



在建隧道上方航道开挖区域及时间效应分析*

洪晶晶

(浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘要: 针对新开挖航道与盾构隧道基本同步实施的情况, 研究即将穿越盾构隧道上方航道开挖关键区域, 并根据太沙地基土极限平衡理论, 结合盾构隧道顶部与航道基坑底部距离、盾构隧道直径及土的内摩擦角, 给出沿盾构隧道横向区域开挖关键控制距离。由于软黏土的流变特性, 基于软土蠕变(SSC)模型并利用Plaxis有限元软件对盾构隧道上方开挖过程进行数值模拟, 分析基坑底部、盾构隧道顶处土体变形的特点, 并针对典型工程分析土体变形稳定需要的应力释放时间。结果表明: 土体开挖完成后基坑底部、盾构隧道顶处土体隆起变形仍然会继续随着时间的延长而不断地增加, 直至变形速率趋于稳定; 典型工程开挖完成45 d后, 土体应力已逐步释放, 可为即将穿越的盾构隧道提供安全保障。

关键词: 新开挖航道; 盾构隧道; 土体卸载; 时间效应; 数值模拟

中图分类号: U612.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)08-0235-07

Zone and time effect of channel excavation above tunnel under construction

HONG Jingjing

(Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd., Hangzhou 310030, China)

Abstract: In view of the basically synchronous implementation of the newly excavated channel and the shield tunnel, the key excavation area of the channel above the shield tunnel is studied, and the key control distance along the transverse area of the shield tunnel is given according to the ultimate equilibrium theory of the Terzaghi foundation soil, the distance between the top of the shield tunnel and the bottom of the channel foundation pit, the diameter of the shield tunnel and the internal friction angle of the soil. Due to the rheological characteristics of soft clay, the excavation process above the shield tunnel is numerically simulated on the basis of soft-soil creep (SSC) model and Plaxis finite element software, and the characteristics of soil deformation at the bottom of the foundation pit and the top of the shield tunnel are analyzed. The stress release time required for the soil deformation stability is analyzed for typical projects. The results show that after soil is excavated, the uplift deformation of the soil at the bottom of the foundation pit and the top of the shield tunnel continue to increase with the extension of time until the deformation rate becomes stable. The soil stress is gradually released in 45 d after the typical engineering excavation is completed. The results can provide security for the shield tunnel to be crossed in the future.

Keywords: newly excavated channel; shield tunnel; soil unloading; time effect; numerical simulation

由于城市发展的进程加快, 近年来, 航道建设与地下隧道、管线工程的综合保护案例迅速增加。如何在保证地下隧道、管线等安全运营的情

况下进行航道开挖, 目前还没有一套成熟的设计体系和设计方法, 能同时满足水运及地下隧道、管线的安全控制和相关规范要求。随着未来地铁、

收稿日期: 2024-11-19

*基金项目: 浙江省交通运输厅项目(2022-GCKY-12)

作者简介: 洪晶晶(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港航工程规划及设计。

地下综合管廊等地下盾构隧道建设的涌现，以及航道工程的不断升级改造，此类问题的解决方案亟待进一步探寻和深入的研究。

目前国内基坑开挖穿越隧道以地下市政基坑或建筑基坑为主，对于河道或航道开挖与隧道相互关系的实际案例相对较少。陈红梅等^[1]分析上海西群河河道土方开挖卸载对区间隧道的影响，提出在河道卸土区与隧道间设置水泥土搅拌桩墙支护结构以控制隧道变形的经济合理的工程措施；王国权^[2]借助 MIDAS GTS NX 有限元软件研究宁波软土地区河道分块开挖对正下方轨道交通 1 号线盾构区间的变形影响，并在设计中采取“豆腐式”分块开挖等手段，有效解决了盾构区间过大变形的难题。总体上看主要是土方卸载对既有隧道的影响分析以及相应的工程控制措施进行研究，对软土地基在建隧道影响区内的开挖影响预测方法还不够成熟，规范中更无法对时间效应进行准确计算，因此针对土体开挖的精细化数值模拟研究是目前的主要手段。

