

シンガポール地下鉄工事における凍結施工の設計と評価

大成建設(株) 正会員 ○竹田 智
 大成建設(株) 正会員 多田 博光
 (株)精研 正会員 小椋 浩

1. はじめに

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路線が現在営業している。新線となるトムソン・エーストコースト線は、2013年後半から工事が行われており、シンガポール北部からチャンギ国際空港方面のスンゲイバドックまでを繋ぐ全長約43km、31駅からなる路線である。この中で、T226工区マリーナベイ駅は、南北線と環状線が乗り入れる既設駅に近接して建設された。新駅の付帯工事として、交差する2本の営業線直下に新駅と既設駅を結ぶ歩行者用地下通路と新規トンネル2本を非開削工法で施工した。非開削工事の全体イメージ図を図1に示す。本報は、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、数値解析による予測、工事中的実測値及び逆解析値を報告する。

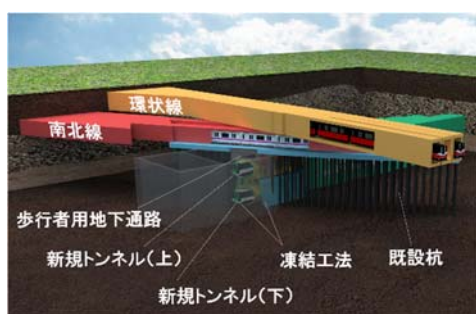


図1 非開削工事全体イメージ図と3次元BIMモデルによる凍土管理状況図

2. 地盤凍結工法概要

地下通路の下位には、上下2本の新規トンネルが位置する。この区間のトンネル掘削は、地下通路の建設時と同様、既設RC杭を除去しながらの掘削となるため、トンネル掘削機(TBM)が使用できない。そのため、トンネル掘削の安全補助工法として、上部軟弱粘土層はジェットグラウト(JGP)で地盤改良を施し、さらに下部の被圧帯水層では地盤凍結工法でトンネルの両側に遮水壁を設けた上でNATM工法を採用した。JGPと地盤凍結工法を併用した理由は、JGPが造成できるのは軟弱粘土層と帯水層の境界部の比較的N値が小さい(N値30以下)高さまでと過去の施工経験と事前の試験施工からわかっていたことにある。また、両層境界に不陸があることから、JGP下端と凍結上端は1mのラップを確保し、止水性を確保した。

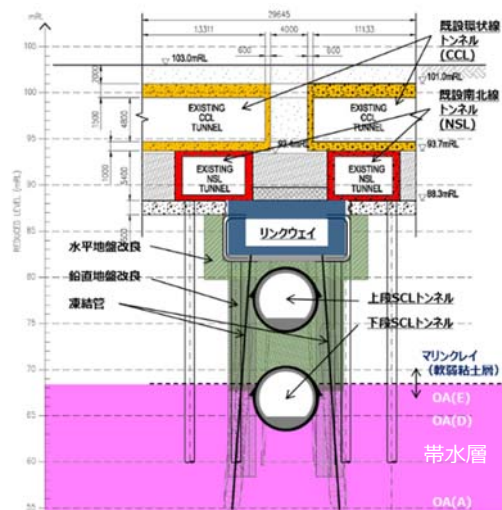


図2 凍結工断面図

図2に示すように、JGPと地盤凍結工法は完成した地下通路(リンクウェイ)内より実施した。地盤凍結工法の計画に際し、現地で採取した土質試料を用いた室内凍結試験により、凍結膨張率と解凍収縮率を測定し、それらの結果を数値解析に反映させた。

3. 三次元有限要素法による予測と実測

当プロジェクトのように既設構造物に新設構造物が複雑に近接する工事において、管理値を満たす施工方法を最適化するためには、一般的な二次元解析で解くことは不可能である。

キーワード 地下通路, ジェットグラウト, トンネル, 地盤凍結工法, 三次元有限要素法

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設株式会社 国際支店土木部 TEL. (03) 3348-1111 (代表)

そのため三次元の数値解析ソフト PLAXIS 3D（2012 年版）を採用し、解析には表 1 の各土質定数を用いた。凍結による膨張収縮量は、PLAXIS 3D の体積膨張・体積収縮機能を用い、各層の凍結膨張係数と解凍収縮係数を入力し計算した。各層から採取した試料の室内凍結試験を実施して決定した凍結解凍の両係数を表 3(黒字)に示す。

4. 実測値と予測値との比較

既設地下鉄の変位量はトンネル内に設置したトータルステーションにより自動計測された。図 3 は南北線地下鉄トンネルの鉛直変位量の経時変化を示す。各施工段階における鉛直変位量の予測値と実績値を表 2 に示す。

