

文章编号:1005-0523(2019)04-0113-06

隧道群上方土体开挖对隧道竖向变形影响分析

熊伟¹, 陈江², 陈昌平³, 徐长节^{1,4}

(1. 华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 浙江省交通投资集团有限公司, 浙江 杭州 310000; 3. 杭州市城东新城建设投资有限公司, 浙江 杭州 310000; 4. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310000)

摘要:地铁上方土体大面积开挖时,因为卸荷作用,土体会发生隆起,同时土体下方的隧道也会伴随出现变形,变形过大将会影响列车的安全运行。如何控制开挖土体引起的隧道竖向变形是一个非常重要的问题。以杭州某河道开挖工程为研究对象,运用ABAQUS有限元软件进行数值模拟,建立三维模型,分析隧道上方土体开挖顺序对隧道的竖向变形影响。分析结果表明:隧道群上方土体开挖应优先开挖埋深较浅隧道上方的土体,同时尽可能保证开挖区域的对称性,以减小隧道不均匀变形。本文的研究结果可为今后的类似工程提供借鉴。

关键词:铁路隧道;开挖顺序;数值计算;河道开挖;隧道群;三维模型

中图分类号:U25

文献标志码:A

随着社会的发展,城市地铁系统广泛分布在城区,工程中经常会遇到临近地铁隧道的基坑开挖情形。基坑开挖,必然会导致土体应力状态的改变,基坑底部一定范围内的土体会发生回弹,从而可能导致周边地铁隧道产生附加位移,隧道管壁破坏,造成巨大经济损失^[1-3]。因此,针对基坑开挖施工情况下地铁隧道的变形进行研究具有很重要的工程实际意义。理论计算方面,陈郁和李永盛利用 Mindlin 弹性半空间应力解并通过弹性地基梁理论得到求算隧道隆起的定量计算方法,求出隧道最大隆起值^[4]。张治国等提出了基坑开挖对临近隧道纵向变形影响的两阶段分析方法^[5]。黄栩提出了一种盾构隧道上方卸荷作用条件下,引起隧道横向变形的简化计算方法,分析了影响隧道纵向变形的因素^[6]。现场实测方面,郑刚、刘庆晨等研究了不同施工阶段的地铁箱体及轨道变形规律及特点,以及加固措施对隧道纵向的影响^[7]。魏纲和李钢通过对基坑开挖阶段的地表和建筑物监测,研究了加固措施对于地表和建筑物沉降的影响^[8]。郭鹏飞、杨龙才等通过对国内 39 例相关工程分类总结,研究了影响隧道隆起变形的因素^[9]。有限元模拟方面,Marta Dolezalova 采用二维有限元模拟了布拉格某办公大楼的深基坑开挖对其下复杂隧道的影响,与实测数据吻合较好^[10]。高广运、高盟等运用 FLAC3D 软件建立了三维模型,对基坑施工进行了全过程动态模拟,发现单侧基坑开挖将引起隧道不对称变形^[11]。高文伟、向伟明等通过三维有限元分析手段,评估基坑开挖对地铁隧道线路造成的影响,预测地铁区间隧道最大位移^[12]。黄爱军、王德育等以上海地铁 2 号线上方的地下通道为背景,通过有限元法,分析了影响隧道回弹的主要因素^[13]。这些研究仅是针对单线隧道进行的。随着城市地铁线路的修建,隧道数量越来越多,情况也越来越复杂。已建隧道群附近进行基坑施工的情况越来越多。

为了降低基坑开挖对临近既有隧道的影响,专家学者提出了多种措施如:对土体进行加固^[14-16]、浇筑底板、设置抗拔桩^[17]、分步开挖、对称开挖^[18]等。本文将依托某河道开挖工程,根据已有的监测数据,通过有限元 ABAQUS 建立三维模型,研究隧道群上方土体不同顺序开挖对于隧道隆起变形的影响,并提出一种较为合理的开挖顺序。