传统的基坑设计是基于瞬时设计理念，没有考虑时间因素对于基坑的影响，而大量的基坑工程实践表明，基坑的变形有明显的时间效应^[3]。本文考虑时间效应下，针对航道先行开挖对即将穿越盾构隧道的影响，结合太沙基地基土极限平衡理论，通过 Plaxis 有限元数值模拟分析提出航道先行开挖沿隧道纵向、横向控制范围，同时分析航道开挖后土体变形稳定需要的应力释放时间，为类似工程提供参考，推动航道建设水平的不断提升与发展。

1 工程概况

京杭运河新开挖航道段(简称新开挖航道)起自博陆(里程桩号 K'13+298)，终于八堡(里程桩号 K'39+669)，全长 23.4 km，按限制性Ⅲ级航道双线通航标准设计，其中新建杭海城际铁路在里程桩号 K'26+580—K'26+630 下穿新开挖航道。新开挖航道与杭海城际铁路线位交叉位置见图 1。



图 1 新开挖航道与杭海城际铁路线位交叉位置关系
Fig. 1 Cross-positional relation between newly excavated channel and Hangzhou-Shanghai intercity railway line

新开挖航道规划面宽一般为 70 m，局部特殊段 60 m，航道设计水深 3.2 m，对应航道设计底高程-2.6 m(1985 国家高程,下同)。杭海城际铁路自北向南穿越新开挖航道，分为左、右两线，盾构外径均为 6.7 m，盾构隧道顶部高程均为-9.30 m，距航道设计底高程 6.70 m。该处地面高程在 4.8 m 左右，地貌单元为杭嘉湖冲湖积平原区，根据附近勘探孔显示地质以粉质黏土、淤泥质粉质黏土为主。新开挖航道与杭海城际铁路线位交叉处断面见图 2。

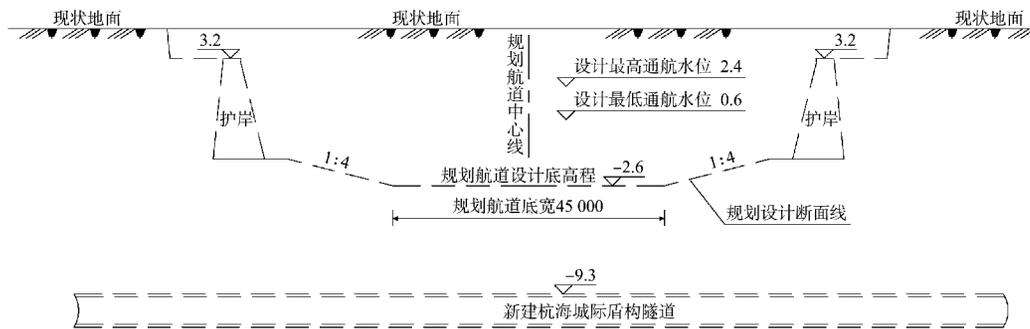


图 2 新开挖航道与杭海城际铁路交叉处断面 (高程: m; 尺寸: mm)
Fig. 2 Cross-section at intersection of newly excavated channel and Hangzhou-Shanghai intercity railway (elevation: m; dimension: mm)

杭海城际铁路盾构与新开挖航道基本同步施工。若铁路建成后再进行航道施工，将对城际铁路造成很大影响，同时将增加铁路隧道保护工程措施。经紧急沟通协调，城际铁路盾构掘进减缓速度，待盾构穿越段航道先行开挖并实施护岸工程后，在保证安全的情况下再实施穿越。

2 数值模型建立

为减少航道土体卸载对即将穿越盾构隧道的扰动影响，在盾构隧道穿越前其上方土体需要尽可能卸载，但新开挖航道沿线一般涉及房屋、管线等构筑物，其征迁进度与工程进度较难协调一

致，航道先行开挖范围往往受限。为此，需要研究即将穿越盾构隧道上方土体卸载规模，为盾构隧道穿越提供保障并有效减少工程投资和政策处理难度。同时杭海城际铁路盾构隧道要求其上方航道土体开挖后需预留一段时间释放应力，待土体变形稳定后进行穿越。

