

# 上盖物业软土基坑开挖中城市轨道交通 隧道变形的控制与优化

徐永刚<sup>1</sup> 狄宏规<sup>2</sup> 刘欢<sup>1</sup> 金宏杰<sup>3</sup> 于佳永<sup>2</sup> 邢宇<sup>3</sup>

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司, 315101, 宁波; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海; 3. 宁波轨道交通绿城东部置业有限公司, 315101, 宁波//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 宁波市矮潘地块项目中的上盖物业基坑存在开挖面积大、距下方城市轨道交通隧道较近等问题。因此,隧道变形控制在允许范围内是该工程的重中之重。为合理预估和控制该上盖物业基坑施工对城市轨道交通隧道结构的影响,基于 Plaxis 3D 软件,对软土基坑施工及辅助措施进行了优化分析。结果表明:城市轨道交通隧道上浮量主要受隧道埋深的影响,在相同基坑开挖深度下,下卧隧道埋深越大,对应的隧道上浮量越小。为减小上盖物业基坑施工引起的城市轨道交通隧道变形,宜选用基坑分步开挖及由两侧向中间开挖的施工方式,并对隧道上方土体采取加固措施;当分坑数量划为 9 个且施加在垫层上的临时压重应力为上方开挖土体总重应力的 20% 时,工程效果较好。

**关键词** 深基坑; 上盖物业开发; 分坑开挖; 压重应力; 隧道变形控制

**中图分类号** U456.3<sup>+</sup>2

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2022.03.034

## Optimization and Control of Urban Rail Transit Tunnel Deformation in the Foundation Pit Excavation of Overhead Property

XU Yonggang, DI Honggui, LIU Huan, JIN Hongjie, YU Jiayong, XING Yu

**Abstract** The foundation pit of overhead property in Ningbo Aipan Plot project has problems of large excavation area and being close to the underlying tunnel. Therefore, keeping urban rail transit tunnel deformation within allowable range is the top priority. In order to reasonably estimate and control the influence of overhead property foundation pit excavation on urban rail transit tunnel structure, the foundation pit construction and auxiliary measures are optimized based on Plaxis 3D software. The results show that: the urban rail transit tunnel heave amount is mainly affected by tunnel depth, and the larger the tunnel depth, the smaller the tunnel heave amount. To minimize the urban rail transit tunnel deformation caused by overhead property foundation pit construction, construction plan of

separate foundation pit excavation from both sides to the middle should be selected, and the auxiliary measure of soil reinforcement above the tunnel should be selected. When the number of separate foundation pits is 9 and the temporary weight compressive stress on the cushion layer is 20% of the excavated soil total weight stress, engineering outcomes are satisfying.

**Key words** deep foundation pit; overhead property development; separate foundation pit excavation; weight compressive stress; tunnel deformation control

**First-author's address** Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315101, Ningbo, China

目前,在城市轨道交通隧道上加盖物业已逐渐成为城市集约化用地的新模式。上盖物业基坑的开挖会对临近的城市轨道交通隧道结构产生一定的影响<sup>[1]</sup>,存在安全隐患。因此,合理地预估和减轻上盖物业基坑施工对下方城市轨道交通隧道结构的影响尤为重要<sup>[2-3]</sup>。针对基坑开挖引起邻近隧道变形的问题,文献[4-5]主要从基坑开挖引起邻近隧道变形的计算、分析和预测 3 个方面展开分析,而鲜见对上盖物业基坑开挖过程中下方隧道变形控制与优化措施的研究。

在宁波市矮潘地块项目的上盖物业基坑工程中,由于软土基坑开挖面积大、坑底距运营的城市轨道交通隧道较近,如何将城市轨道交通隧道变形控制在允许范围内,是该工程施工的重中之重。本文依托该工程,通过设计不同的基坑分步施工(以下简称“分坑施工”)方案并采用垫层压重、隧道上方土体加固等辅助措施,并借助 Plaxis 3D 软件对基坑开挖进行数值模拟与分析,提出了上盖物业基坑施工时下方隧道变形控制的优化方案,以为类似工程提供参考与借鉴。