收稿日期:2019-01-23

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB057801);国家杰出青年科学基金项目(51725802)

作者简介:熊伟(1993—),男,硕士研究生,研究方向为基坑围护。

1 工程背景

杭州某河道整治工程需要进行疏通及河堤改造,即需要对河道进行大规模开挖施工。河道下方为5条既有地铁隧道,分别为地铁1号线左、右线,地铁1号线出段线,地铁4号线一期出、入段线。河道底部与地铁1号线左右线隧道顶净距离分别为12.76 m与12.91 m,距离1号线出段线盾构隧道顶的净距为7.24 m,与4号线一期出入段线盾构隧道顶的净距均为8.41 m,如图1所示。

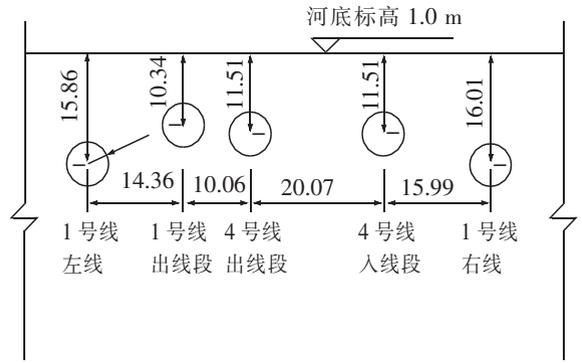


图1 河道横剖面图(单位:m)
Fig.1 Cross-sectional drawing (Unit: m)

2 有限元数值模拟

2.1 河道开挖的步骤

本着分块开挖、分层开挖、对称开挖的原则,河道开挖过程如图2所示。纵向开挖顺序为:N1,N5,N11,N3,N9,N2,N10,N4,N7,N6,N8。在实际施工中为了保证施工安全,土方开挖不仅分区域开挖,同时也分块、分层进行开挖。以1-1剖面为例,土方分3层开挖,首先开挖A区域土;第二步开挖B区域土,分两部分进行开挖;第三步开挖C区域土,同样分两部分开挖,具体开挖顺序如表1所示。

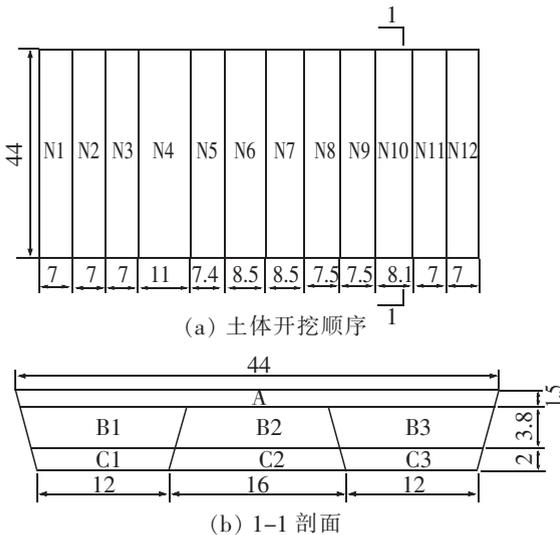


图2 河道开挖施工图(单位:m)
Fig.2 Construction drawing of riverway excavating (Unit: m)

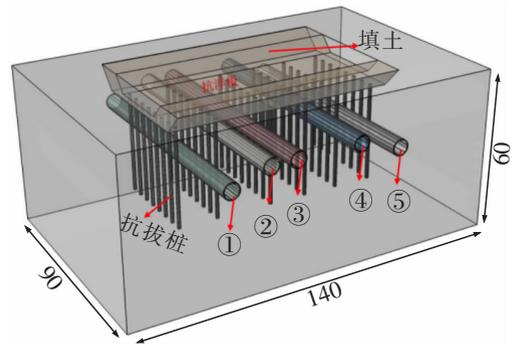
表1 河道开挖横向分层分条施工步

Tab.1 Construction step of riverway excavating

施工步	工况
1	开挖A层土体,层厚1.5 m
2	开挖B层土体,层厚3.8 m,同时开挖B1和B3土块
3	开挖C层土体,层厚2.0 m,同时开挖C1和C3土块
4	浇筑C1,C3区域抗浮压板,并回填河道边坡区域
5	依次开挖B2层和C2层土体
6	浇筑C2区域抗浮压板