2.1 航道开挖沿盾构隧道纵向区域确定

新开挖航道土方开挖先根据标准断面形式，整体开挖至一定高程，再进行护岸基坑开挖，浇筑护岸，护岸浇筑完成后，墙前临水侧回填土至设计最低通航水位附近进行压载，开挖其余高程以下区域，形成标准断面。典型工程航道土方开挖断面见图 3。

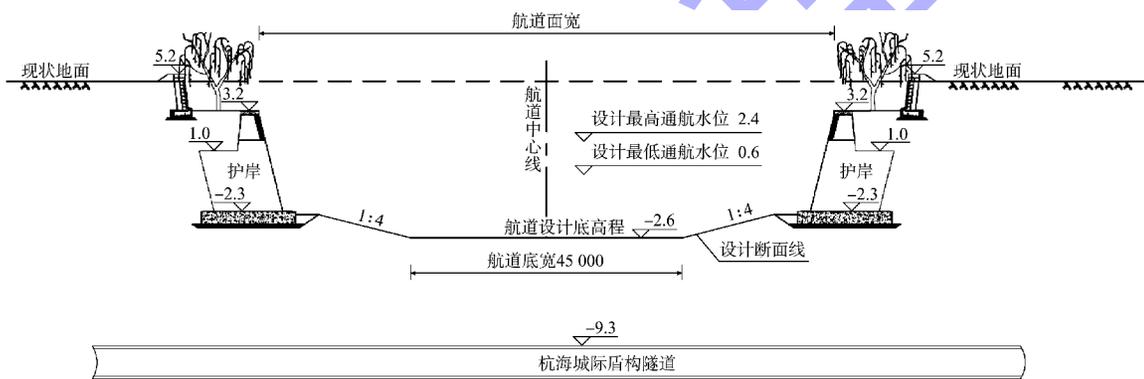


图 3 航道土方开挖断面 (高程: m; 尺寸: mm)

Fig. 3 Section of channel earthwork excavation (elevation: m; dimension: mm)

沿盾构隧道纵向开挖区域为航道设计开挖断面与现状地面合围范围。对于具体航道工程而言，航道标准、尺度确定后，其航道设计开挖断面也随之确定。根据 GB 50139—2014《内河通航标准》^[4]，典型工程盾构隧道穿越处设计断面参数为航道底宽 45 m，设计水深 3.2 m，边坡 1:4，结合周边环境，航道面宽 60~70 m。

2.2 航道开挖沿盾构隧道横向区域确定

潘林有等^[5]基于土体卸载回弹试验的结果得出，基坑开挖卸载后强回弹区的厚度约为开挖深度的 25%。典型工程基坑开挖深度 7.4 m，盾构隧道到基坑底部的距离 6.7 m，故盾构隧道位于一般

回弹区。根据太沙基地基土极限平衡理论^[6]，约束盾构隧道产生隆起变形的土体区域沿隧道横向控制距离 B_K 可按下式计算：

$$B_K = \frac{H_1 + H_2}{\tan(45^\circ - \varphi/2)} = \frac{H_1 + D [1 + \sin(45^\circ + \varphi/2)] / 2}{\tan(45^\circ - \varphi/2)} \quad (1)$$

式中： H_1 为盾构隧道顶部与规划航道设计底高程处距离，m； H_2 为盾构隧道顶部与 $45^\circ - \varphi/2$ 扩展角交于隧道边缘的距离，m； D 为盾构隧道直径，m； φ 为航道设计底高程以下盾构隧道上方各土层内摩擦角的加权平均值，(°)。各参数间的关系见图 4。

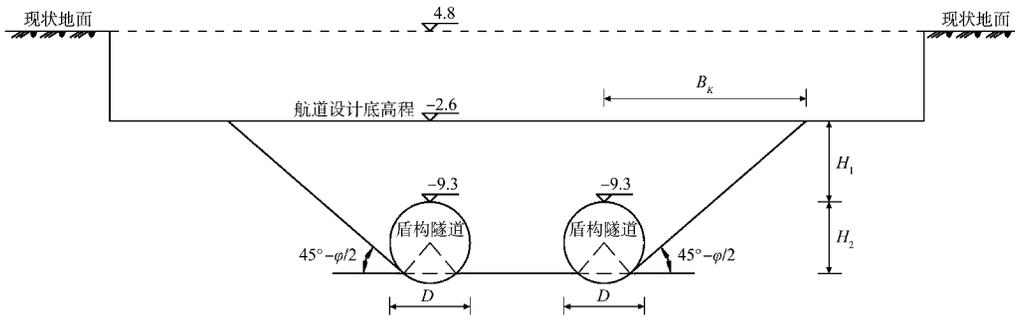


图 4 各参数间的关系 (单位: m)