1 工程概况

本工程位于宁波市鄞州区,城市轨道交通隧道由东南至西北方向穿越本工程地块,将本地块划分为南侧区块、北侧区块及中间区块3部分。其中,中间区块上盖物业基坑沿南北方向的宽度约为30 m,沿东西方向长度约为180 m,开挖面积约为5 400 m<sup>2</sup>,施工现场的平面布置如图1所示。

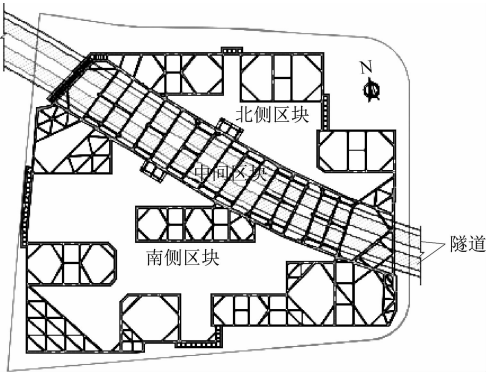


图1 施工平面布置图  
Fig.1 Construction floor plan

中间区块为上盖地下室,地下室基坑周围的开

挖深度约为7 m。中间区块城市轨道交通隧道顶部的平均埋深约为15.5~21.5 m,与基坑底间的距离约为8.5~14.5 m,其中:隧道东侧段盾构管片埋深较深,隧道西侧段盾构管片埋深较浅。盾构管片的外径为6.2 m,左、右两线隧道间的净距为10.0 m。图2给出了城市轨道交通隧道与上盖物业基坑间的竖向剖面图。表1给出了上盖物业基坑开挖深度内主要土层的物理力学指标。

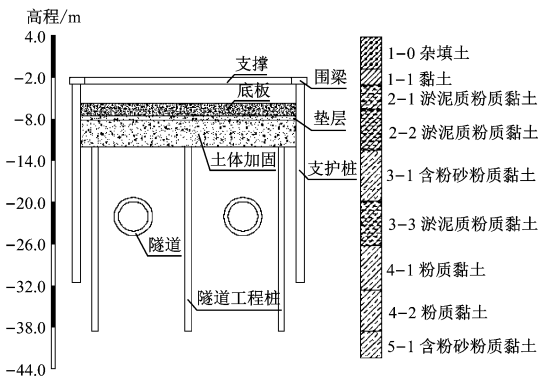


图2 城市轨道交通隧道与上盖物业基坑的竖向剖面图  
Fig.2 Vertical section of urban rail transit tunnel and over-head property foundation pit

表1 上盖物业基坑的土体物理力学参数表  
Tab.1 Physical and mechanical parameters of overhead property foundation pit soil

土层号	土层名称	重度/(kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa	承载应力/kPa
1-1	黏土	18.23	21.2	14.5	3.50	80.0
2-1	淤泥质粉质黏土	17.89	11.9	9.0	2.69	55.0
2-2	淤泥质粉质黏土	16.94	10.5	8.9	2.57	60.0
3-1	含粉砂粉质黏土	18.86	12.1	14.5	4.42	110.0
3-3	淤泥质粉质黏土	17.51	13.9	9.9	2.72	75.0
4-1	粉质黏土	18.50	26.0	17.0	5.43	160.0
4-2	粉质黏土	18.31	16.4	14.7	4.03	130.0
5-1	含粉砂粉质黏土	19.46	22.2	17.9	6.46	200.0

综上可知,中间区块上盖物业基坑的开挖面积较大;基坑所处的土层分布不均匀,且土体力学性质相对较差;在城市轨道交通隧道上方较近距离内开挖地下室,上方卸载对隧道影响较大。因此,隧道变形控制在允许范围之内,是本工程的重中之重。为了保护隧道结构,将隧道变形控制在合理的范围内,须采取必要的分坑施工措施。本文通过Plaxis 3D软件模拟分坑施工过程,并对分坑施工参数进行优化,为预估因该上盖物业基坑开挖引起的

