

基坑开挖对近接既有地铁隧道的影响分析

孙雅珍¹,李卿辰¹,岳青青²,李良军³

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 中国市政工程西北设计研究院有限公司,甘肃 兰州 730000;3. 杭州市公路管理局,浙江 杭州 310030)

摘要 目的 研究深大基坑开挖对近接既有隧道及周围土体的影响. 方法 以杭州某邻近地铁隧道的基坑工程为例,采用 PLAXIS 对基坑开挖进行数值模拟分析. 结果 基坑开挖会引起邻近既有隧道和周围土体的扰动,但扰动程度较小,地表沉降与隧道变形均在设计要求范围之内;地表沉降、隧道位移会随坑底水平边界尺寸的增大而增大;基坑平面开挖形状改变会影响隧道位移的变化趋势,平面开挖形状越规则,隧道位移变化曲线越平滑;地表沉降槽的形状不受坑内水平边界尺寸和平面开挖形状改变的影响,验证了地表沉降槽曲线的形状与隧道地表沉降形态变化系数 C 有相关性. 结论 使用数值分析方法研究基坑与隧道的近接工程时,必须考虑基坑的开挖方式及有限元模型的尺寸.

关键词 近接既有隧道;变形;地表沉降;横断面形状;水平边界长度;数值分析

中图分类号 TU47 文献标志码 A

Analysis on Influence of Foundation Pit Excavation on Adjacent Existing Subway Tunnels

SUN Yazhen¹, LI Qingchen¹, YUE Qingqing², LI Liangjun³

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. CSEEC AECOM Consultants Co. Ltd., Lanzhou, China, 730000; 3. Hangzhou Highway Administration, Hangzhou, China, 310030)

Abstract: In order to study the influence of deep foundation pit excavation on the adjacent existing tunnel and surrounding soil, a 2-D FE model was established based on the practice of deep excavation adjacent to the subway tunnel in Hangzhou by the finite element software PLAXIS. The results indicate that the influence of foundation excavation on the adjacent subway shield zone is small, and the surface settlement and displacement of values linings are in the limited range. The surface settlement and tunnel displacement increase with the increase of the horizontal boundary size. The change trend of tunnel displacement is affected by the plane excavation shape of

收稿日期:2019-10-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51808352);浙江省公路局科研项目(2018H18,2018H19)

作者简介:孙雅珍(1970—),女,教授,博士,博士研究生导师,主要从事路面损伤及地下工程方面研究.

foundation pit. The more regular the plane excavation shape is, the smoother the curve of tunnel displacement change will be. The shape of the surface settlement trough is not affected by the size of the horizontal boundary in the pit and the shape of the plane excavation. The shape of the surface subsidence trough is not affected by the horizontal boundary size and the shape of the plane excavation in the pit. It verified that the shape of the surface subsidence curve is related to the variation coefficient of the tunnel surface settlement. The method of excavation and the size of finite element model must be considered when using numerical analysis method to study the close engineering of foundation pit and tunnel.

Key words: adjacent existing tunnel; deformation; surface settlement; cross-sectional shape; horizontal boundary length; numerical analysis

近年来,随着城市地铁的兴起,基坑与临近地铁隧道组成的近接施工工程越来越多,由此引发的近接施工事故也不断增加,为了减缓近接施工事故的发生频率,数值分析方法是研究不同施工环境和施工技术下基坑与隧道近接施工过程中相互影响较为常见的方法之一。虽然数值分析方法能对岩土工程进行仿真分析,但由于地下土层的结构较为复杂,所以在使用数值分析方法研究实际工程问题时必须采取一定的简化手段,这就导致了数值分析结果与现场监测数据存在一定的偏差。郑刚等^[1]在分析基坑围护结构的不同变形模式对临近既有隧道的变形影响时,为了简化有限元模型的计算过程,实际建模时考虑对称性原则只建立1/2的有限元模型,并且采用单一土层,忽略不同土体之间的相互作用。章润红等^[2]基于土体的HSS本构模型,使用PLAXIS研究深基坑开挖对邻近既有隧道的附加弯矩及附加位移的影响时,假定土层均匀,并考虑基坑工程的对称性,所以有限元模型中采用单一土层和1/2模型。高广运^[3]使用FLAC 3D分析基坑施工对运营地铁隧道的变形影响时,利用基坑工程的近似对称性,建立三维有限元模型时同样是只建立1/2模型。黄兆纬等^[4]基于土-结构的相互作用模型,分析土体加固、分块开挖等技术措施对地铁隧道变位的影响。张迪^[5]借助FLAC 3D软件对某深大基坑开挖进行数值模拟分析,研究分层分块施工工艺对下方地

