することとした。

a) 共同溝、立坑内の変位計測

本工事では、凍結部周辺に大阪府の地下河川や門真地下調整池、大阪ガス埋設管や門真市下水管、大阪市水道管、更に第二京阪道路や大阪北道路、大阪北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で配信するという工夫を行った。測定項目について下記に示す。

①圧力式沈下計を用いた共同溝の変位計測

②自動追尾式トータルステーションを用いた共同溝の変位計測

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、多段傾斜計を用いた立坑の水平変位計測、距離計を用いた内空変位計測、傾斜計を用いた大阪府地下調整池底版コンクリート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-4に示す。

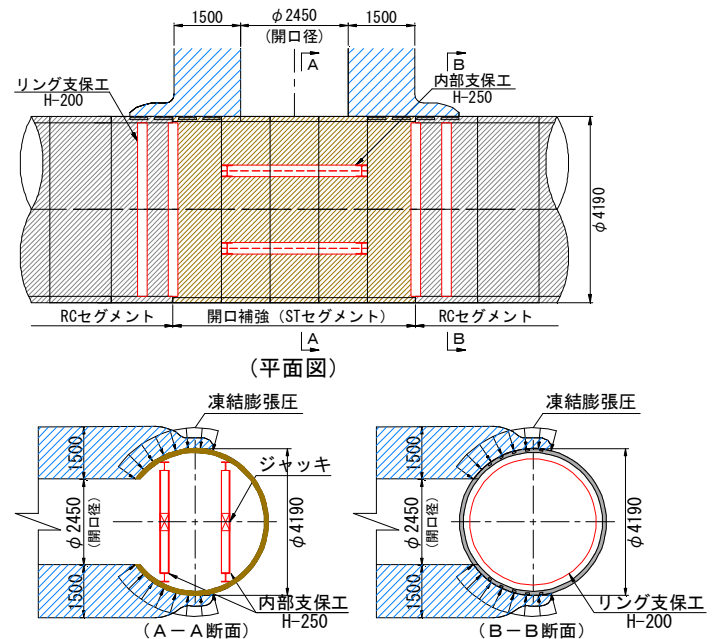


図-3 リング支保工・内部支保工配置図 (シールドトンネル)

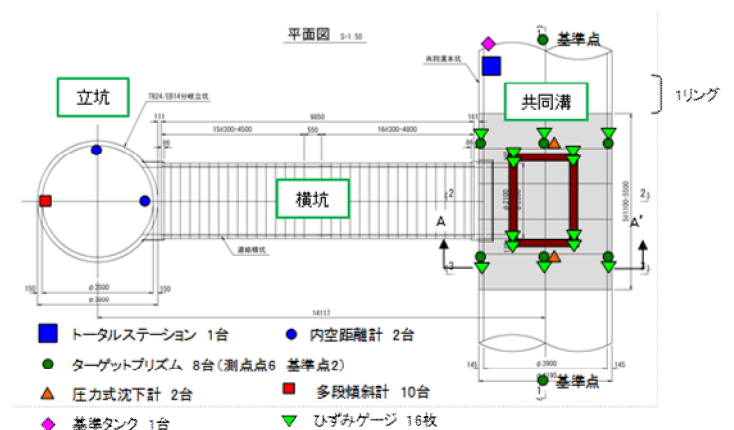


図-4 計測器設置位置図

b) 層別沈下計による地中の鉛直変位計測

凍結施工時、凍結近傍の地中変位を把握することは、予測解析に基づく管理値と比較する上で有効である。

本工事では、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た。図-5に層別沈下計の配置図を示す。

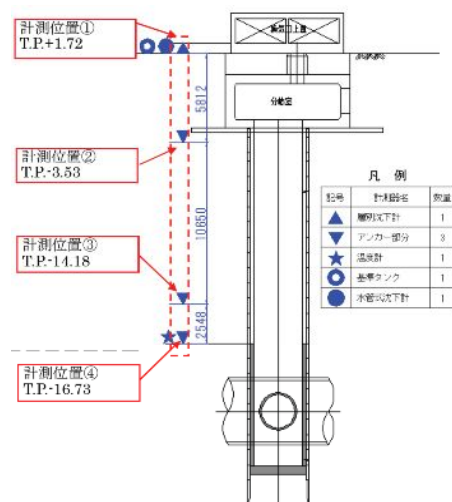


図-5 層別沈下計配置図

4. 地中接続の施工

凍土造成から横坑セグメント組立までの施工手順図を図-6に示す

(1) 凍土造成

今回地盤凍結に使用したプラントは代表的なものとして、冷凍機HP50(モーター出力37kw)を地上に配置し、周囲を防音ハウスで囲み、ブラインタンク、クーリングタワー、冷却水ポンプ、ブラインポンプを周囲に配置する形式を取り、地上プラントより立坑シャフト内を経由し、横坑接続部までブライン配管を行った。プラントの敷地面積は約150m²(10m×15m)程度である。