2.2 模型的建立

采用相对比较成熟的ABAQUS商业程序进行数值模拟。未消除边界效应的影响,分析模型取140 m×90 m×60 m,开挖区域85 m×44 m×7.3 m。见图3。土体假设为理想的弹塑性体,采用Drucker-Prager模型。衬砌、抗拔桩和抗浮板为材料均匀的线弹性体。土体、衬砌、抗拔桩、抗浮板等的物理参数见表2。



注:①-1号线左线;②-1号线出段线;③④-4号线出、入段线;⑤-1号线右线

图3 有限元模型
Fig.3 Finite element model

表2 材料参数
Tab.2 Mechanics parameters

材料类型	天然重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	厚度 h/m	摩擦角 $\beta/(\text{°})$	屈服应力比 k	屈服应力 σ_s/kPa
等效粉砂层	18.9	16.17	0.31	15.9	46	0.75	12.8
等效粘土层	17.5	74.5	0.25	27.4	20.2	0.89	7.15
等效基岩层	20	5e3	0.22	16.7	54.8	0.68	46.1
衬砌	25	29 300	0.2	0.35			
抗浮板	25	3 000	0.2	0.8			
抗拔桩	25	3 000	0.2				

2.3 监测数据与计算数据对比

实际工程中,N3区域开挖完成后,1号出段线和4号出段线的沉降累计最大变化量超过了累计报警值,为了地铁运营的安全,暂停施工开挖,组织专家进行讨论。由于1号线左线与4号线出段线竖向变形最为明显,所以选取N3区域开挖完成时这3条隧道来进行比较。隧道监测共布置了5个监测点,见图4,选取拱顶监测点A的数值进行比较。Y轴表示隆起位方向,X轴表示隧道轴线方向,以右为正向。两条隧道数值计算和实测结果对比如图5所示。

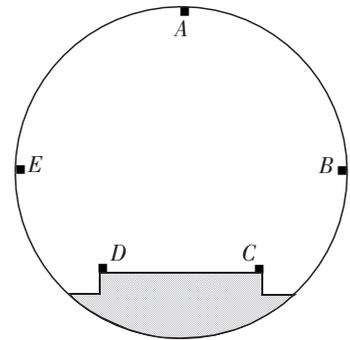
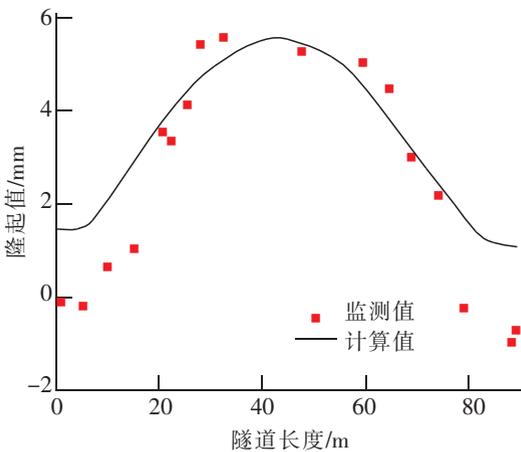
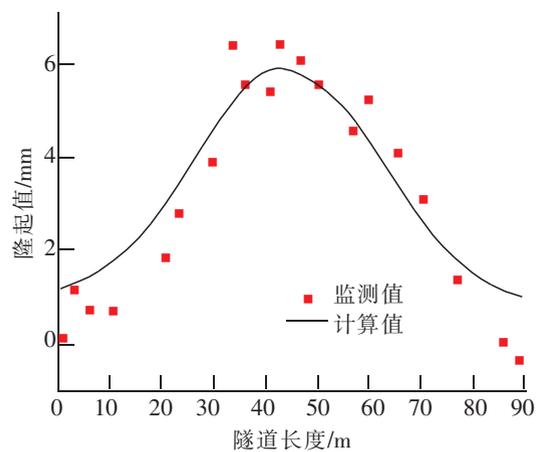