铁隧道的影响,得出分层分块开挖对下方盾构隧道不会造成破坏的结论。彭智勇等^[6]通过改变基坑分块开挖参数,研究邻近隧道的变形规律。通过现场实测或数值分析结合实际案例的方式对基坑与隧道在施工运营过程中的相互作用关系做出了大量的研究^[7-18],但对于基坑开挖时分块开挖形状对临近既有隧道或周边土体的扰动情况还缺乏深入的研究。基坑开挖会影响周围环境,但影响程度因基坑的面积大小、形状等因素的不同而表现出不同的特征。笔者以杭州某基坑工程为例,基于基坑与近接既有隧道的相对位置纵断面图,使用有限元软件PLAXIS建立基坑工程的有限元模型,分析数值模拟过程中,基坑采取不同的坑底水平边界长度和横断面开挖形状对邻近既有隧道及周边土体的影响。

1 工程概况

1.1 基坑支护结构总体布置

杭州某基坑的三期工程位于地铁1号线附近(见图1)。基坑南北向开挖宽度约92.48 m,东西向开挖宽度约82.03 m,基坑设计开挖深度为24.2 m,该基坑采用围护结构+四道钢筋混凝土内支撑+三轴水泥搅拌桩的围护结构体系,基坑开挖时先施工三轴水泥搅拌桩和围护结构,从上向下采用分层开挖方式,并且每层土体开挖完毕后及时进行坑内降水,同时添加一道内支撑;从下向上浇筑地下室楼板,并且每浇筑一层楼板,便拆

除一道水平支撑. 隧道直径为 6.2 m, 中心埋深取 -15.0 m, 隧道衬砌采用 C45 钢筋混凝土

土. A 点为数值模拟结果提取布置点, 位于地铁 1 号线下行线隧道衬砌结构的最左侧.

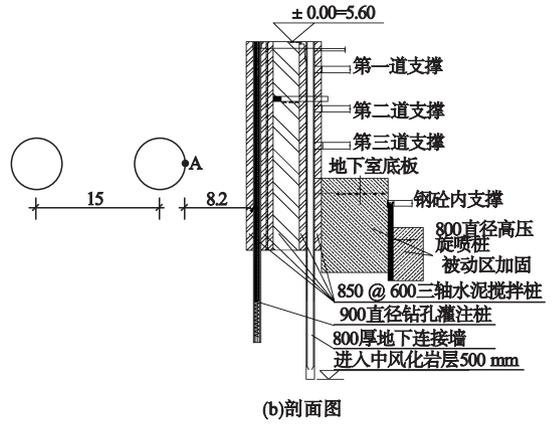
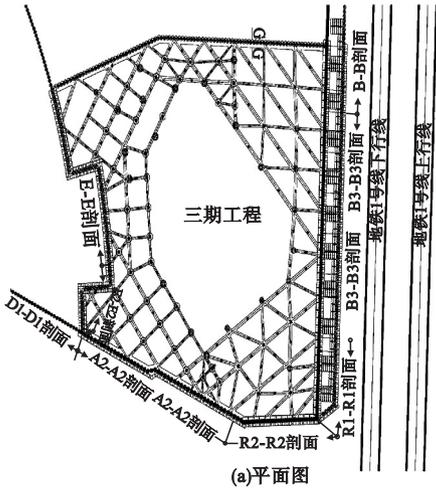


图1 基坑工程的典型断面图

Fig. 1 Relative position of metro and the foundation pit

1.2 工程地质条件

基坑地基的土层主要以粉质黏土和砂质粉土为主, 土层分布情况如表 1 所示.

表1 土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

土层名称	层厚/ m	孔隙比	压缩模 量/MPa	黏聚力/ kPa	摩擦 角/(°)
杂填土	1.05	0.84	2	8	10
粉质黏土	3.3	0.8	6.0	45.0	19.5
夹黏质粉土	3.1	0.966	7.5	9.0	21.5
砂质粉土	10.9	0.848	9.5	9.5	28.5
砂质粉土	9.0	0.86	9.0	7.0	30.5
粉砂夹砂质粉土	9.0	0.85	15.0	8.5	31.5
粉质黏土	2.6	1.105	6.0	32.6	18.6
粉质黏土	3.0	1.0	7.5	54.7	21.4
全风化泥质粉砂岩、含砾砂岩	5.7	0.5	10.0	55.0	24.0
中风化泥质粉砂岩、含砾砂岩	17.95	0.5	20.0	—	—
水泥稳定土	—	—	200	800	25

2 建立二维有限元模型

2.1 选取模型及计算参数

由于基坑工程面积较大, 为方便计算, 简化后的有限元模型的如图 2 所示. 天然土体、

三轴水泥搅拌桩和其他基坑支护结构分别采用土体硬化(HS)模型、Mohr-Coulomb 模型以及线弹性板单元模型. 通过查询设计图纸, 基坑支护各构件的设计参数如表 2 所示.

