

## 双线盾构隧道施工对土体变形的影响

杨帆<sup>1</sup> 赵洪尧<sup>2</sup>

1 南昌轨道交通集团有限公司, 江西 南昌 330013

2 大连海事大学交通运输系, 辽宁 大连 116026

**[摘要]**以南昌地铁2号线东延项目辛家庵站~楞上站区间隧道工程为例,利用有限元程序 ABAQUS,分析了盾构隧道施工不同开挖工序下地表沉降的变化规律,基于选定的开挖工序研究双线隧道埋深和隧道轴间距的变化对地表沉降曲线以及拱顶和拱底位移的影响规律。数值模拟结果表明:随着隧道埋深的增加,地表沉降逐渐减小,沉降槽逐渐变大,对地层扰动的范围增大;拱顶和拱底位移随着隧道埋深的增加而减小;随着隧道间距的变大,地表沉降以及拱顶和拱底的位移逐渐减小。

**[关键词]**隧道建设;盾构法;土体变形;数值模拟;有限元

DOI: 10.33142/aem.v5i10.10025

中图分类号: U459.3

文献标识码: A

## Influence of Double Line Shield Tunnel Construction on Soil Deformation

YANG Fan<sup>1</sup>, ZHAO Hongyao<sup>2</sup>

1 Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., Jiangxi, Nanchang, 330013, China

2 Department of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning, 116026, China

**Abstract:** Taking the tunnel project between Xijia'an Station and Lengshang Station of Nanchang Metro Line 2 East Extension Project as an example, the finite element program ABAQUS was used to analyze the changes in surface settlement under different excavation processes during shield tunnel construction. Based on the selected excavation processes, the influence of changes in the burial depth and axial spacing of the double track tunnel on the surface settlement curve and the displacement of the arch top and arch bottom was studied. The numerical simulation results indicate that as the depth of the tunnel increases, the surface settlement gradually decreases, the settlement trough gradually increases, and the range of disturbance to the formation increases; The displacement of the arch top and arch bottom decreases with the increase of tunnel burial depth; As the spacing between tunnels increases, surface settlement and displacement of the arch crown and arch bottom gradually decrease.

**Keywords:** tunnel construction; shield tunneling method; soil deformation; numerical simulation; finite element analysis

### 引言

随着城市发展的不断推进,地下交通建设已经成为现代城市发展中不可或缺的一部分。双线盾构隧道作为一种主要的地下交通隧道开挖技术,具有高效、安全和环保的特点,因此被广泛应用于地铁、铁路和道路等项目中。然而,盾构隧道开挖过程中会对周围土体产生影响,包括土体变形、沉降和地表建筑物的损害等。土体变形是双线盾构隧道开挖过程中最为关注的问题之一。土体的变形会直接影响到周围建筑物的稳定性和使用安全性,因此对于土体变形的研究具有重要的理论和实践意义。

目前,关于双线盾构隧道引起土体变形的理论研究方法较多,主要有数值模拟法、实测分析法、理论分析法。张煜<sup>[1]</sup>等人通过有限元数值模拟盾构隧道掘进过程的影响,研究埋深、掌子面压力、注浆层弹性模量对地表沉降的影响,并分析衬砌围岩周边节点沉降、土体超孔隙水压变化规律;刘洪洲<sup>[2]</sup>等采用三维有限元方法对盾构施工中影响地表沉降的多种因素进行讨论,计算了注浆量、盾构长度、推进步长、开挖面推进力、盾尾空隙等参数对地层沉降的影响大小,并总结了地层沉降的规律;赵晓彦<sup>[3]</sup>

等以长沙地铁盾构施工项目为工程背景,使用 FLAC3D 数值软件模拟了不同施工参数下盾构施工过程,分析了开挖面支护压力和等代层弹性参数对地表变形的影响,提出了针对工程施工段的盾构施工参数建议值;卢岱岳和王士民<sup>[4]</sup>采用软件 ANSYS 对三种工况类型进行数值模拟。包括:盾尾注浆,开挖卸荷及掌子面推进。通过三方面的对比分析,验证新建盾构隧道对原先开挖后隧道的纵向变形理论分析。任德博、张向远<sup>[5]</sup>基于 ABAQUS 仿真模拟软件对区间隧道掘进过程进行模拟,得出盾构过程中地表沉降的发展规律,对类似工况条件下盾构施工技术的应用具有借鉴意义;刘亚辉、钱劲松<sup>[6]</sup>等通过对合肥地铁四号线翠柏路一天水路站区间小半径曲线隧道的数值模拟计算,总结归纳出不同掘进距离下地表沉降和工地位移的变化规律。通过对双线盾构隧道开挖对土体变形影响的深入研究,可以为相关工程项目的设计和施工提供科学的指导和依据,从而确保地下交通系统的安全稳定运行,并减小其对周围环境和建筑物的不良影响。