图4 监测点布置图

Fig.4 The layout of monitoring points



(a) 1号线左线



(b) 4号线出段线

图5 监测结果与计算结果对比

Fig.5 The comparisons between monitoring results and calculation results

由图5可知,1号线左线、1号线出段线和4号线出段线,3条隧道最大竖向位移都出现在隧道中部,两端竖向变形较小,变形趋势与实测数据相符。在数值上,1号线左线和4号线出段线的最大竖向位移分别为2.28 mm和6.01 mm,与实测值差别很小。通过对比,表明模型计算可以合理体现出河道开挖对下部隧道群的影响规律。也说明模型中土体的弹塑性模型、衬砌、抗拔桩、抗浮板的线弹性模型及参数、模型的简化形式是合理的。

3 开挖顺序对隧道竖向变形的影响

3.1 不同开挖顺序下隧道最终竖向变形

为了研究土体开挖顺序对于隧道的影响,设计3种方案与原来方案进行对比,选出一种最为合理的开挖顺序,以减小隧道的竖向变形。

方案一: N1-N11-N10-N2-N3-N9-N8-N4-N5-N7-N6,原则上尽可能使开挖区域对称,降低因为受力不平衡引起的偏心力的影响。

方案二: N1-N11-N3-N9-N2-N10-N4-N8-N5-N7-N6,原则上优先开挖埋深较大的隧道上方的土体和下方没有隧道的上方土体,再施工较危险隧道上方的土体。

方案三: N3-N4-N5-N8-N9-N1-N2-N10-N11-N6-N7,优先开挖埋深较浅隧道上方的土体,再施工埋深较大的隧道上方的土体。

这3种方案可以通过改变ABAQUS中分析步的顺序来实现。

从图6可知,方案一,各条隧道的竖向变形都有所减小,1号线左右和出段线、4号线出入段线分别减小了:0.57,0.56,1.28,0.23,0.13 mm;方案二,各条隧道的竖向变形都有所增加,增加数值较大,1号线左右和出段线、4号线出入段线分别增大了:3.06,3.64,1.69,0.59,4.23 mm。同时1号线左、右线,出段线和4号线入段线隧道的最大竖向位移的位置有所偏移;方案三,1号线左线竖向变形有显著减小,最大变形减小到1.93 mm,但是4号线入段线的竖向变形有所增加,增加了2.37 mm。

3.2 不同开挖顺序隧道竖向位移变化过程

河道开挖是动态过程,在这个过程中隧道的隆起是在不断变化的。现对方案一的开挖过程中各条隧道最大竖向位移变化进行分析。

从图7发现,埋深较大的隧道受到的影响较小,竖向变形较小;埋深较浅的隧道受到影响较大,竖向变形较大。选取方案一中1号线出段线作为研究对象,在开挖N3,N4,N5区域土体时,竖向变形明显增大,分别增加了1.64,9.17,2.79 mm;在开挖N2,N6区域时,竖向变形增加较小,分别增加了0.25,0.55 mm;在开挖其他区域土体时,竖向变形可能增大,如开挖N1区域,隧道最大竖向变形增加了0.08 mm。也可能减小,如开挖N7区域,隧道最大竖向变形减小了0.15 mm,总的来说变化很小。其他方案中1号线出段线同样是在开挖N3,N4,N5区域时竖向变形明显增大;N2,N6区域竖向变形增加较小;开挖其他区域,竖向位移变化不大。通过分析可知,隧道正上方的土体开挖。对隧道影响最大,距离隧道越远的土体