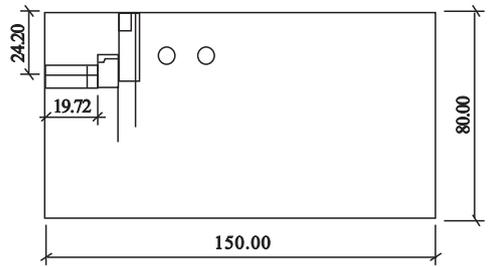


图2 有限元模型基本尺寸

Fig. 2 Basic dimensions of the finite element model

表2 基坑支护各构件的设计参数

Table 2 Design parameters of the foundation pit supporting members

构件	弹性模量/ 10 ⁷ kPa	抗压刚度/ 10 ⁷ (kN·m ⁻¹)	抗弯刚度/ 10 ⁶ (kN·m ⁻¹)
900 mm 厚钻孔灌注桩	3.15	2.70	1.823
800 mm 厚地下连续墙	3	2.40	1.280
第一、二、三道支撑	3	2.40	1.280
隧道衬砌	3.45	1.21	0.123
地下室负一、二层楼板	3.15	8.82	0.058
地下室底板	3.15	3.15	2.625

2.2 基坑施工工况

基坑开挖有 13 个工况,通过有限元软件模拟基坑开挖的过程. 基坑施工工况如表 3 所示.

表 3 基坑施工工况
Table 3 Excavation steps

施工工况	基坑开挖过程
1	系统达到初始的应力平衡
2	隧道施工
3	围护结构施工
4	开挖第一层土,坑内降水
5	开挖第二层土,设置第一道水平内支撑,同时进行坑内降水
6	设置第二道水平内支撑,开挖第三层土,同时进行坑内降水
7	设置第三道水平内支撑,开挖第四层土,同时进行坑内降水
8	添加第四道水平支撑,开挖到坑底,同时进行坑内降水
9	浇注地下室底板,同时拆除第四道水平内支撑
10	浇注地下室负二层楼板,同时拆除第三道水平内支撑
11	浇注地下室负一层内侧楼板,同时拆除第二道水平内支撑
12	开挖负一层凸出部位土体
13	拆除第一道支撑

3 结果分析

图 3 为监测点 A 在不同施工段的水平位移与竖直位移变化曲线. 从图 3 可看出,基坑开挖过程中,监测点 A 的位移变化曲线可分为 3 段,监测点 A 在前 7 个工况的位移变化曲线是一条曲率逐渐变小的弧线,工况 8 之后近似变成一条斜直线,工况 7 到工况 8 为过渡段. 基坑开挖完成后,监测点 A 在工况 13,也就是施工全过程结束后达到累积最大水平位移 18.93 mm;而在工况 11 处已经达到累计最大竖直位移 22.85 mm.

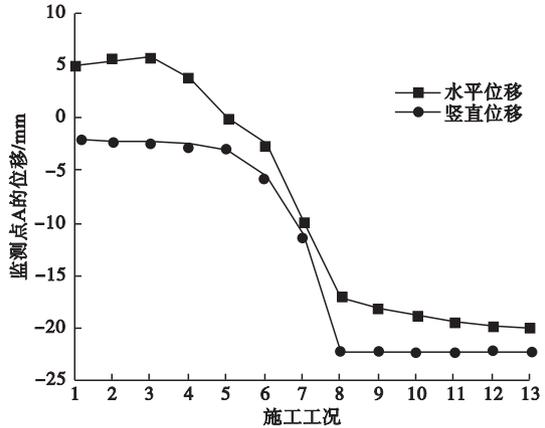


图 3 监测点 A 的位移变化曲线

Fig. 3 The displacement change curve of point A

图 4 为监测点 A 在基坑开挖全过程中的运动轨迹曲线. 从图 4 中可以清晰地看出监测点 A 在基坑开挖过程中的运动轨迹,由隧道施工完成到基坑正式开挖之前,隧道受到轻微扰动,逐渐远离基坑;当基坑内侧土体开始开挖时,监测点 A 偏离基坑的水平距离 x 最大为 6.36 mm,监测点 A 与基坑围护结构之间的水平位移 x 随着基坑开挖深度 y 的增加而减小,并于基开挖结束时达到最小值为 8.635 m.