Fig. 4 Relation of each parameter (unit: m)

根据典型工程地质孔参数可知 $\phi = 14.6^\circ$ 、 $H_1 = 6.7\text{ m}$ 、 $D = 6.7\text{ m}$ ，由式(1)求得 $B_k = 16.5\text{ m}$ 。

本文将重点分析沿在建盾构隧道横向开挖区域，考虑围护结构基坑开挖方式，利用 Plaxis 2D 有限元软件模拟分析沿隧道横向开挖不同范围引起的隧道顶部隆起位移变化情况，进一步验证横向控制距离选取是否合理。同时分析航道土体开挖完成后，在施工间歇期内土体变形稳定需要的应力释放时间。

2.3 计算模型

基坑围护采用厚 600 mm 地下连续墙，地下连续墙入土深度 17.8 m，支撑均采用宽 450 mm、高 450 mm 的钢筋混凝土支撑。为了模拟航道开挖对即将穿越盾构隧道的影 响，计算模型中假设盾构隧道按实体考虑。为了简化计算，同时利用对称性，在 Plaxis 有限元软件中建立二维有限元计算模型，见图 5。

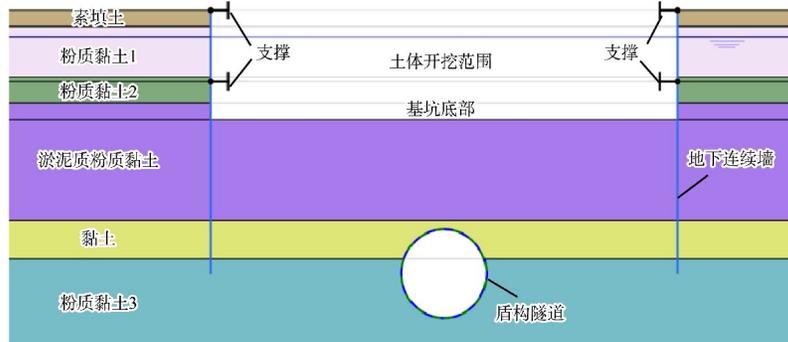


图 5 二维有限元计算模型

Fig. 5 Two-dimensional finite element calculation model

本文主要研究航道开挖过程中存在的时间效应，对于粉质黏土、淤泥质粉质黏土、黏土采用 Vermeer 等^[7] 提出的考虑时间效应的软土蠕变 (SSC) 模型进行模拟；对素填土采用小应变土体硬化 (HS-small) 模型分析。支护结构连续墙、盾

构隧道采用板单元模拟，混凝土支撑采用弹簧单元模拟，通过锚定杆原件实现，连续墙与土体之间相互作用通过界面单元模拟，并通过参数 R_{inter} 对界面单元的强度进行折减。土体及维护结构参数见表 1。

表 1 土体及围护结构参数

Tab. 1 Parameters of soil mass and enclosure structure

材料类别	重力密度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	刚度模量 E/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	压缩指数 $\lambda^*/10^{-3}$	膨胀指数 $\kappa^*/10^{-3}$	蠕变指数 $\mu^*/10^{-3}$	渗透系数 $k/$ $(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$	抗弯刚度 $EI/$ $(\text{MN}\cdot\text{m})$	法线刚度 $EA/$ $(\text{GN}\cdot\text{m}^{-1})$	R_{inter}
素填土	18.0	7	10	10	-	-	-	0.1	-	-	0.70
粉质黏土 1	18.2	-	-	-	33.4	4.8	2.0	4.0	-	-	0.67
粉质黏土 2	19.4	-	-	-	23.2	4.8	2.0	4.0	-	-	0.67
淤泥质粉质黏土	17.8	-	-	-	30.0	5.0	2.4	3.0	-	-	0.67
黏土	18.3	-	-	-	34.8	5.1	2.2	1.0	-	-	0.67
粉质黏土 3	19.5	-	-	-	24.0	4.8	2.4	2.0	-	-	0.67
地下连续墙	-	-	-	-	-	-	-	-	550	18	-
钢筋混凝土支撑	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	-
盾构隧道	-	-	-	-	-	-	-	-	125	12	-

