

シンガポールにおける初の凍結施工 その1 ー計画から凍土造成までー

大成建設(株) 国際支店	正会員	多田 博光
大成建設(株) 国際支店	正会員	竹田 智
(株)精研 凍結本部	正会員	○小椋 浩
(株)精研 凍結本部		塩田 仁己

1. はじめに¹⁾

シンガポール地下鉄は、南北線、東西線、環状線、北東線およびダウンタウン線の計5路線が現在営業路線となっている(図1参照)。新線となるトムソン・イーストコースト線は、2013年後半から着工されており、シンガポール北部からチャンギ国際空港方面のスンガイベドックまでをつなぐ全長約43km、31駅からなる路線である。本報では、マリーナベイ地区で施工されたT226工区においてシンガポールで初の施工となった地盤凍結工法について報告する。



図1 既設5路線とトムソン・イーストコースト線

2. 凍結工概要

凍結工はT226工区のうち非開削工事で採用された。非開削工事の全体イメージ図を図2に示す。非開削工事は、既設2営業線(南北線、環状線)トンネルの直下に新駅からそれぞれの既設駅への接続通路となるリンクウェイトンネル(後述はリンクウェイと省略)、さらにその下に上下2本の軌道トンネル(延長40m)を構築する。凍結工はのうち、下段トンネルの掘削防護として採用された。上下トンネル共にSCL(Sprayed Concrete Lining)工法で施工され、上段トンネルは全線にわたりマリンクレイ地盤改良体(JGP: Jet Grouting Pile)を掘削した。下段トンネルは、トンネル掘削天端がちょうどJGP改良体の下端にかかるようになり、

JGPと現地盤であるOA層の境界域を掘削することとなる。この部分はOA層でもC~Eに分類される比較的風化の進んだ地層であり、透水係数も不透水層とされるOA(A)層から1~2オーダー大きくなるため対策が必要となり、凍結工が採用された。

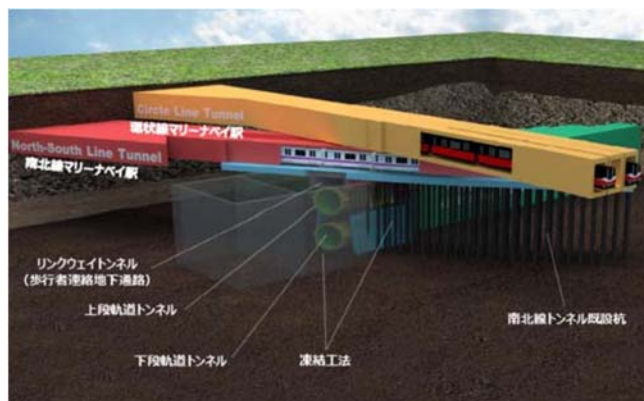


図2 非開削工事全体イメージ図

凍結工は、掘削する下段軌道トンネルの両側に長さ26m(平均)の凍結管を事前に施工したリンクウェイより96本埋設し凍土壁を造成する。凍結管埋設ピッチは一般部で0.9m、既設杭まわりは1.2mとし、計画凍土厚は片側0.9mとした。図3に凍結工平面図を示す。



図3 凍結工平面図

凍土造成は、ブライン温度: -30°C 、初期地中温度: $+30^{\circ}\text{C}$ 、容積含水率: $P=0.5\text{m}^3/\text{m}^3$ 、凍土造成日数は初期地中温度が 30°C と高く、通常日本で行う管列凍結理論では誤差が大きくなるため三次元非定常熱伝導解析²⁾を用いて51日と算出された、冷凍機容量は160kW型冷凍機3台として計画した。

キーワード 凍結工法, シンガポール, 凍土, 凍上

〒112-0002 東京都文京区小石川 1-15-17 (株) 精研 凍結本部 TEL.(03)5689-2351 (代表)

3. 施工にともなう凍上・沈下予測

凍結工施工に先立ち現地地盤を採取し凍上・沈下室内試験を行った．対象となった地盤は JGP 改良 OA(B, C, D), Original OA(B, C, D), Original OA(A)である．これら 3 種地盤の凍上・沈下率を表 1 に示す．

表1 リンクウェイ底面に対する凍上率・沈下率

	凍上率 η (%)	沈下率 η' (%)
JGP OA(B,C,D)	3.12	-3.31
オリジナル OA(B,C,D)	0.43	-1.07
オリジナル OA(A)	0.44	-1.07

凍上沈下試験の結果、JGP OA(B,C,D)層の凍上率および沈下率が大きな値を示した。リンクウェイは凍結部上部に位置する南北線を直接支持しているため既存路線の凍上・沈下量が大きくなる事が懸念された、そこで JGP OA(B,C,D)層の凍結を当初計画より極力減らすこととし根入れ長を 2 m と変更した。凍結範囲縮小後の凍結範囲でのリンクウェイ底面レベルの凍上・沈下予測は図 4 に示す三次元 FEM 解析によると凍上変位 7mm、沈下変位 -5mm となったためリンクウェイから設置した層別沈下計による計測を行いながら慎重に凍土造成および掘削作業を行なった。