### 1 工程概况

根据南昌轨道交通2号线东延工程盾构筹划方案,本区间辛家庵站为接收端,楞上站为始发端。本区间靠近辛家庵

站端线路间距为 13.5m, 靠近楞上站端线路间距为 14.0m。根据轨道专业施工图第一版提资左线 ZDK43+517.000~ZDK43+995.8(478.8m), 右线 YDK43+463.608~YDK44+010.000(546.392m) 为特殊减振段, 其余为一般及中等减振段, 平面图如图 1 所示。该区间隧道外径约 6.6m, 长度约 478.8m, 盾构穿越的土层由上至下依次为杂填土、粉质黏土、粗砂、中砂、砾砂、圆砾和泥质粉砂岩。

图 1 为辛楞区间施工平面图, 南昌地铁 2 号线东延辛家庵站~楞上站区间位于南昌市青山湖湖区, 区间线路出辛家庵站后, 沿上海路向南行进, 依次下穿多个建筑物后向东拐入解放西路, 在解放西路与利民路口东设楞上站。据统计下穿建筑物 23 处, 周边管线 7 条。可见南昌地铁 2 号线盾构下穿建筑物数量多, 位置危险, 因此研究盾构开挖下土体的变形规律, 进而研究土体变形对周遭环境的影响, 寻找有效的控制施工方案, 可以作为后续施工的参考, 对地铁工程的安全施工有积极意义。

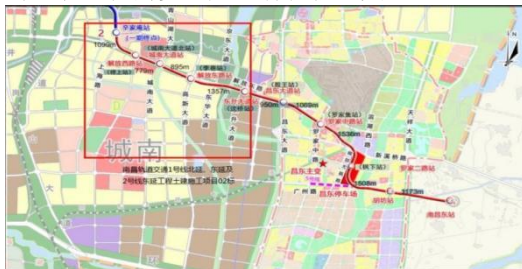


图 1 辛家庵站~楞上站区间平面图

## 2 数值模型建立

### 2.1 模型建立

本文基于南昌轨道交通 2 号线东延项目辛楞区间实际施工土层, 利用 ABAQUS 软件建立三维有限元数值模型, 考虑隧道施工过程中的边界效应, 模型尺寸为: X 方向 80m, Y 方向 60m, Z 方向 40m。土体和管片、注浆层采用空间八结点实体单元 C3D8R 模拟, 盾构外壳采用壳单元 S4R 模拟, 土体模型利用 Mohr-Coulomb 本构模型建立, 具体三维模型及地层分布如图 2 所示。模型边界条件设置为: 模型左、右两侧 X 方向设置水平约束, 前后两侧 Y 方向设置水平约束, 底部 Z 方向设置竖向约束, 模型上表面自由。由于隧道线路方向为辛家庵站~楞上站, 而盾构开挖方向为楞上站~辛家庵站, 所以本模型右侧隧道为实际左线, 左侧隧道为实际右线, 后续提到的左右线均以此为基准。

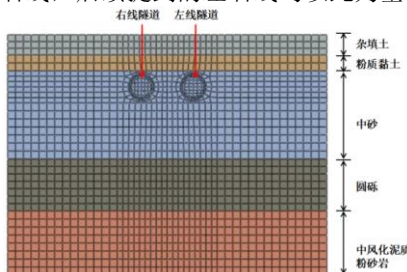


图 2 三维模型图

### 2.2 模型参数

模型建立相关土体参数及结构材料土体参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 土体计算参数

| 材料类型     | 密度<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 泊松比  | 弹性模量<br>(Pa) | 粘聚力<br>(kPa) | 摩擦角<br>(°) |
|----------|----------------------------|------|--------------|--------------|------------|
| 杂填土      | 1000                       | 0.45 | 1e6          | 10           | 10         |
| 粉质粘土     | 1970                       | 0.31 | 8e6          | 24.76        | 16.1       |
| 中砂       | 1960                       | 0.30 | 28e6         | —            | 28         |
| 圆砾       | 2440                       | 0.25 | 35e6         | —            | 36         |
| 中风化泥质粉砂岩 | 2430                       | 0.33 | 4e9          | 400          | 40         |

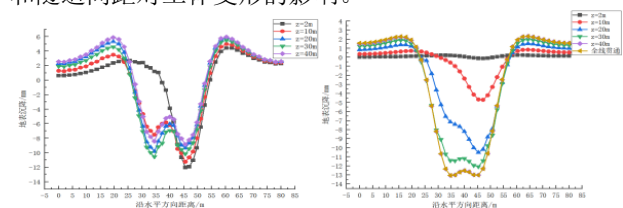
表 2 衬砌和注浆层计算参数

| 材料类型 | 弹性模量 (GPa) | 泊松比  | 密度 (kg/m <sup>3</sup> ) |
|------|------------|------|-------------------------|
| 衬砌   | 34.5       | 0.2  | 2500                    |
| 注浆层  | 22.5       | 0.27 | 2000                    |
| 盾构机  | 210        | 0.3  | 7500                    |