2.4 计算工况

按照计划的施工工序设置计算工况, 见表 2。表中部分时间为假设时间, 预设开挖到基坑底高程 -2.6 m 处共持续 4 d。计算时, 首先初始地应力平衡, 待盾构隧道激活后将位移重置为零, 后续开始围护结构施工及土方开挖模拟。

表 2 计算步设计工况

Tab. 2 Calculation step design conditions

工况	类别	内容	时间/d
1	围护结构	地下连续墙施工	1
2	开挖	从高程 4.8 m 挖至 3.0 m, 施加第 1 道钢筋混凝土支撑	1
3	开挖	基坑降水, 从高程 3.0 m 挖至 0.0 m	1
4	开挖	基坑降水, 从高程 0.0 m 挖至 -2.6 m, 施加第 2 道钢筋混凝土支撑	1
5	间歇	施工间歇期 1	5
6	间歇	施工间歇期 2	10
7	间歇	施工间歇期 3	15
8	间歇	施工间歇期 4	15

基坑分步开挖的步骤为: 第 1 次开挖到地下 1.8 m 深处, 施加第 1 道钢筋混凝土支撑, 支撑间距 5 m, 用时 1 d; 第 2 次开挖到地下 4.8 m 深处, 并对基坑进行降水, 用时 1 d; 第 3 次开挖到地下 7.4 m 深处, 施加第 2 道钢筋混凝土支撑, 支撑间距 5 m, 并对基坑进行降水, 用时 1 d。

分析过程对基坑降水进行简化, 坑内地下水

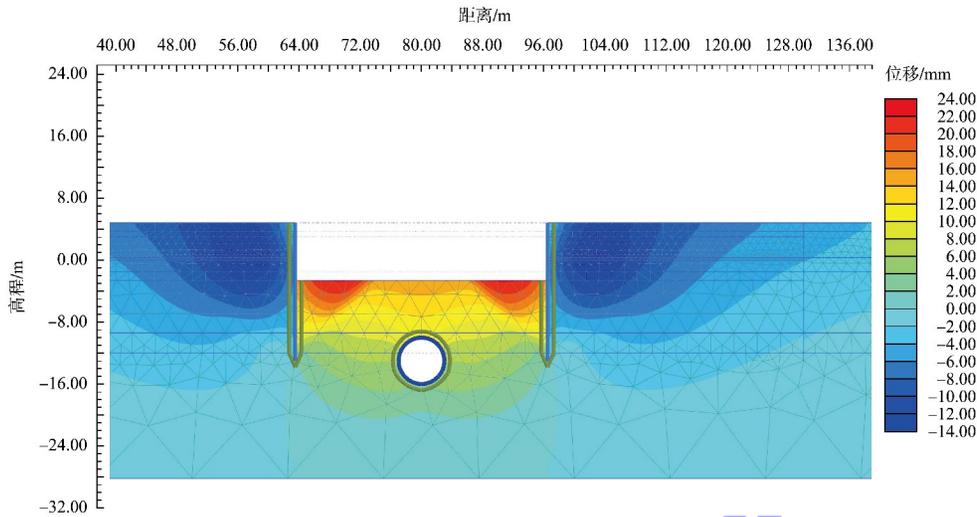
位线始终保持与坑底重合, 坑外地下水位随着距坑边距离的增加, 地下水位线逐渐升高, 距坑边较远处的地下水位保持初始状态。为了反映基坑开挖完成后土体变形稳定需要的时间, 特意设置 4 次施工间歇期以进行分析。