城市轨道交通隧道变形提供较为可靠的依据。

2 分坑施工的有限元模拟

针对中间区块上盖物业基坑,依次实现隧道、围护结构、内支撑结构、土体开挖的阶段性施工模拟,本文使用Plaxis 3D软件进行建模,如图3所示。模型沿x轴、y轴、z轴3个方向上的尺寸分别为270 m、210 m、100 m,其中:y轴为北向,基坑为东南至西北走向。为减小上方土体卸载对城市轨道交通

隧道的影响,采取分坑开挖的施工方式,由两侧开挖到中间,各分基坑之间采用三轴搅拌桩挡墙分隔。

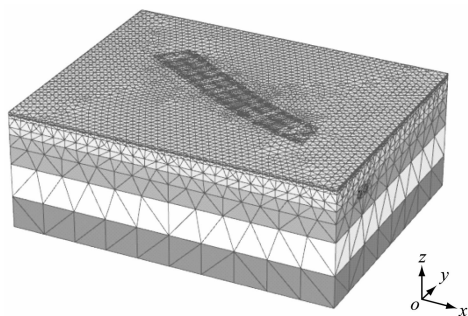


图3 分坑施工有限元模型

Fig. 3 Finite element model of separate foundation pit construction

## 2.1 分坑数量优化分析

### 2.1.1 分坑施工工况

为减小基坑暴露时间,以进一步降低上方土体开挖对隧道结构的影响,需结合工程实际情况探寻较优的基坑划分数量。本基坑土体总开挖面积约为  $5\,400\text{ m}^2$ ,开挖土体的总重度约为  $564\,840\text{ kN}$ 。考虑到分基坑开挖面积对施工效率的影响,本文提出两种分坑施工工况:工况一将基坑划成9个独立分基坑,并分别命名为A1-a、A2-a、A3-a、A4-a、A5、A4-b、A3-b、A2-b、A1-b;工况二将基坑划成3个独立分基坑,并分别命名为B1-a、B2、B1-b。穿过本工程地块的城市轨道交通隧道下行线里程为X900~X1040,上行线里程为S880~S1030。两种工况下的基坑分区布置如图4所示。

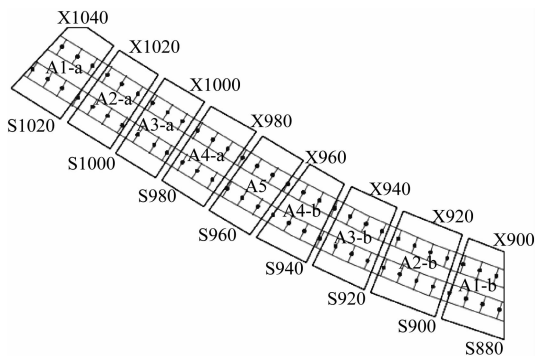
### 2.1.2 分坑土体开挖流程

应用Plaxis 3D软件模拟工况一下分坑土体开挖的流程(工况二可参考工况一,不再累述),具体如下:

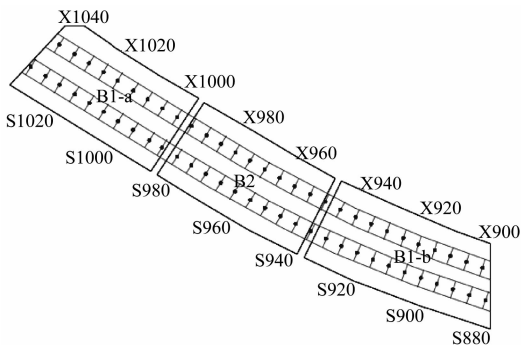
1) A1区开挖至基坑底后施工垫层,待垫层硬化后在垫层上方进行临时压重。设置的压重应力为开挖土体总应力的20%(后续各步骤的压重应力值均与之一致),以减轻土体开挖对城市轨道交通隧道的影响。