## 3 计算结果分析

### 3.1 工序比选

基于实际工程, 建立双线盾构隧道模型, 设置两种不同的施工工序, 工序一为先将左线隧道开挖贯通, 然后进行右线隧道的开挖, 右线开挖完毕后, 工序结束; 工序二为, 左线右线间距施工, 具体步骤为左线先开挖三步(6m), 左线开挖第四步时, 右线第一步同步开挖, 而后双线同时掘进, 待右线贯通后, 工序结束。通过数值模拟计算结果比较, 确定本模拟的施工工序, 在此工序下分析隧道埋深和隧道间距对土体变形的影响。



(a) 工序一曲线 (b) 工序二曲线

图 3 两种工序地表沉降曲线

图 3 为两种工序下 z=10m 截面随掘进距离变化下的地表沉降曲线。可见工序一的地表沉降曲线形状类似“W”型, 而且是不均匀对称的“W”型, 这是因为本工程为双线施工, 左线先行施工, 右线后行施工, 左线开挖完成施加衬砌管片后对土体也有一定的支撑作用, 因此左线的地表沉降值较右线的地表沉降值大。掘进距离为 2m、10m、20m、30m 时, 对应 z=10 截面处的地表沉降逐渐增大, 当掘进到 30m 时, z=10m 截面处的地表沉降值达到最大 12.6mm, 且最大值出现在左线隧道中心线处。而当掘进距离继续增大时, 地表的沉降有一定的减小, 说明管片支护对控制土体变形具有良好的效果。从图 3 中可以看出, 工

序二的地表沉降曲线为“W”型,且全线贯通后地表沉降曲线为较为均匀对称的“W”型。由此可见,左右线间距施工同时向前掘进的开挖工序,对土体的影响范围基本一致。结合现场环境和盾构机使用情况,故选择工序二作为本模拟的施工工序。

### 3.2 隧道埋深对土体变形的影响

为研究隧道埋深对地表土体变形的影响,分别取隧道埋深为 2D、2.5D、3D、3.5D 时,分析地表沉降、拱顶和拱底位移变化规律,以此来研究隧道埋深对土体变形的影响。

图 4 为其他条件一定时,隧道埋深分别取 2D、2.5D、3D、3.5D 时的地表沉降曲线,不同埋深所对应的最大地表沉降为 13.02mm、11.92mm、10.92mm、8.85mm,随着隧道埋深  $d$  的增加,地表沉降最大值减小,沉降槽宽度逐渐增大,地层扰动的范围逐渐增大。

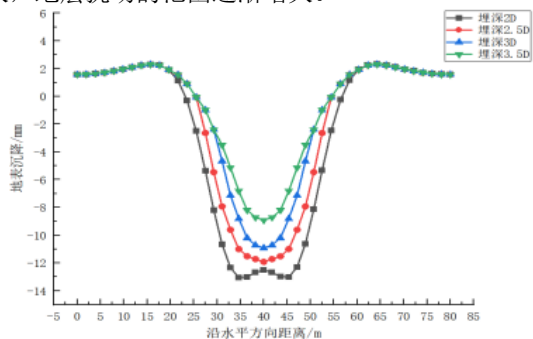
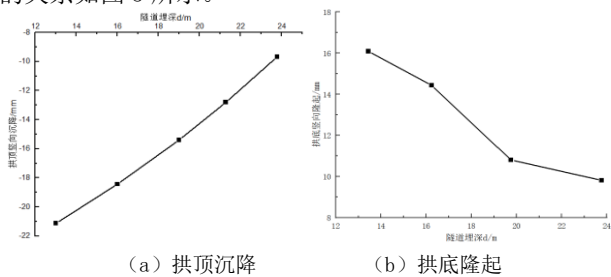


图 4 不同隧道埋深时地表沉降量

隧道的拱顶沉降量和拱底隆起量与隧道埋深  $d$  之间的关系如图 5 所示。



(a) 拱顶沉降 (b) 拱底隆起

图 5 隧道埋深对拱顶拱底位移的影响

取隧道埋深为 2D、2.5D、3D、3.5D,不同埋深对应拱顶竖向沉降分别为 21.32mm、18.83mm、15.96mm、13.23mm 和 9.76mm,拱顶的沉降值随着隧道埋深  $d$  增加而减小。不同隧道埋深对应的拱顶竖向隆起分别为 16.01mm、14.32mm、10.83mm、9.91mm,拱底的隆起值随着隧道埋深的增加而减小。由此可见,隧道埋深对土体变形的影响是显而易见的,埋深越深,对于上部土体的影响也会相对减小。