ブライン配管は、横坑掘削箇所の地中へボーリングにより埋設した。今回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低減し、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、削孔箇所から土砂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、SGP90A凍結管外管を埋設しその中にSGP20A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。

凍結管理設後、開口周辺部分の既設セグメントに貼付凍結管ATKR400(□100×50)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強化した。

また、凍土状態を把握するために地中に温度管理用の測温管を設置した。今回、凍土平均温度がマイナス10℃、凍土の厚みが1.5mという与えられた条件を満足するよう、温度管理を行った。



写真-1 凍土造成状況

(2)開口切断

鏡切の際が最も内部支保工に応力がかかることもあり、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。

(3)横坑掘削・セグメント組立

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。

凍土の掘削は、常に氷点下という過酷な条件下で作業にあたらなければならないため、休憩中の暖房設備はもちろん、万が一凍傷になった場合の温水設備を完備するなど、健康管理には特に気をを使う必要があった。また、凍土維持運転中のマイナス25℃のブラインが常に掘削場所の配管内を流れているため、管を破損した場合の回避方法や緊急連絡体制、木栓やウェスなどの緊急資材の配置にも細心の注意を払う必要があった。



写真-2 横坑掘削状況



写真-3 横坑掘削完了



写真-3 セグメント組立状況

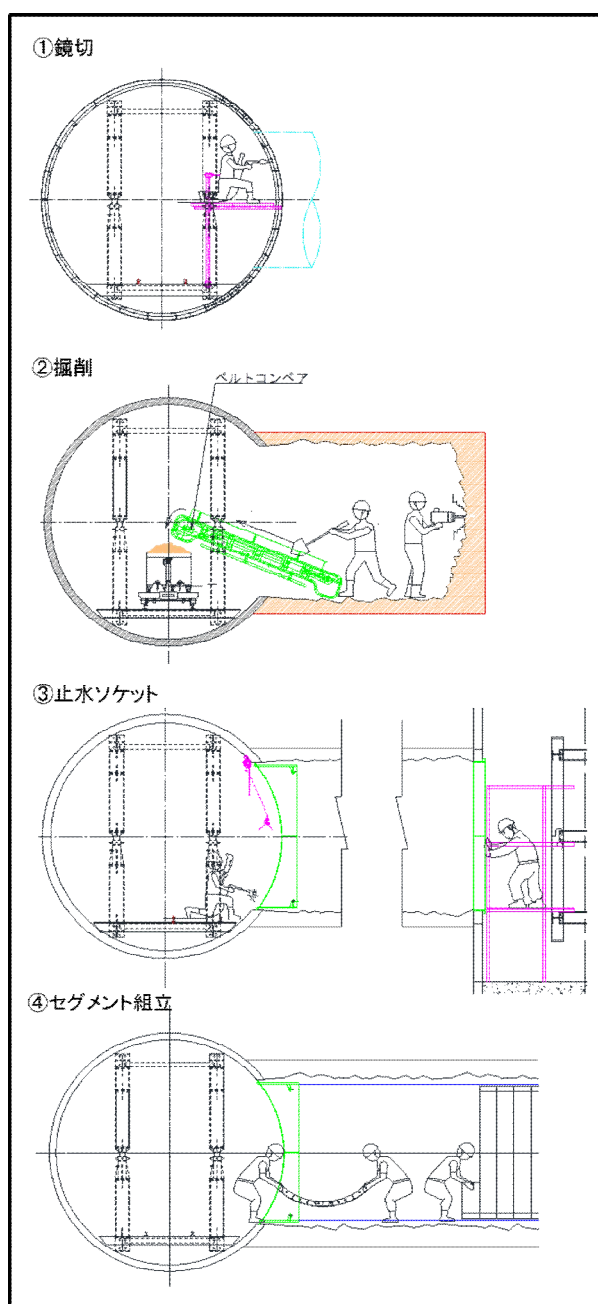


図-6 施工手順図

(5)強制解凍・充填工

細粒分の多い粘性土の場合、吸水作用により発生したレンズ状氷塊が解け、その際に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、空隙を充填する必要がある。また、造成した凍土は自然解凍では、解凍完了するまでに相当な時間を要するため、工程管理上強制的に解凍を行う必要があった。

解凍充填とは、沈下を抑制するため、粘性土中に生じた空隙をセメントベントナイトにて充填することで、今回、対象土量の30%を充填する計画とした。充填は貫通した横坑から小型ボーリングマシンを利用して行い、放射状に削孔し横坑周囲に生じた空隙を充填した。