表 2 既設地下鉄の鉛直変位予測値と実績値

施工段階	南北線鉛直変位 mm	
	予測値	実績値
地下通路完了・凍結開始	+7.0mm	+2.0mm
凍結完了	+7.0mm	+1.1mm
凍結解除	-5.0mm	-1.2mm
新規トンネル掘削完了	-7.0mm	-1.9mm

ここで、実績値が予測値を下回ったのは、解析精度によるものだけでなく、既往構造物基礎の拘束と剛性の効果、スペックを上回る JGP や凍結、高精度の掘削が寄与したためと考えられる。

5. 逆解析の結果と考察

3D PLAXIS を用いた逆解析では、表 3(赤字)に示す凍結膨張・解凍収縮係数に変更して使用した。

表 3 逆解析で用いた凍結膨張係数と解凍収縮係数

地層	膨張係数 ^{注)} , %	収縮係数 ^{注)} , %
地盤改良後マシクレイ層	+8.07	+0.39
地盤改良後 OA 層風化部	+6.43 → +0.89	-0.10 → -0.62
OA 層風化部	+0.86	-0.63
OA 層新鮮部	+0.89	-0.62

注) +は膨張、-は収縮を表わす。

表 1 代表的地盤定数一覧

パラメータ	単位	盛土砂	マシクレイ層	OA 層	
				風化部	新鮮部
構成則 ^{注 1)}	[-]	HS	HS	HS	HS
湿潤単重	[kN/m³]	20	16	20	21
E_{50}^{ref} ^{注 2)}	[MPa]	8.7	7.3	35.0	60.0
E_{oed}^{ref} ^{注 2)}	[MPa]	8.7	7.3	35.0	60.0
E_{ur}^{ref} ^{注 2)}	[MPa]	26.2	22.0	110.0	190.0
m ^{注 2)}	[-]	0.5	0.0	0.0	1.0
ポアソン比	[-]	0.2	0.2	0.2	0.2
粘着力	[kPa]	0	22	5	10
内部摩擦角	[度]	30	0	32	35
透水係数	[m/sec]	1x10 ⁻⁶	1x10 ⁻⁸	1x10 ⁻⁷	1x10 ⁻⁸

注 1) HS=ハードニングソイル

注 2) E_{50}^{ref} : 標準排水三軸試験での割線剛性,
 E_{oed}^{ref} : 一次圧密荷重の接線剛性,
 E_{ur}^{ref} : 除荷/再載荷時の剛性,
m : 剛性の応力レベル依存性のべき指数

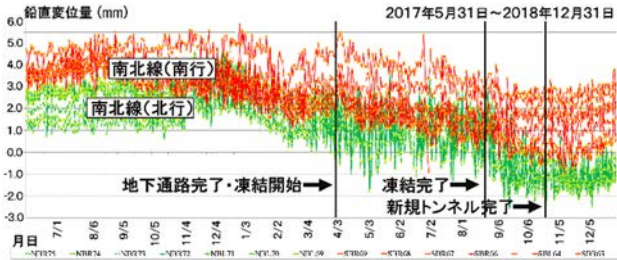


図 3 南北線地下鉄トンネルの鉛直変位実績値

表 4 鉛直変位予測値・実績値・逆解析値

施工段階	南北線鉛直変位 mm		
	予測値	実績値	逆解析値
地下通路完了・凍結開始	+7.0mm	+2.0mm	+2.3mm
凍結完了	+7.0mm	+1.1mm	+1.1mm
凍結解除	-5.0mm	-1.2mm	-1.3mm
新規トンネル掘削完了	-7.0mm	-1.9mm	-3.9mm

表 4 に、南北線地下鉄トンネル鉛直変位の事前予測値、実績値、逆解析値をまとめた。事前予測解析では、凍結凍上および解凍沈下、そしてトンネル掘削の影響が顕著に現れる結果であった。予測解析値と実際の計測値の乖離の理由としては以下が考えられる。

- (1) 室内試験で得られた凍上率が実際にはもっと低かったと考える。室内試験では自由給排水にて実施されるが、それに対して地盤中では給排水が予想より制限されたと考えられる。
- (2) 解析モデルでは、凍結範囲を一樣な鉛直方向に配置された板状にモデル化したため、凍上変位が大きく出たと考えられる。実際の凍土壁の形状は、上下先端部では先細りしており、かつ斜め方向を向いていることから、地盤変状上向き成分は鉛直板状モデルに比較して小さな値になったと推測される。
- (3) 解凍沈下では、南北線地下鉄トンネルは杭支持されていることから解析予測に比べて、実際の挙動においては杭基礎が沈下抑制に想定以上に寄与したと考えられる。

一方、逆解析では、凍結凍上および解凍沈下の影響、凍結下での下段トンネルの掘削影響もトレースできていることが分かった。しかしながら、上段トンネル掘削の影響は、実績値とまだ乖離しており、杭基礎と地盤改良の効果に関して依然として調査する必要があることが判明した。