3 计算结果分析

航道沿盾构隧道横向开挖卸载边界(或围护结构边界)距隧道中心水平距离 16.5 m 时, 基坑开挖至底部(高程 -2.6 m)后(工况 4)隆起位移云图见图 6。

基坑开挖后, 围护结构向基坑内侧变位, 被动区土体类似三轴拉伸状态, 由此产生被动区土体的三轴拉伸剪切变形, 造成坑底隆起。由图 6 可以看出, 基坑开挖至底部(高程 -2.6 m)时, 坑底隆起形状表现为两边大中间小, 说明坑底除了弹性隆起外, 还发生显著的塑性隆起变形, 坑底隆起规律与郑刚等^[8]在软土地区深基坑坑底隆起变形问题中的分析基本一致; 此时盾构隧道顶部位移为 10.1 mm。

在基坑围护结构条件下, 沿隧道横向开挖不同范围时, 基坑开挖完成后盾构隧道顶部(高程 -9.3 m)处隆起位移随横向开挖范围变化曲线见图 7。



注：位移最大值为 22.3mm。

图 6 基坑开挖至底部时隆起位移云图

Fig. 6 Nephogram of uplift displacement when foundation pit is excavated to bottom

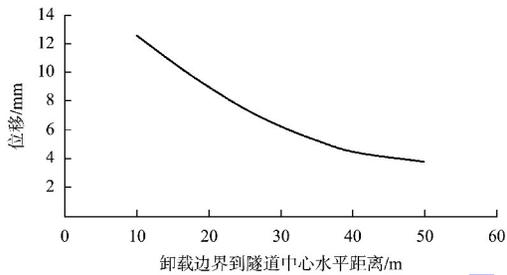


图 7 盾构隧道顶部处隆起位移

Fig. 7 Uplift displacement at top of shield tunnel

由图 7 可以看出，随着沿隧道横向开挖范围变大，卸载边界到隧道中心水平距离变远，盾构隧道顶部隆起位移逐渐减小，直至趋于稳定。这主要是随着基坑开挖深度的增加，基坑内外的土面高差不断增大，该高差所形成的加载作用将使得围护结构外侧土体产生向基坑内的移动，同时坑外地层的竖直沉降、基坑围护结构的变位都会对隧道隆起位移产生影响，当卸载边界距离隧道水平中心越近，对隧道隆起位移影响也就越大。当卸载边界距隧道中心水平距离在横向控制距离 16.5 m 之外时，盾构隧道顶部处位移已基本小于 10 mm，对盾构隧道的影响已在 DB33/T 1139—2017《城市轨道交通结构安全保护技术规程》^[9] 的控制值内，也说明按式(1)确定的横向控制距离较为合理。

在基坑围护结构条件下，航道沿盾构隧道横向开挖，卸载边界距隧道中心水平距离 16.5 m 时，从支护结构施工、表层土开挖到开挖完成，然后施工间歇期整个施工时序内的盾构隧道顶部(高程-9.3 m)处隆起位移随时间变化曲线见图 8。

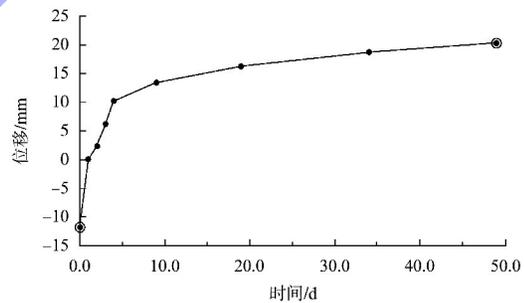


图 8 盾构隧道顶部处隆起位移随时间变化曲线

Fig. 8 Curve of uplift displacement at top of shield tunnel with time

由图 8 可以看出，在开挖初期，盾构隧道顶部隆起位移较小，随着开挖深度增加，隆起位移急剧增加直至基坑开挖完成(4 d)，随着时间推移，盾构隧道顶部隆起继续增加，在开挖完成 15 d 后(19 d)隆起位移虽有增加但趋势已逐渐变缓，在开挖完成 45 d 后(49 d)隆起位移已趋于稳定。上述与金荣^[10]通过对基坑施工过程中变形监测成果分析得出即使在开挖结束后，基坑周围土体变形仍然会继续随着时间的延长而不断增加，