強制解凍とは、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 $+60^{\circ}\text{C}$ の温水に切り替えて凍土を強制的に解凍することである。強制解凍開始時期は、凍結運転が完了したとき、すなわち鋼製セグメントの裏込充填が終わった後の、温水循環設備設置完了後である。

強制解凍に要する時間は概ね1ヶ月で、凍土造成期間と同等の期間である。自然解凍を行った場合、約5ヶ月必要となる。

5. 計測結果の評価

TB16について、凍結開始から強制解凍・注入工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計測結果を図-7に示す。

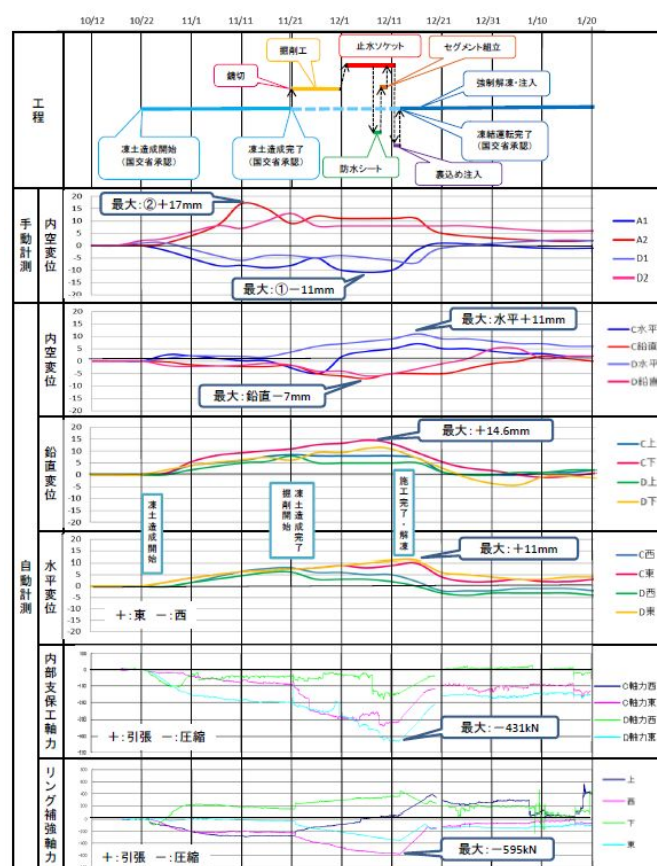


図-7 横坑接続工程と計測結果

(1) 支保工の軸力

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にさらに圧縮力が増加した。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。凍土造成から鋼製セグメント組立完了までの軸力の推移を模式図で表したものが図-8である。内部支保工には圧縮力が作用し、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。模式図に表すと、図-9のようになる。凍結膨張圧によって持ち上げられたために、リング支保工の下部には引張力が作用し、上側には圧縮力が作用したと考えられる。最大の圧縮力は凍土側の作用した595kN、許容軸力1333kNの約45%程度である。これらより、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されていると思われる。

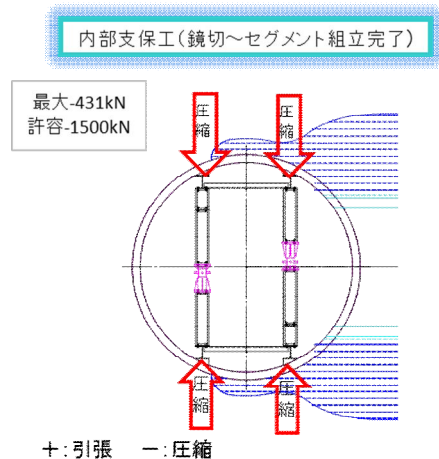


図-8 内部支保工の軸力模式図

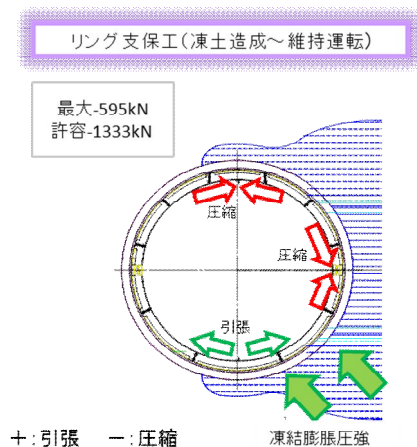


図-9 リング支保工の軸力模式図

(2) 内空変位およびセグメント変位

a) 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、自動計測と手動計測で同じ傾向であることが確認できた。

内空変位は、凍結開始から徐々に既設シールドトンネルを持ち上げるように変形となり、その直角方向の内空はつぶされていくような変形を見せ、解凍を開始するまで楕円形のような形に変形した。その後、解凍を開始してからは、応力が開放され、真円に戻っていくことが確認できた。解凍開始前の内空変位を模式的に表したものが図-10である。