2) A2区开挖至基坑底后施工垫层,待垫层硬化后在垫层上方进行临时压重。A1区卸载压重应力,进行底板施工。

3) A3区开挖至基坑底后施工垫层,待垫层硬化后在垫层上方进行临时压重。A2区卸载压重应力,进行底板施工。



a) 工况一



b) 工况二

图4 基坑分区图

Fig. 4 Foundation pit zoning plan

4) A4区开挖至基坑底后施工垫层,待垫层硬化后在垫层上方进行临时压重。A3区卸载压重应力,进行底板施工。

5) A5区开挖至基坑底,进行垫层及底板施工。A4区卸载压重应力,进行底板施工。

### 2.1.3 分坑施工模拟计算

在上述施工过程中,土体对垫层的压重应力以面荷载的形式施加,故Plaxis 3D软件模拟的压重应力为  $20.92\text{ kN/m}^2$ 。由于下行线和上行线的模拟结果存在高度的一致性,故本文仅选取城市轨道交通隧道下行线里程为X905、X925、X940、X955、X975、X990、X1005、X1020、X1035作为监测点,比较两种工况下城市轨道交通隧道结构变形的差异。

图5为不同分坑数量对隧道上浮量的影响关系曲线图,可以看出:两种工况下隧道上浮量均呈现先增大后减小的趋势,这是由于城市轨道交通隧道在X1020和S1005位置处的埋深较大(约为20 m),而在X905和S890位置处的埋深较小(仅为16 m),在相同的基坑开挖深度下,埋深较大的城市轨道交通隧道受到上方土体压重也大,故隧道上浮量较小。从图5还可以看出,工况一下的隧道上浮量比工况二下的隧道上浮量小,且在盾构隧道埋深

较小处更为明显,二者的差值约为 1 mm。

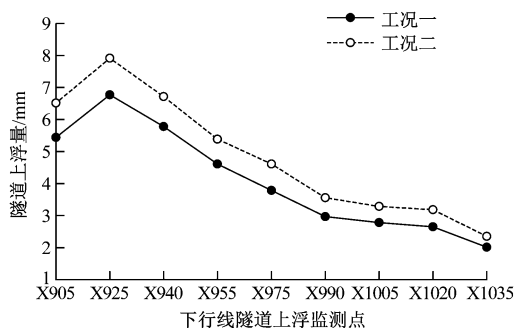


图5 两种工况下隧道上浮量变化曲线

Fig. 5 Variation curves of tunnel heave amount under two working conditions

## 2.2 临时压重应力优化分析

综上所述,在不影响施工效率的前提下,宜选择较多的分坑数量,以减少对下卧隧道的影响,本文后续的数值模拟将基于工况一进行分析。进一步分析施加在垫层上的临时压重措施对隧道变形的影响,图6为不同的压重应力对隧道上浮量的影响关系曲线。由图6可知,当压重应力从无增大到开挖土体总重应力的10%时,隧道上浮量明显减小,其在X925位置处的数值由7.6 mm减至7.1 mm;当压重应力增大至开挖土体总重应力的20%时,隧道上浮量不再明显减小。由此可知,在本工程中采取临时压重措施来减轻上方土体开挖对隧道的影响,压重应力取开挖土体总重应力的20%时效果较好、经济性较高,此时隧道上浮量的最大值为6.9 mm。若压重应力继续增大,减小隧道上浮的效果甚微。