直至变形速率趋于稳定的分析相一致。

针对典型工程,在开挖完成 15 d 后隆起位移达到 16.3 mm,较开挖完成后 15d 内隆起位移增加 6.2 mm,增加约 61.4%,隆起速率 0.41 mm/d;在开挖完成 30 d 后隆起位移达到 18.7 mm,较开挖完成 15 d 后隆起位移增加 2.4 mm,增加约 14.7%,隆起速率 0.16 mm/d;在开挖完成 45 d 后隆起位移达到 20.3 mm,较开挖完成 30 d 后隆起位移增加 1.6 mm,增加约 8.6%,隆起速率 0.11 mm/d。通过上述数据分析,当开挖完成 15 d 后隆起位移虽有进一步增加但增长速率已大幅减缓,且隆起速率由 0.41 mm/d 减少至施工间歇期 3 内的 0.16 mm/d、施工间歇期 4 内的 0.11 mm/d,说明此时航道开挖后土体应力已逐步释放,土体变形基本趋于稳定。

4 结语

1) 在建盾构隧道与新开挖航道交叉处,对先航道开挖后盾构通过的情况,为减少航道土体卸载对即将穿越盾构隧道的扰动影响,需要先行沿隧道横向与纵向区域进行开挖。根据太沙基土极限平衡理论,结合盾构隧道顶部到航道基坑底部距离 H_1 、盾构隧道直径 D 及土的内摩擦角 φ ,本文给出典型工程沿盾构隧道横向区域开挖关键控制距离 16.5 m,并用 Plaxis 有限元对其进行数值模拟分析,计算结果表明利用式(1)确定的横向控制距离较为合理,可供类似工程参考。

2) 由于软黏土本身具有流变特性,当典型工程航道土体开挖完成后,即将穿越盾构隧道顶部处隆起位移仍然会继续随着时间的延长而不断增加。当航道开挖完成 15 d 后隆起位移虽有进一步增加但增长速率已大幅减缓,且隆起速率由 0.41 mm/d 减少至施工间歇期 3 内的 0.16 mm/d、施工间歇期 4 内的 0.11 mm/d,说明此时航道开挖后土体应力已逐步释放,土体变形基本趋于稳定。

3) 对先航道开挖后盾构隧道通过施工的情况,航道开挖完成后土体应力释放时间与施工工艺及施工质量也有密切的关系。在实际工程中应

根据土质情况,利用数值模拟结果结合现场施工监测分析综合确定。

参考文献:

- [1] 陈红梅,顾珍苗.上海西群河开挖对地铁 12 号线的影响分析及保护方案设计[J].城市道桥与防洪,2016(5): 239-244.
CHEN H M, GU Z M. Influence analysis and protection scheme design of Shanghai Xiqun River excavation on Metro Line 12[J]. Urban roads bridges & flood control, 2016(5): 239-244.
- [2] 王国权.河道开挖对正下方盾构隧道变形影响分析[J].土工基础,2021,35(3): 290-296.
WANG G Q. Impact analysis of river excavation on the deformation of an underlying shielded tunnel [J]. Soil engineering and foundation, 2021, 35(3): 290-296.
- [3] 陈乐意,周立,吴兵.考虑时间效应的基坑变形数值分析[J].南昌航空大学学报(自然科学版),2013,27(3): 87-92, 97.
CHEN L Y, ZHOU L, WU B. Numerical analysis of deformation of foundation excavation considering influences of time-effect [J]. Journal of Nanchang Hangkong University(natural sciences), 2013, 27(3): 87-92, 97.
- [4] 内河通航标准:GB 50139—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
Navigation standard of inland waterway: GB 50139-2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [5] 潘林有,胡中雄.深基坑卸载回弹问题的研究[J].岩土工程学报,2002,24(1): 101-104.
PAN L Y, HU Z X. Experimental study on the resilience of pit under unloading [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2002, 24(1): 101-104.
- [6] 顾晓鲁,郑刚,刘畅,等.地基与基础[M].4版.北京:中国建筑工业出版社,2019.
GU X L, ZHENG G, LIU C, et al. Foundation and foundation [M]. 4th Ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [7] VERMEER P A, NEHER H P. A soft soil model that accounts for creep [C]//BRINKGREVE R B J. Proceedings of the International Symposium Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 1999: 1-13.