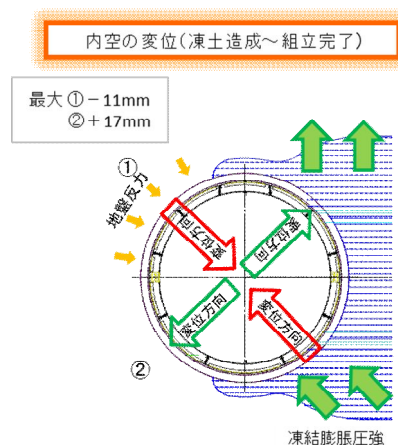


図-10 内空変位模式図

b) セグメントの変位

凍結開始から鉛直変位が上昇をはじめ、解凍開始前で最大14.6mmの変位が発生し、解凍により急激に沈下し10日間で凍土造成開始前の値に戻っていることが分かる。

水平変位については、凍結開始から凍結膨張圧の影響で横坑と反対方向に最大11.0mm変位し、解凍後は元の位置に収束している。

これらの現象を模式的に表したものが図-11である。凍結膨張圧が偏荷重として作用したことが原因と考えられる。

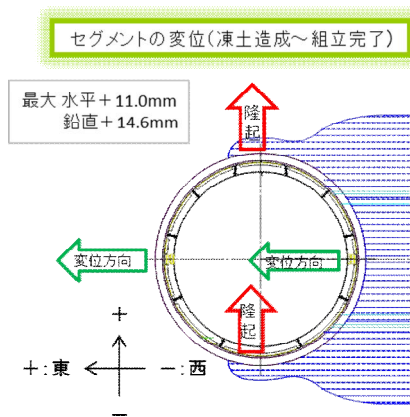


図-11 セグメントの変位模式図

(3)地中変位

凍結の地盤の鉛直変位の計測結果を図-12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-1に示す。両者は凍結範囲の近傍では約2倍の差が生じているが、地表面付近では概ね同程度の値を示している。

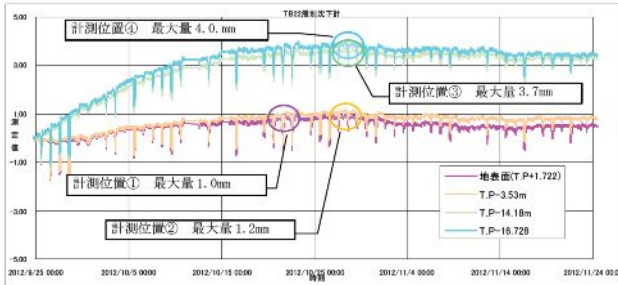


図-12 地盤の鉛直変位の計測結果

表-1 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

隆起: + 沈下: -

ことから凍結による影響がさらに大きくなることが懸念された。そこで、凍上抑制対策として、当初計画にはなかった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などの追加対策を実施し、管理基準値以内で無事に地中接続を完了することができた。

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では、凍結により予測解析値より変状が大きくなる傾向がみられた。今後は、対象土量や凍結維持期間などを十分考慮したうえで、施工計画に反映させていく必要があると考える。

謝辞: 論文作成に当たり協力を頂きました、浪速国道事務所をはじめ、多くの方々に指導を賜ったことを感謝いたします。

参考文献

- 1) 社団法人トンネル技術協会：地中構造物の建設に伴う近接施工指針」（1999年）

(4) 逆解析と次施工への反映

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フィッティングさせ、FEMによる逆解析を行った。逆解析のコンター図の例を図-13に示す。

共同溝シールドトンネルの隆起量は当初の予測解析値に比べ大きく結果となった。

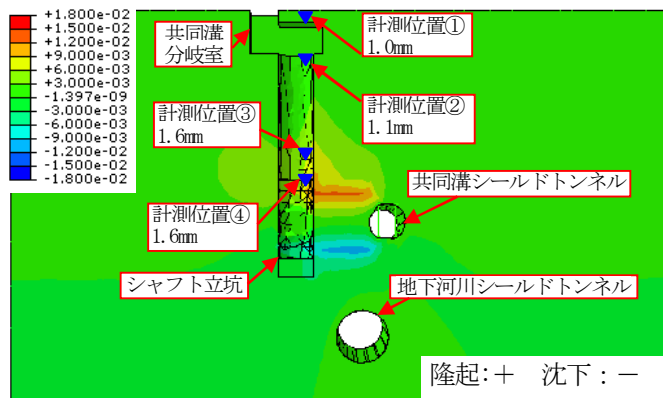


図-13 逆解析鉛直方向コンター図

次施工に反映させる際、特にTB24/EB14では、凍土造成延長が約10mと長く、門真地下調節池に近接している