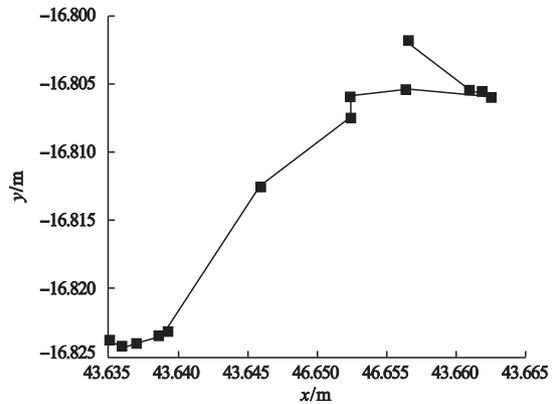


图 4 监测点 A 的运动轨迹

Fig. 4 The trajectory of monitoring point A

图 5 为地表沉降曲线. 图 5 反映了基坑开挖全过程中双线盾构隧道上方地表土体的沉降规律. 显然,地表沉降槽曲线表现为正态分布,不同工况下沉降槽中心线均处在水平距离为 19.10 m 处,即沉降槽中心线离钻孔

灌注桩的水平距离为 19.10 m;此外,从图 5 中还可看出,由工况 7 过渡到工况 8 的过程中,沉降槽中心线处地表最大沉降值增涨幅度最大 10.39 mm.

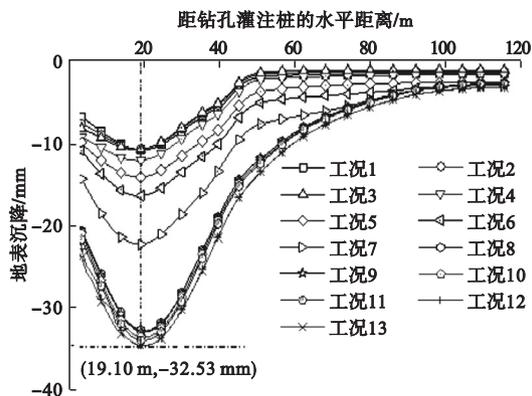


图 5 地表沉降

Fig. 5 The surface subsidence

宫亚峰等^[19]提出了当双线盾构隧道地表沉降形态变化系数 $C < 2$ 时,双线盾构隧道地表沉降曲线的形状表现为“单峰”,并且地表沉降量的最大值出现在双线隧道中心轴上.

从图 5 中可看出,工程的双线盾构隧道地表沉降曲线的形状呈 V 型,也就是“单峰”形状,地表沉降槽的最大值和双线隧道中心轴离围护桩的水平距离分别为 19.10 m 和 19.25 m,忽略一些客观因素的影响,地表沉降曲线的峰值点可近似看作在双线隧道中心轴上,为了使数值模拟分析的结果更加具有说服力,采用系数 C 对数值计算的结果进行验证.

宫亚峰等基于 Peck 公式法提出:

$$C = \frac{L}{i}, \quad i > 0. \quad (1)$$

$$i = \frac{z}{\sqrt{2\pi} \tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2})}. \quad (2)$$

式中: L 为隧道的轴间距; i 为地面沉降槽的宽度系数; z 为隧道轴心埋深; φ 为土体内摩擦角均值.

文中 $L = 15$ m, $z = 17$ m, $\varphi = 47.8^\circ$, 由式

(1) 和式 (2) 得到 C 的大小约为 0.85, 说明数值模拟分析结果与双线盾构隧道地表沉降形态变化系数 C 的定义范围相一致, 即数值计算结果具有可靠性.

隧道椭圆度 T 为

$$T = (a - b) / D \times 100\%. \quad (3)$$

式中: a 为隧道水平收敛直径; b 为隧道竖向收敛直径; D 为隧道外径.

有限元计算完成后,隧道左、右线的水平及竖向收敛半径分别为 6.190 和 6.179、6.191 和 6.177, 由此计算出基坑开挖完成后临近既有隧道左右线的椭圆度分别为 1.687% 和 2.199%.

《建筑基坑工程监测技术规范》(GB 50497—2009)规定:深层土体的水平位移报警值为 70 ~ 75 mm, 围护结构顶部的水平位移报警值为 40 ~ 50 mm. 有限元计算中隧道的位移量和地表沉降量均满足规范要求.

4 隧道变形的影响因素分析

4.1 平面开挖形状对隧道变形的影响

图 6 为矩形尺寸下的基坑开挖模型. 为了分析基坑开挖时不同平面形状对邻近既有隧道变形的影响, 用不规则多边形替换矩形, 比较二者的数值计算结果.