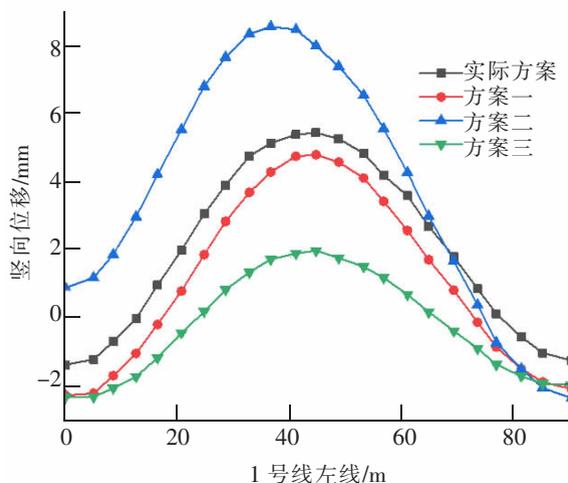


图6 不同方案下1号线左线竖向位移
Fig.6 The vertical displacement of the No.1 left line under different schemes

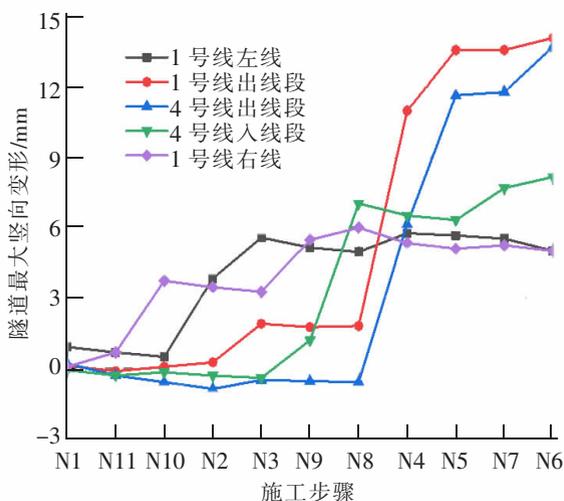


图7 方案一各条隧道最大竖向位移变化
Fig.7 The max vertical displacement of the tunnels under NO.1 scheme

被开挖对隧道影响越小。

通过对几种方案下土体开挖完成后,几条隧道竖向变形进行比较,方案一与方案二可以有效减小1号线出断线,4号线出、入段线这3条埋深最小隧道的隆起;同时方案一相较于方案二对于控制1号线左、右线的竖向位移效果明显。综合考虑方案一的土体开挖顺序对于隧道群整体的影响较小,其开挖顺序较为合理。

4 结论

以杭州市某河道开挖工程为背景,采用ABAQUS有限元软件进行数值模拟,建立三维模型分析了隧道群上方土体不同顺序开挖对于隧道隆起的变形影响,得到以下结论:

1) 对于隧道群上方的土体进行开挖,要尤其注意埋深较浅的隧道,这种隧道在开挖过程中,受到的影响较大。优先开挖埋深较浅的隧道上方的土体,再开挖埋深较大的隧道上方的土体,能够减小埋深较浅隧道的竖向变形。

2) 开挖隧道群上方的土体时,应尽可能使开挖区域对称,减小因为受力不平衡引起的隧道不均匀变形。

3) 隧道上方土体开挖对于下部隧道的的影响随着开挖区域与隧道的距离增大而减小,开挖隧道正上方的土体,隧道隆起明显增加,开挖远离隧道区域的土体,隧道可能发生隆起也可能发生下沉,但影响较小。

参考文献:

