

凍結工法を用いたシールドトンネル接続工の挙動シミュレーション

東京都下水道局 芝山 浩司
大成建設（株） 正会員 ○仁井田将人 山本 平
高橋 要

1. はじめに

都市化の進展に伴い、市街地における土木工事は、大深度化の傾向の度を増々深めている。現状の土木技術では、大深度におけるトンネル等の接続時の補助工法は、凍土とセグメント等が密着（凍着）した状態で止水性が担保される凍結工法によるところが大きい。安全かつ確実な接続施工のためには、セグメント等の切り開き時の挙動を正確に把握し、工事の施工に反映させることが大変に重要となる。

しかし、これまでに凍結工法における構築物の挙動に関する考え方は、従来の凍結工法の実績に基づく経験工学的なところが大勢を占め、凍土圧作用時や切り開き時の挙動を適切に解析する手法が明確でなかった。そこで、本稿では、東京都下水道局発注の南台幹線接続工事において、大深度、高水圧下のもとで、雨水貯留管である和田弥生幹線と雨水の流出入を担う南台幹線（連絡管）の接続施工に凍結工法を採用したことに伴い、工事を安全かつ円滑に進めるため、FEM による梁バネモデルにて凍土圧作用時の挙動をシミュレーションし、モデル化手法の妥当性を検討したので報告する。

2. 解析手法

南台幹線接続工事の接続部断面を図1に示す。当工事の凍土領域には粘土層が多く存在し、開口部付近には非常に大きな凍土圧が発生することが予想された為、リング状の補強材に加え、開口部をまたぐ支保工を設置して、開口補強を行った。施工手順は、補強材（欠損リング、支保工）設置、凍土造成、掘削、開口、覆工、凍土解凍、支保工撤去であり、この一連の過程においてセグメント及び補強材の温度、変位、応力についての計測を行った。

解析には、図2に示す様にセグメントと補強材をそれぞれ2次元梁要素でモデル化した。（これを2リングモデルと呼ぶ。）解析対象部位は、南台幹線の中心断面とした。補強梁を除くセグメント、欠損リング、支保工、補強柱については、梁要素にて奥行方向単位長さ当りのモデル化とした。補強梁は、トンネル軸方向に平行な部材であるため、補強リングと補強柱の端部を連結するバネ要素でモデル化した。バネ値は補強リングの軸力が等分布荷重として梁に生じると仮定した時のたわみ量から算定した。

セグメントと補強材間には、調整プレートによって荷重が伝達される構造となっている。そこで、セグメントと補強材間のモデル化として接触要素を用い、両者が密着しているときは一体的な挙動を示すが、両者が離れているときは独立な挙動を示すものとした。

周辺地盤は、ばね要素でモデル化した。ただし、凍土圧作用時の凍土地盤とセグメントの肌離れの有無を考慮してセグメントと地盤の間に接触要素を付加した。

凍結膨張圧は、凍土測温データより作成された凍土想定図を参考に、図2に示す様に下部60°範囲は等分布荷重として、上部60°範囲は両端部が中央部の1/2となる偏分布荷重として作用させることとした。これらは、凍土圧の実際の三次元的な作用範囲を考慮して推定したものである。凍結膨張圧の大きさは、試験結果や過去の検討を基に凍結膨張率を設定して、これに地盤の変形係数を乗じて算定した。下部60°範囲の砂

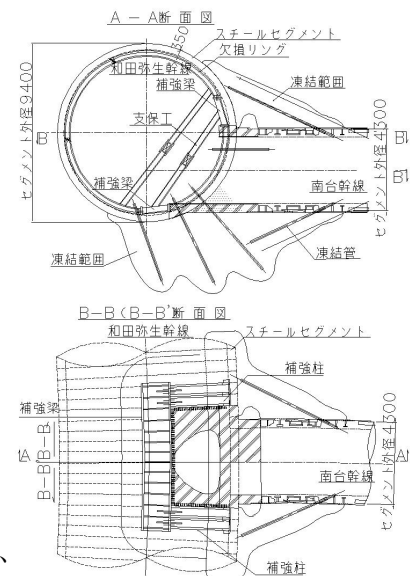


図1 接続部断面図

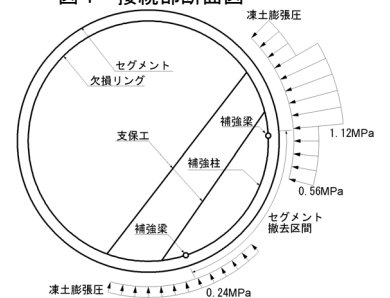


図2 解析モデル図

キーワード シールドトンネル, 凍結工法, 計測管理, シミュレーション

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 (新宿センタービル) TEL. 03-5381-5417