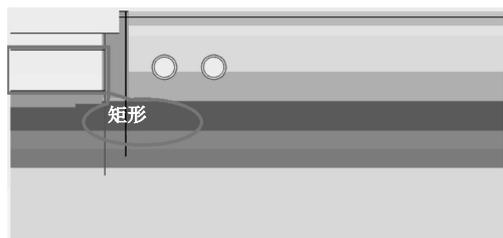


图 6 矩形尺寸下的基坑开挖模型

Fig. 6 Foundation pit excavation models with rectangle size

图 7 为监测点 A 的水平与竖向位移变化曲线. 通过分析图 7 中监测点 A 的位移变化曲线可知, 在两种不同的开挖形状下, 由于前 6 个工况的开挖过程完全相同, 所以监测点 A 在前 6 个工况的位移变化曲线完全重

合;在第6个工况之后监测点A的位移变化曲线逐渐分离,并且在最后两个阶段施工中二者的位移变化曲线再次趋于重合.在工况6之后,局部采用矩形边界开挖得到的水平位移与竖向位移变化曲线均接近于圆曲线而通

过不规则多边形边界开挖得到的水平位移与竖向位移恰好接近于与矩形边界对应的圆曲线两端点处的切线,说明基坑分层开挖时规则的开挖尺寸对基坑外既有结构的扰动较小.

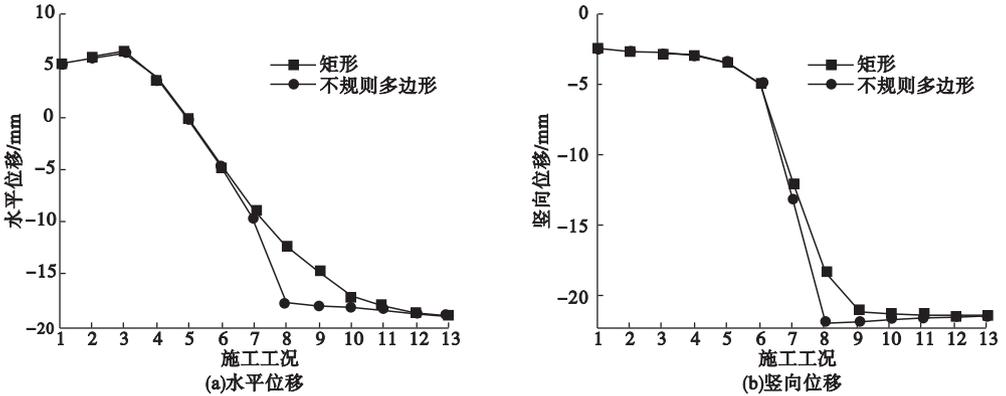


图7 不同形状下监测点A的位移

Fig. 7 The Displacement of monitoring point A under different shapes

图8为基坑平面开挖形状下隧道左右线的椭圆度.对比图5和图8可知,改变基坑的平面开挖形状,双线地表沉降槽中心线的位置会发生偏移,并且平面形状越规则,地表沉降槽中心线与围护结构之间的水平距离越大,沉降槽的最大值越小.

扰动越小.

表4 双线地铁隧道的椭圆度

Table 4 Ellipticity of a two-way subway tunnel

标识位置	隧道椭圆度/%	
	不规则多边形	矩形
左线	1.687	1.616
右线	2.199	2.093

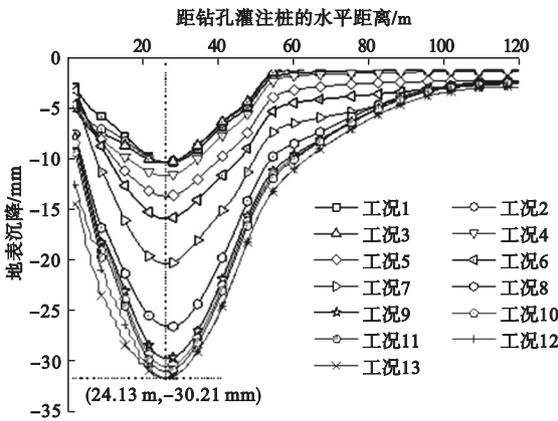


图8 矩形开挖平面下地表土体沉降

Fig. 8 Settlement of surface soil under rectangular excavation plane

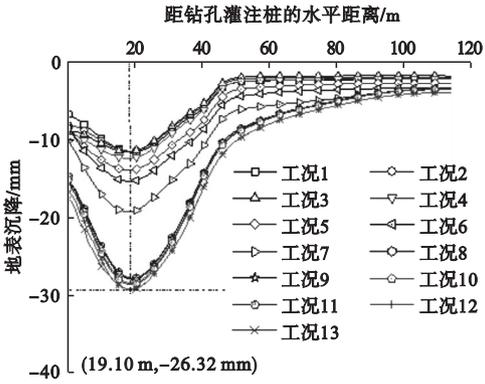
表4为双线地铁隧道的椭圆度.由表4可知,基坑的平面开挖形状越规则,基坑的椭圆度越小,表明基坑开挖对近接既有隧道的