### 3.3 隧道间距对土体变形的影响

为研究隧道间距对土体变形的影响,分别取隧道间距  $L$  为 14m、16m、18m、20m 时,分析地表沉降、拱顶和拱底位移变化规律,以此来研究隧道间距对土体变形的影响。

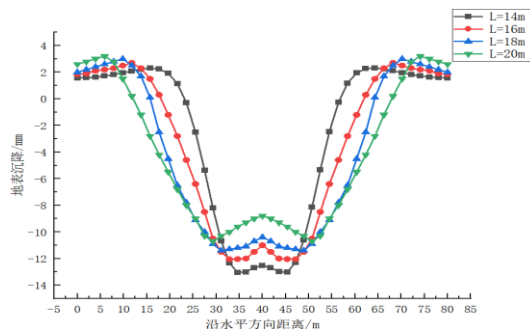
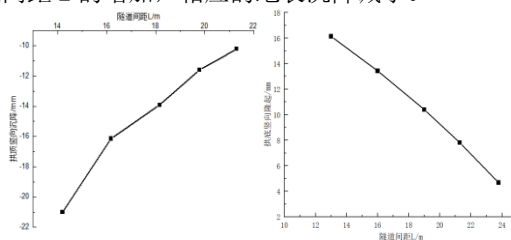


图 6 不同隧道间距的地表沉降量

地表竖向沉降和隧道间距  $L$  之间的结果关系图如图 6 所示。不同隧道间距所对应的地表最大沉降值为 13.02mm、12.05mm、11.4mm、10.7mm。对于地表沉降的影响,随着隧道间距  $L$  的增加,相应的地表沉降减小。



(a) 拱顶沉降 (b) 拱底隆起

图 7 隧道间距对拱顶拱底位移的影响

隧道的拱顶沉降量和拱底隆起量与隧道间距  $L$  之间的关系如图 7 所示。不同隧道间距所对应的拱顶竖向沉降分别为 21.01mm、16.15mm、13.91mm 和 11.35mm,拱顶的沉降随着隧道间距  $L$  的增加而减小。不同隧道间距所对应的拱顶隆起值分别为 16.13mm、13.43mm、10.40mm、7.81mm,由此可见拱底的隆起值随着隧道间距  $L$  的增加而减小。

由上述分析可见,隧道间距对隧道周围土体的影响也是非常明显的,隧道间距越大,对周围土体的影响就越小。

## 4 结论

本论文结合工程实际建立三维有限元模型,对比分析两种开挖工序对土体变形的影响,选择更加合适高效的开挖工序。而后,基于此工序,研究不同隧道埋深和不同隧道间距对地表沉降、拱顶和拱底变形的影响。通过对数值模拟结果的分析,得出以下几个结论:

(1) 先完整开挖左线再进行右线的开挖和左右双线间距施工同时向前掘进所产生的土体位移和衬砌应力和位移的数值较为接近,两种施工工序的影响差别不大。但考虑到现场实际和盾构机使用情况,选择左右双线间距施工的工序施工。

(2) 在其他条件一致的情况下,随着隧道的埋深增加,相应的地表沉降量减小,隧道拱顶的沉降和隧道拱底的隆起值也会减小。可见,隧道埋深增加之后,隧道对周围土体的影响也会减小。

(3) 在其他条件一定时,随着双线隧道间距的增大,

相应的地表沉降量减小,同时隧道拱顶的沉降和隧道拱底的隆起值也会减小。因此,也可以得出双线隧道间距增大后,隧道对周围土体的影响也会减小。

#### [参考文献]

- [1]张煜,王大永,张壮壮,等.天津滨海软土地地铁盾构隧道施工数值模拟分析[J].施工技术(中英文),2022,51(21):17-22.
- [2]刘洪洲,孙钧.软土隧道盾构推进中地面沉降影响因素的数值法研究[J].现代隧道技术,2001(6):24-28.
- [3]赵晓彦,张肖兵,范智浩等.面向地表沉降控制的地铁盾构参数研究[J].工程地质学报,2017,25(2):300-307.
- [4]卢岱岳,王士民,何川,等.新建盾构隧道近接施工对既有隧道纵向变形影响研究[J].铁道学报,2016,38(10):108-116.
- [5]任德博,张向远.盾构隧道施工对路表沉降的影响[J].决策探索(中),2019(6):31-32.
- [6]刘亚辉,钱劲松,王亚飞,等.双线小半径隧道盾构掘进土体位移的影响分析[J].四川轻化工大学学报(自然科学版),2022,35(4):94-100.

作者简介:杨帆(1978—),男,江西南昌人,土木工程专业,南昌航空大学毕业,工作单位 南昌轨道交通集团有限公司。