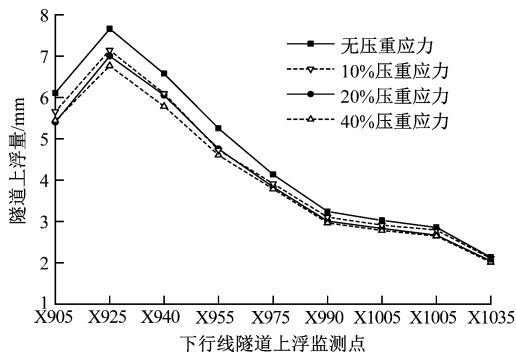


图6 不同压重应力对隧道上浮量的影响

Fig. 6 Influence of different weight compressive stresses on tunnel heave amount

## 2.3 隧道上方土体加固优化分析

由于中间区块上盖物业基坑所处的土层分布

不均匀,且土体力学性质相对较差,为进一步减小上方土体开挖卸载对城市轨道交通隧道的影响,考虑对隧道上方的土体采用三轴搅拌桩进行土体加固。土体的重度由加固前的  $18.5 \text{ kN/m}^3$  增加到加固后的  $19.5 \text{ kN/m}^3$ 。在采用 Plaxis 3D 软件进行模拟的过程中,选取开挖土体总重应力的5%和20%作为压重应力,分别对加固前和加固后隧道上浮量进行分析,得到的结果如图7所示。从图7可以看出:当压重应力为开挖土体总重应力的5%时,隧道上浮量的减小值最大可达0.7 mm;当压重应力为开挖土体总重应力的20%时,隧道上浮量的减小值最大可达1.0 mm。由此可知,城市轨道交通隧道上方的土体加固措施能有效地减轻土体开挖对隧道的影响。

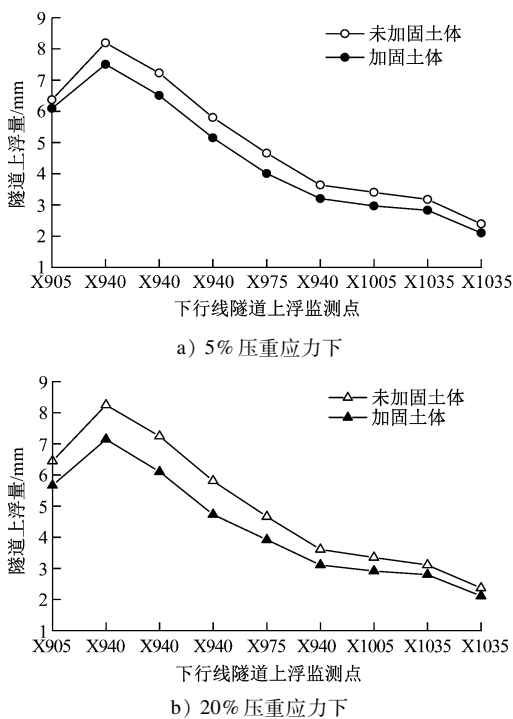


图7 加固土体的重度对隧道上浮量的影响

Fig. 7 Influence of weight of reinforced soil on tunnel heave amount

基于 Plaxis 3D 软件的数值模拟结果,对基坑施工和辅助措施的效果进行分析后,将优化措施运用到本次实际上盖物业工程中:将中间区块上盖物业基坑划分为9个独立的分坑,采用由两侧到中间的土体开挖方式;将垫层上方开挖土体总重的20%设置各分坑的临时压重值;对隧道上方土体采用三轴搅拌桩加固,其桩长为5~6 m,土体置换率约为75%,基坑底以上水泥参量为10%,基坑底以下水

泥参量为 20%。

### 3 分坑施工优化后的实际工程效果分析

在上盖物业基坑土体开挖前,预埋隧道沉降监测点,监测点间距 5 m。取下行线中 X915 ~ X1030 共 24 个监测点的实测数据,观测分坑施工优化后的实际工程效果,并与 Plaxis 3D 软件得到的数值模拟值进行对比,结果如图 8 所示。