4.2 水平边界长度对隧道变形的影响

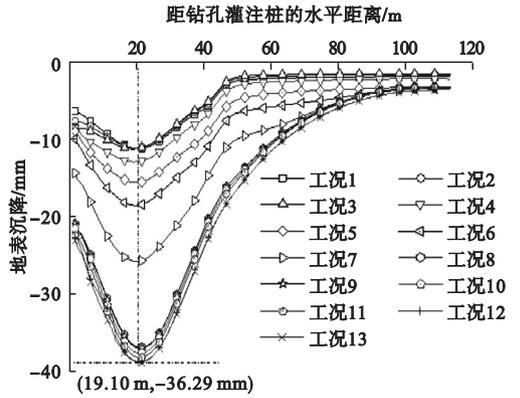
为分析水平边界长度对数值模拟结果的影响,将图2中坑底的水平长度L作为变量,将水平长度L分别设置为9.72 m、29.72 m、39.72 m和49.72 m,建立有限元模型进行数值分析并分别比较不同工况下监测点A的水平位移与垂直位移各自之间的差异性.图9为改变坑底水平边界尺寸时隧道上方的地表沉降曲线.将图9与图5对比可知,改变基坑工程的水平边界尺寸,基坑开挖时各工况下隧道上方的地表沉降变形整体规律和地表沉降曲线的沉降槽中心线位置并未随之发生改变,但基坑施工完成后的地表最大沉降值随着水平边界尺寸的增大而增大.当L=9.72 m逐次增加到L=49.72 m时,工况

7 到工况 8 的过渡段对应的地表沉降增量值分别为 8.40 mm、10.39 mm、10.97 mm、

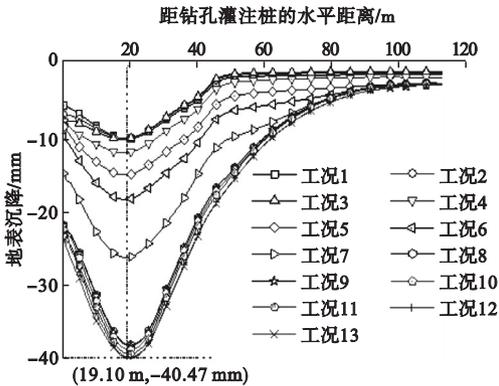
12.50 mm 与 13.46 mm.



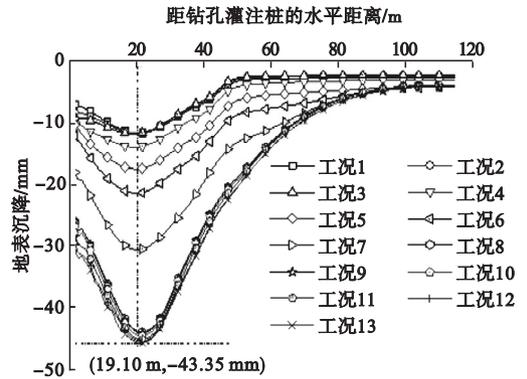
(a) $L=9.72\text{ m}$



(b) $L=29.72\text{ m}$



(c) $L=39.72\text{ m}$

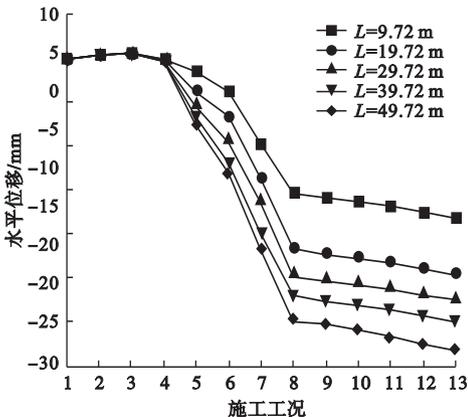


(d) $L=49.72\text{ m}$

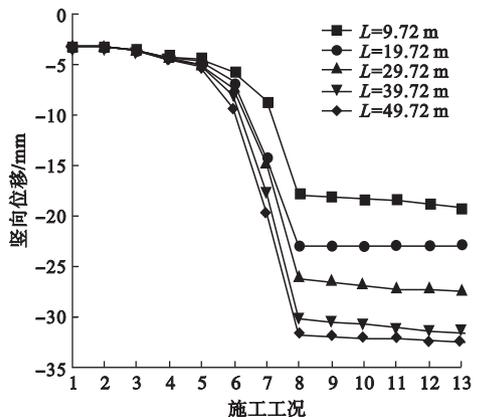
图 9 不同水平长度时地表土体沉降

Fig. 9 The Surface soil settlement at different horizontal lengths

图 10 为不同施工工况下监测点 A 的水 平和竖向位移变化曲线.