質土層では0.24MPa、上部60°範囲の粘土層では1.12MPaである。

解析は、施工手順を考慮したステップ解析とした。凍土圧作用時までの解析を行い、計測結果との比較からモデル化手法の妥当性を検討した。

3. モデル化手法の妥当性の検討

セグメント・補強材それぞれの変位・軸力・曲げモーメントについての解析値と計測値との比較にて行った。比較は、セグメント構築時からの増分値を用いて行った。

(1)セグメント

内空変位は、左右方向に減少し、上下方向に増加する定性的傾向は一致したが、左右方向の減少量は、解析値13.0mmに対し計測値17.6mmとなった。これは、凍土造成に伴うセグメントの温度低下による温度収縮が一因と考えられる。セグメントは約40℃の温度低下が生じており、その値を用いて補正をすると、解析値は16.7mmとなり計測値とほぼ一致した。

軸力の比較結果を図3に示す。凍結範囲近傍では、解析値と計測値に差が生じた。これは、セグメント切開き部の背面地盤は凍結していないが、周辺は凍結されているため、セグメントリング間の温度差により応力が発生している為と考えられる。セグメントの温度計測結果による温度差（約40℃）を用いて補正すると、解析と計測の差1500kN/mに対して、補正值は1440kN/mとなり、ほぼ一致した。

曲げモーメントの比較結果を図4に示す。全体的なモードについては、特に支保工上部に発生する内曲げやセグメント切開き部に発生する外曲げなど、解析と計測が良好な一致を示している。セグメント切開き部では、計測値349kN・m/mが解析値266kN・m/mを上回った。この部分は凍土と未凍土の境界部分であり、解析上の凍土範囲が実際と異なることにより生じたと考えられる。

(2)補強材

内空変位は、左右方向に減少し、上下方向に増加するという定性的傾向は一致したが、左右方向の内空減少量は、解析値12.6mmが計測値20.9mmを下回った。これは、セグメントと同様に温度低下による収縮が発生したことが一因と考えられる。しかし、温度の影響はセグメントより小さいと考えられ、計測値と解析値に若干の差が存在する。

軸力の比較結果を図5に示す。欠損リングについては、上部で計測値が解析値を上回っている以外は、ほぼ一致している。補強柱については、解析値と計測値に大きな差が生じた。これは、図2に示す様に解析上その背面側に凍土圧を作用させていないが、実際には開口部外側の凍土圧作用部に補強柱を設置している為、凍土圧の影響による軸圧縮力が生じているためと考えられる。

曲げモーメントの比較結果を図6に示す。欠損リングと支保工については、解析値と計測値とほぼ一致している。補強柱については、解析値と計測値に大きな差が生じているが、軸力の場合と同様に背面の凍土圧の影響が原因と考えられる。

4. まとめ

凍土圧作用時における2リングモデルの解析結果と計測結果の比較を行い、比較的良好的な一致を見た。また、一致しない部分についても、解析上の仮定と実際の差を考慮することを検証した。このようにして本検討では、シールドトンネルの接続部の三次元的な構造の検討に、二次元の比較的簡易なモデルを使った手法を用いて解析することができた。今後は、更なる検証を深め、簡易なモデル化による合理的な設計や計測管理計画における適切な機器の配置方法等について提案していきたい。

参考文献 1) 土質工学会：土の凍結 -その理論と実際-，1994

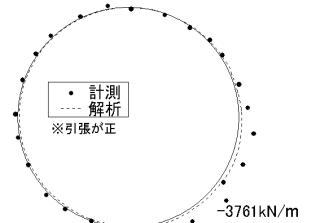


図3 軸力比較結果
(セグメント)

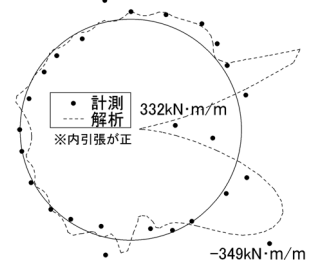


図4 曲げモーメント比較結果
(セグメント)

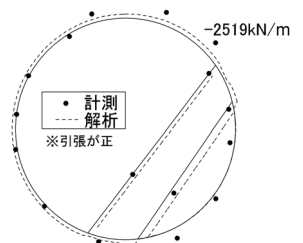


図5 軸力比較結果
(補強材)

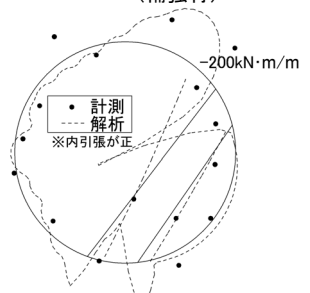


図6 曲げモーメント比較結果
(補強材)