- [1] CHANG C T, WANG M J, CHANG C T, et al. Repair of displaced shield tunnel of the Taipei rapid transit system[J]. *Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2001, 16(3): 167-173.
- [2] SHI J, NGC W W, CHEN Y. Three-dimensional numerical parametric study of the influence of basement excavation on existing tunnel[J]. *Computers & Geotechnics*, 2015, 63: 146-158.
- [3] 郭鹏飞, 杨龙才, 于正. 上方开挖卸荷作用下地铁隧道的实测数据分析[J]. *华东交通大学学报*, 2017, 34(2): 20-28.
- [4] 陈郁, 李永盛. 基坑开挖卸荷引起下卧隧道隆起的计算方法[J]. *地下空间与工程学报*, 2005, 1(1): 91-94.
- [5] 张治国, 张孟喜, 王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. *岩土力学*, 2011, 32(7): 2085-2092.
- [6] 黄栩. 卸荷条件下盾构隧道变形的简化计算方法[J]. *城市轨道交通研究*, 2015, 18(9): 40-42.
- [7] 郑刚, 刘庆晨, 邓旭, 等. 基坑开挖对下卧运营地铁既有箱体影响的实测及分析[J]. *岩土力学*, 2012, 33(4): 154-161.
- [8] 魏纲, 李钢. 预加固基坑开挖引起的地表与建筑物沉降实测分析[C]// 2014 中国隧道与地下工程大会, 2014.
- [9] 郭鹏飞, 杨龙才, 周顺华, 等. 基坑开挖引起下卧隧道隆起变形的实测数据分析[J]. *岩土力学*, 2016(S2): 613-621.
- [10] DOLE ALOVÁ M. Tunnel complex unloaded by a deep excavation[J]. *Computers & Geotechnics*, 2001, 28(6): 469-493.
- [11] 高广运, 高盟, 杨成斌, 等. 基坑施工对运营地铁隧道的变形影响及控制研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(3): 453-459.
- [12] 高文伟, 向伟明, 郑伟锋, 等. 某基坑开挖对邻近地铁隧道影响的三维有限元分析[J]. *建筑科学*, 2012, 28(7): 31-33.
- [13] HUANG A J, WANG D Y, WANG Z X. Rebound effects of running tunnels underneath an excavation[J]. *Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2006, 21(3): 399-399.
- [14] 乔南. 明挖箱型隧道基坑施工对下卧既有隧道变形影响及加固措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [15] 郑刚, 刘庆晨, 邓旭. 基坑开挖对下卧运营地铁隧道影响的数值分析与变形控制研究[J]. *岩土力学*, 2013(5): 1459-1468.
- [16] 程茜, 宫全美. 地铁盾构隧道下穿城市公园地基加固宽度分析[J]. *华东交通大学学报*, 2018, 35(3): 15-22.
- [17] 廖俊展, 黄茂松, 王卫东, 等. 设置抗浮抗拔桩深基坑的三维数值仿真分析[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(S1): 1370-1373.
- [18] 王伊丽. 临近开挖对已建隧道的的影响分析及安全控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

Analysis of the Influence of Excavation Sequence on the Vertical Deformation of Tunnels

Xiong Wei¹, Chen Jiang², Chen Changping³, Xu Changjie^{1,4}

(1.Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, Nanchang 330013, China; 2.Zhejiang Communications Investment Group Co.,Ltd., Hangzhou 310000, China; 3.Hangzhou New East City Construction & Investment Limited Company, Hangzhou 310000, China; 4.Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Due to large-scale unloading, excavation above the tunnels may cause soil resilience and the deformation to the metro tunnels, which threaten the operation greatly. How to reduce the influence of excavation, and decrease the vertical deformation of tunnels is very important. In this study, a 3-D model for channel excavation was established in ABAQUS. The influence of the excavation sequence on the vertical deformation of tunnels was analyzed in details. The results show that it is a reasonable excavation sequence to excavate the soils above shallow tunnels and the tunnels with little spacing first. The symmetry of excavation area should be paid attention to. Moreover, the excavation sequence is given as references for similar projects.

Key words: railway tunnel; excavation sequence; numerical calculation; riverway-digging; tunnel group; three-dimensional model