(a) 水平位移变化曲线



(b) 竖向位移变化曲线

图 10 监测点 A 的位移变化曲线

Fig. 10 The displacement change curve of monitoring point A

在不同水平边界尺寸下,监测点 A 的水平与竖直位移变化曲线的整体变化趋势十分相似,工况 8 之前,监测点 A 的位移变化曲线是一条光滑的弧线段,相邻工况间位移增量逐渐变大,位移增加率属于无规则的非线性。当基坑开挖数值模拟过程达到工况 8 时,不同水平边界尺寸下监测点 A 的水平位移变化曲线全部变成了一条斜直线,且五条斜直线基本上近似于平行关系,以 $L = 49.72 \text{ m}$ 为基准值,水平边界尺寸每减 10 m,监测点 A 的水平位移在同一工况下的缩减率分别为 0.163‰、0.289‰、0.327‰和 0.523%。但不同水平边界尺寸下监测点 A 的竖直位移在工况 8 之后几乎全部变成了一条水平线,且 5 条水平线也近似于平行关系,同样以 $L = 49.72 \text{ m}$ 为基准值,水平边界尺寸每减小 10 m,监测点 A 的竖直位移在同一工况下的缩减率分别为 0.317‰、0.434‰、0.380‰和 0.605%。虽然水平边界尺寸效应未改变隧道的位移变化曲线规律,但基坑开挖过程中隧道受到的影响随水平边界尺寸的减小而减小。

图 11 为不同坑底水平边界长度下双线地铁隧道的椭圆度变化情况。随着坑底水平边界尺寸的增加,左线隧道的椭圆度不断减小,而右线隧道的椭圆度不断增大。可见,基坑开挖时必定会引起临近既有隧道的扰动,但由于真实的扰动传播路径十分复杂,基坑周围不同位置的建筑物受到扰动程度不同。

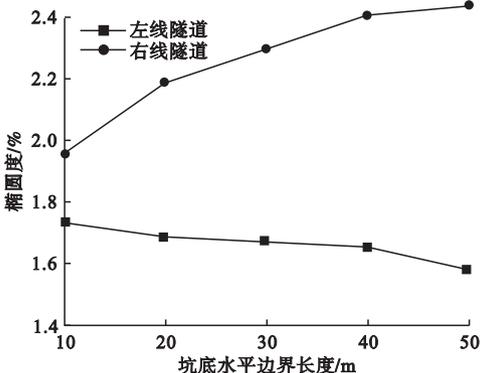


图 11 双线地铁隧道的椭圆度

Fig. 11 Ellipticity of a two-way subway tunnel

5 结论

(1) 基坑开挖会扰动邻近既有隧道和周围土体,但扰动程度较小,地表沉降与隧道位移值均在《建筑基坑工程监测技术规范》(GB 50497—2009)的规定要求范围之内。

(2) 使用数值分析方法研究基坑开挖问题时,隧道位移随坑底水平边界尺寸的增大而增大,所以在数值计算中有限元模型的边界尺寸应合理设置。

(3) 基坑平面开挖形状会影响隧道位移的变化趋势以及地表沉降量,平面开挖形状越规则,隧道位移变化曲线越平滑。

(4) 地表沉降槽的形状和沉降最大值不受坑内水平边界尺寸和平面开挖形状改变的影响,且由于隧道地表沉降形态变化系数 C 恒小于 2,所以地表沉降槽曲线始终呈“单峰”形状。

参考文献

- [1] 郑刚,王琦,邓旭,等.不同围护结构变形模式对抗外既有隧道变形影响的对比分析[J].岩土工程学报,2015,37(7):1181-1194.
(ZHENG Gang, WANG Qi, DENG Xu, et al. Comparative analysis of influences of different deformation modes of retaining structures on deformation of existing tunnels outside excavations [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2015, 37(7): 1181 - 1194.)
- [2] 章润红,刘汉龙,仇文岗.深基坑支护开挖对临近地铁隧道结构的影响分析研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(5):857-866.
(ZHANG Runhong, LIU Hanlong, ZHANG Wengang. Numerical investigation on tunnel responses induced by adjacent deep braced pit excavations [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2018, 38(5): 857 - 866.)
- [3] 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.
(GAO Guangyun, GAO Meng, YANG Chengbin, et al. Influence of deep excavation on deformation of operating metro tunnels and countermeasures [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2010, 32(3): 453 - 459.)
- [4] 黄兆纬,黄信,胡雪瀛,等.基坑开挖对既有地