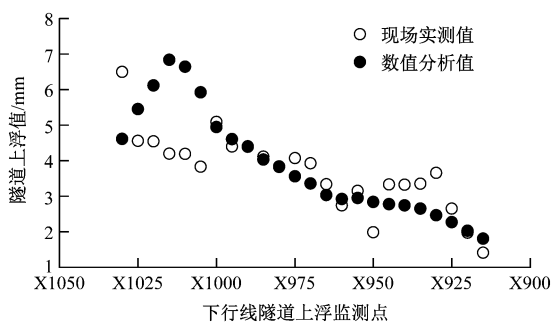


图 8 分坑施工优化后工程实测值与数值模拟值的对比

Fig. 8 Comparison between engineering measured data and numerical simulation results after optimization of separate foundation pit excavation

图 8 中,在 X1010 ~ X1030 监测点处实测值与数值模拟值间存在一定的差异,这是由于附近的南、北两侧区块基坑也在开挖,使该区域的中间区块基坑两侧土体发生卸载,进而导致城市轨道交通隧道上浮量减小;其他测点位置附近的南北两侧区块基坑尚未施工,故隧道上浮量的变化规律和幅值呈现较好的一致性。从图 8 可以看出,隧道上浮量有效控制在 8 mm 以内,满足不超过 10 mm 的隧道沉降要求,进而验证了优化后的分坑施工措施的合理性和有效性。

### 4 结语

为合理预估和减轻上盖物业基坑开挖对下方城市轨道交通隧道变形的影响,本文通过 Plaxis 3D 软件进行数值模拟,对宁波市矮潘地块项目上盖物业基坑施工和辅助措施进行了优化分析,得到主要结论如下:

1) 基坑下卧城市轨道交通隧道上浮量主要受

隧道埋深的影响。在相同的基坑开挖深度下,隧道的埋深越大,其上浮量越小。

2) 采用分坑开挖方式,以及由两侧向中间的分坑开挖施工措施,可有效减小因上盖物业基坑开挖引起的城市轨道交通隧道变形。在不影响施工效率的前提下,带状上盖物业基坑宜选择较多的分坑数量,以减少基坑开挖对城市轨道交通隧道的影响。

3) 在本项目中,上盖物业基坑划分为独立的 9 个分坑,将施加在基坑坑底垫层上的压重应力设置为上方开挖土体总重应力的 20%,并采用三轴搅拌桩对隧道上方土体进行土体加固,经验证,工程实施效果较好。

### 参考文献

- [1] 李骥良. 地铁上盖基坑工程对地铁影响的安全性分析[J]. 天津建设科技, 2017(5): 24.  
LI Jiliang. Safety analysis of the influence of overhead property foundation pit engineering on subway[J]. Tianjin Construction Science and Technology, 2017(5): 24.
- [2] 黄滨. 地铁上盖建筑的设计实例与地铁保护分析[J]. 福建建筑, 2020(7): 65.  
HUANG Bin. Design example and protection analysis of subway superstructure[J]. Fujian Architecture & Construction, 2020(7): 65.
- [3] 曹琛, 马晋. 基坑施工对既有地铁隧道的变形控制研究[J]. 建筑施工, 2019(12): 2117.  
CAO Chen, MA Jin. Study on deformation control of existing metro tunnel by foundation pit construction[J]. Foundation Bed & Foundation, 2019, 41(12): 2117.
- [4] 周泽林, 陈寿根, 陈亮, 等. 基坑施工对下卧地铁隧道上抬变形影响的简化理论分析[J]. 岩土工程学报, 2015(12): 2224.  
ZHOU Zelin, CHEN Shougen, CHEN Liang, et al. Analysis of uplift deflection of subway tunnel due to adjacent pit excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015(12): 2224.
- [5] 胡琦, 许四法, 陈仁鹏, 等. 深基坑开挖土体扰动及其对邻近地铁隧道的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2013(增刊 2): 537.  
HU Qi, XU Sifa, CHEN Renpeng, et al. Influence of soil disturbance on metro tunnel in soft clay due to excavation of deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013(S2): 537.

(收稿日期: 2021-06-15)