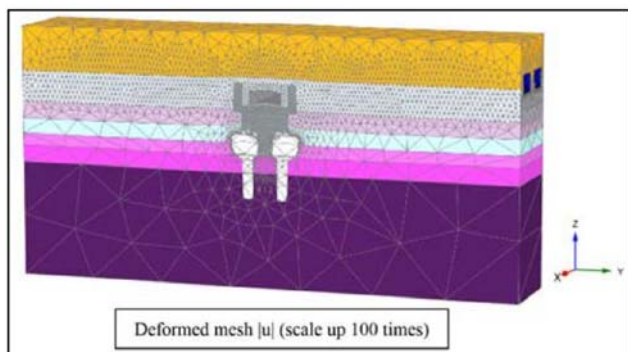


圖 4 三次元地盤變狀解析

4. 凍結工の施工

2017 年 11 月に現地に乗りこみ、凍結プラント設置と並行してブライン配管、冷却水配管を行った。JGP の施工完了後に凍結管・測温管の設置を行い 2018 年 3 月 31 日に凍結運転を開始した。

施工数量は次のようになる。凍結管本数：96 本，
測温管本数：20 本，予定凍結日数：凍土造成 59 日
＋維持 85 日＝144 日

凍結プラントは MS1 立坑脇に設置され MS1 立坑開口より配管を下ろし各凍結管にブラインを供給した。凍結開始前の地中温度測定により初期地中温度が JGP 施工時の発熱により 38℃程度あることが分かった。そこで熱計算を初期地中温度 38℃で再計算したところ凍結日数は 59 日必要なことがわかり凍結日数を変更した。

図 5 に測温管 No.11 の地中温度経時変化グラフを

示す。凍結運転開始後、凍結部上部にわずかに水の動きが温度グラフより確認された(図5 ○部)。原因を探ったところ本現場では凍結管を地下水位以下の深度より埋設しており、凍結管口元から若干の湧水が認められた。そこで凍結管と地山の間の空隙および立坑連壁際をLW充填したところ水の動きがとまり所定の凍結日数で凍土造成を完了した。また、維持期間中には余剰凍土が造成されるのを防ぐため間引き運転を実施し、凍上量を抑制し既設2営業線の運行に支障なく凍結工を終えることができた。また図5グラフ中に破線で示されたBa点Ca点の三次元非定常熱伝導解析による温度降下予想曲線は、実測された地中温度とよく合致し初期地中温度38℃という高い地中温度下でも解析の信頼性があることが示された。

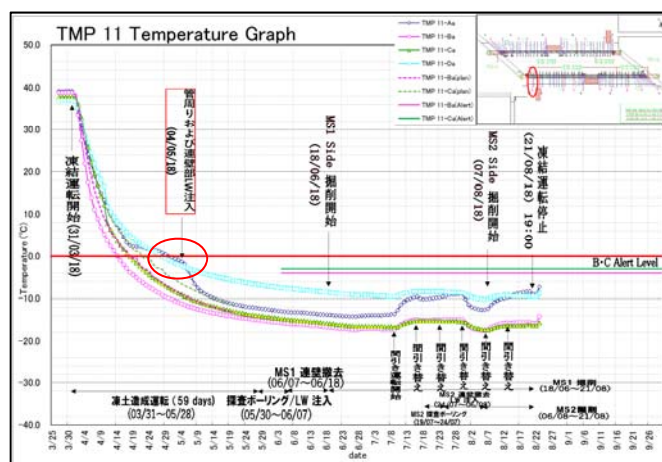


図5 測温管 No.11 地中温度経時変化グラフ

5. まとめ

本報では、シンガポールでは初施工となる凍結工法の計画から凍土造成までを報告した。以下に、この工事から得られた成果を列挙する。

- ・既設 2 営業路線直下という困難な施工条件にもかかわらず、適切な凍結範囲の設定と凍結維持期間中の間引き運転による余剰凍土抑制により列車の運行に支障をきたすことなく施工を終えることができた。
- ・凍結部上部に地下水の動きが見られたが、LW 注入の結果工程に影響を与える事は無かった。
- ・三次元非定常熱伝導解析はシンガポールのような非常に地中温度の高い条件においても精度よく熱解析を行えることが確認できた。

文献

- 1) 橋田薫, 多田博光, 竹田智: 地下鉄営業線直下での駅舎とトンネルの施工の解析と実挙動, トンネルと地下, Vol.48, No.6, 2017
- 2) 松岡啓次, 隅谷大作, 小椋浩: 地盤の凍結・解凍予測のための三次元非定常熱伝導解析, 土木学会論文集 C, Vol.71, No.2, 125-135, 2015