- 铁隧道变位影响及采取措施分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊2): 381-385.
(HUANG Zhaowei, HUANG Xin, HU Xueqi, et al. Influence of foundation pit excavation on displacement of existing metro tunnels and technical measures [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2014, 36(S2): 381-385.)
- [5] 张迪. 杭州铁路东站西广场大基坑开挖对其下地铁盾构隧道的影响与控制[J]. 隧道建设, 2013, 33(11): 897-902.
(ZHANG Di. Analysis on behavior of shield-bored metro tunnel caused by construction of large-scale foundation pit located above: case study on foundation pit of west square Hangzhou east railway station [J]. Tunnel construction, 2013, 33(11): 897-902.)
- [6] 彭智勇, 杨秀仁. 基坑分块开挖参数对邻近地铁盾构隧道的变形影响分析[J]. 中外公路, 2019(2): 206-210.
(PENG Zhiyong, YANG Xiuren. The deformation influence about block excavation parameters of foundation pit adjacent metro shield tunnels [J]. Journal of China & foreign highway, 2019(2): 206-210.)
- [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): 1109-1116.
(ZHENG Gang, LIU Qingchen, DENG Xu, et al. Field measurement and analysis of effect of excavation on existing tunnel boxes of underlying metro tunnel in operating [J]. Rock and soil mechanics, 2012, 33(4): 1109-1116.)
- [8] HU Z F, YUE Z Q, ZHOU J, et al. Design and construction of a deep excavation in soft soils adjacent to the Shanghai metro tunnels [J]. Canadian geotechnical journal, 2003, 40(5): 933-948.
- [9] 张启斌, 霍知亮. 基坑开挖对下方既有地铁隧道的影响分析和监测[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(12): 39-44.
(ZHANG Qibin, HUO Zhiliang. Analysis and monitoring of foundation pit excavation in existing metro tunnels [J]. Urban mass transit, 2014, 17(12): 39-44.)
- [10] LIU H, Li P, LIU J. Numerical investigation of underlying tunnel heave during a new tunnel construction [J]. Tunnelling and underground space technology, 2011, 26(2): 276-283.
- [11] SAYE STEVEN R. Assessment of soil disturbance by the installation of displacement sand drains and prefabricated vertical drains [J]. Geotechnical special publication, ASCE, 2003(119): 325-362.
- [12] 高广运, 吴勇, 张先林, 等. 深基坑开挖与邻近隧道相互影响的分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增刊2): 114-117.
(GAO Guangyun, WU Yong, ZHANG Xianlin, et al. Analysis of the interaction between deep excavation and adjacent tunnels [J]. China civil engineering journal, 2011, 44(S2): 114-117.)
- [13] 胡海英, 张玉成, 杨光华, 等. 基坑开挖对既有地铁隧道影响的实测及数值分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊2): 431-439.
(HU Haiying, ZHANG Yucheng, YANG Guanghua, et al. Measured and numerical analysis of effect of excavation of foundation pits on metro tunnels [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2014, 36(S2): 431-439.)
- [14] HUANG X, SCHWEIGER H F, HUANG H. Influence of deep excavations on nearby existing tunnels [J]. International journal of geomechanics, 2014, 13(2): 170-180.
- [15] NG C W W, SHI J, HONG Y. Three-dimensional centrifuge modelling of basement excavation effects on an existing tunnel in dry sand [J]. Canadian geotechnical journal, 2013, 50(8): 874-888.
- [16] SHARMA J S, HEFNY A M, ZHAO J, et al. Effect of large excavation on deformation of adjacent MRT tunnels [J]. Tunnelling & underground space technology, 2001, 16(2): 93-98.
- [17] 陈丹, 高林. 软土基坑开挖与邻近隧道的相互影响分析[J]. 施工技术, 2018, 47(24): 120-124.
(CHEN Dan, GAO Lin. Mutual influence analysis between excavation of soft soil foundation excavation and adjacent tunnels [J]. Construction technology, 2018, 47(24): 120-124.)
- [18] 魏纲, 洪文强, 魏新江, 等. 基坑开挖引起邻近盾构隧道转动与错台变形计算[J]. 岩土工程学报, 2019(7): 1251-1259.
(WEI Gang, HONG Wenqiang, WEI Xinjiang, et al. Calculation of rigid body rotation and shearing dislocation deformation of adjacent shield tunnels due to excavation of foundation pits [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2019(7): 1251-1259.)
- [19] 宫亚峰, 王博, 魏海斌, 等. 基于Peck公式的双线盾构隧道地表沉降规律[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(5): 1411-1417.
(GONG Yafeng, WANG Bo, WEI Haibin, et al. Surface subsidence law of double-line shield tunnel based on Peck formula [J]. Journal of Jilin university (engineering science), 2018, 48(5): 1411-1417.)
- (责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)