

シンガポール地下鉄工事におけるトンネル掘削の変位予測と管理手法

基礎地盤コンサルタンツ株式会社 海外事業本部 正会員 ○臼木 陽平
 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 海外事業本部 非会員 折原 敬二

1. はじめに

シンガポールでは、限られた国土を有効活用するため、都市部における道路、鉄道、下水道などのトンネル工事が頻繁に行われている。地下開発の増大に応じて、大断面掘削や近接施工など工事は大型化複雑化し、既設構造物の損傷や陥没事故が増えている。本稿では、シンガポール地下鉄工事における、トンネル掘削により生じる変位予測とリスク管理方法を紹介する。

2. トンネル掘削により生じる変位の予測方法

トンネル掘削により生じる地表面変位の予測は、一般に図1のトンネル断面収縮率 (Volume Loss) V を用いて行われてきた。シンガポールでは、弾塑性有限要素解析プログラムである PLAXIS を使い、せん断強度やヤング係数などの地盤の基本物性に加え、トンネル断面に収縮率 V の体積ひずみを与え、地表面や既設構造物への影響を定量的に求める方法が採用されている。

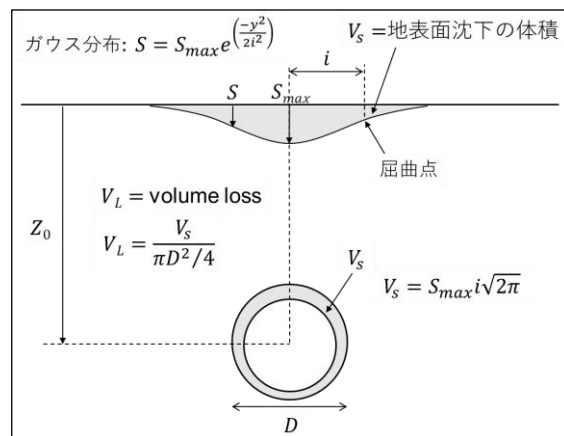


図1 トンネル断面収縮率 V と地表面沈下

シンガポール国土交通庁は、過去のトンネル掘削時に実測した地表面沈下量の時系列データと、地盤、シールドトンネル工法、トンネル規格などの情報を蓄積している。そして、地表面の実測沈下量を、地盤種別およびシールド工法ごとに逆解析し、収縮率 V を決定している。表1は、2010年以降の地下鉄工事をもとに逆解析し決定された V 値一覧である。

表1 パラメータ V の逆解析結果と一般値の一覧 (参考文献1および2)

地盤種別		シールドトンネルの種類	逆解析結果		一般値
			V (%) 平均値	V (%) 上限値	V (%)
沖積層 (カラム層)	海成粘土や、黒色腐植土、緩い砂層	土圧式シールド	0.55	1.5	3.0
	沖積層と他層の境界	土圧式シールド	0.56	1.5	3.0
洪積層 (0A層)	良く締まった礫、砂、粘土の互層	土圧式シールド	0.20	0.5	1.0
堆積岩層 (シユロ層)	新鮮な岩 ~ かなり風化した岩	土圧式シールド	0.28	1.0	1.0
	強風化岩 ~ 残積土	土圧式シールド	0.25	1.0	1.0
	残積土と岩の境界	土圧式シールド	0.60	1.5	1.5
硬地掘削 (フキ)	新鮮な岩 ~ かなり風化した岩	泥水式シールド	0.30	1.0	1.0
		土圧式シールド	0.61	1.5	1.0
	強風化岩 ~ 残積土	泥水式シールド	0.41	1.5	1.0
		土圧式シールド	1.32	3.0	3.0
残積土と岩の境界		泥水式シールド	0.71	2.0	3.0

3. 変位予測の解析事例

トンネル掘削による既設杭への影響を求める解析例を紹介する。図2の解析モデルに示すように、地盤は表層3~5mの盛土層および薄い沖積砂層と、その下位の細粒土混じりの固結した洪積砂層から成り、径6.9mのトンネルの中心軸は、地表から約26mの深さに位置する。既存橋脚の支持杭 (杭径1.0mの場所打ち杭) から最短2m (外々) の位置を、土圧式シールドトンネルが2本通過する。

キーワード：トンネル掘削、変位予測、有限要素法、管理手法、地表面沈下

連絡先：〒136-8577 東京都江東区亀戸1-5-7 錦糸町プライムタワー12階 TEL 03-6861-8885

表1の洪積層の一般値 $V=1.0\%$ の収縮率をトンネル掘削断面に強制的に作用させ、地表面沈下と既設杭に生じる変位と応力を求める。図3は、左のトンネル掘削後に、右側が掘削された際の変位コンター図、および地表面沈下量、支持杭の変位、支持杭に生じる曲げモーメントを示している。

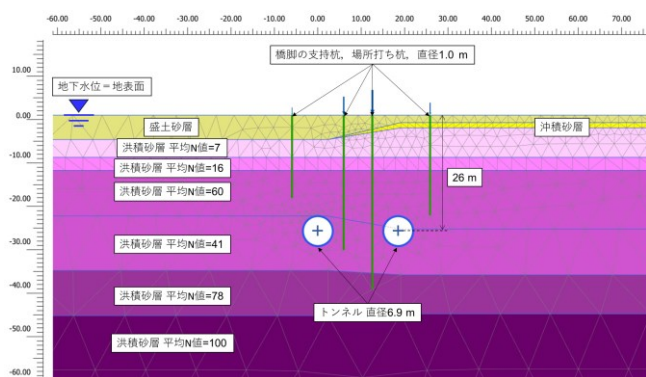


図2 解析モデル

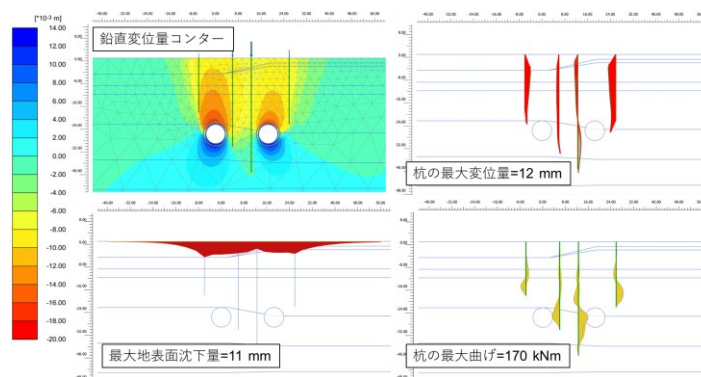


図3 解析結果

4. 管理基準値の設定とリスク対処法

トンネル掘削時には、数値計算による変位量を管理値として、地表面沈下量や杭の変形量を計測管理する。表2は、シンガポール建築監督局が設定した地盤と既存構造物との近接度合いから決まるリスク分類表である。リスクの高低によって、取るべき対処法が定められている。

表2 地盤と構造物の近接度によるリスク分類（参考文献3）

	カテゴリー 1: 新鮮な岩～かなり風化した岩、 もしくは硬い残積土	カテゴリー 2: カテゴリー 1と3以外の地盤	カテゴリー 3: 残積土と岩、もしくは沖積層と 他層との境界
ケース 1: トンネルの影響範囲内に構造物がない場合	リスク：低	リスク：低	リスク：中
ケース 2: トンネルの影響範囲内に構造物がある場合	リスク：低	リスク：中	リスク：高
ケース 3: トンネル直上に構造物がある場合	リスク：中	リスク：高	リスク：高

本解析事例は、カテゴリー2およびケース3の「高リスク」に分類される。高リスクエリアでは、一般値より小さい V 値に基づいて管理値設定を行うよう仕様書で定められている。そのため、本解析事例では、一般値の半分の $V=0.5\%$ から求まる変位値を、橋台および橋脚に設置した沈下計や傾斜計などの管理基準値に設定した。いわば、予測値に安全率をかけて管理値とする考え方である。施工時に管理基準値を超えた場合には、近接構造物と掘進状況の常時点検や設計の見直し、補強工事などの対応策を講じることになる。

一方、変位予測とは別に、トンネルの掘進時には切羽圧力と掘削土の過剰取り込みの管理を行う。工事仕様書では最大最小切羽圧力の計算方法や、掘削土の過剰取り込みがあった場合の工事の一時停止と建築監督局への報告などが規定されている。

5. まとめ

本稿では、シンガポールの地下鉄工事におけるトンネル掘削の変位予測と管理手法を、解析事例を交えて紹介した。過去の計測と最新の解析手法を融合させた手法であり、データの蓄積が数値解析の精度向上と実践的適用に貢献している。今後は、予測値と実測値の比較例を報告したい。

参考文献：1) C.B. Ma, F. Tan, T. Aye (2021), *Volume Loss induced by Tunnelling of Downtown Line and Thomson-East Coast Line Projects, Underground Singapore 2021*

2) Land Transport Authority, *Civil Design Criteria for Road and Rail Transit Systems, E/GD/09/106/A2*

3) Building and Construction Authority, *Requirements on Bored Tunneling Works, APPBCA-2017-11*