

# 上盖物业基坑开挖引起下方地铁隧道变形实测分析

徐永刚<sup>1</sup> 狄宏规<sup>2</sup> 刘欢<sup>1</sup> 金宏杰<sup>3</sup> 苏光北<sup>2</sup> 邢宇<sup>3</sup> 于佳永<sup>2</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** 基于宁波市矮潘地块项目施工期下方地铁隧道结构变形的实测数据,分析了周围基坑群施工对下卧隧道结构的影响。结果表明:隧道结构总体呈现先下沉、后上浮的趋势,上浮值先增大再减小后趋于稳定,上浮最大值出现在隧道上部基坑土体开挖完成之后、上部土体开挖期间;隧道结构横断面变形总体呈现“横鸭蛋”变形,隧道上部土体开挖时,隧道结构横断面变形呈现“竖鸭蛋”变形;及时对已开挖部分施作垫层、底板、压重等,可有效地控制下方隧道的变形。

**关键词** 地铁上盖物业; 基坑开挖; 隧道结构; 沉降; 收敛变形

**中图分类号** U456.3<sup>+</sup>2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.03.017

## Field Measurement Analysis of Metro Tunnel Deformation Caused by Overhead Property Foundation Pit Excavation

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

**Abstract** Based on the measured data of tunnel structure deformation of the underlying metro during the construction of Ningbo Aipan Plot project, the influence of the surrounding foundation pits excavation on the underlying tunnel structure is analyzed. The results show that the tunnel structure generally presents a trend of sinking first and then heaving. The value of tunnel heave increases first, then decreases, and finally tends to be stable. The maximum tunnel heave appears after the excavation completion of the upper foundation pit soil. During the excavation of upper soil, the tunnel heave deformation is the maximum. The tunnel cross section deformation generally presents the shape of a horizontal duck egg, while the shape deformation of a vertical duck egg occurs when tunnel upper part soil is excavated. The tunnel deformation can be effectively controlled by taking engineering measures such as cushion layer, floor, and weight-bearing on the excavated part in time.

**Key words** metro overhead property; foundation pit excavation; tunnel structure; settlement; convergence deformation

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

在城市可利用土地资源有限的前提下,地铁线路上方加盖物业被逐渐推广。但是,在地铁隧道上方开挖基坑,会引起坑底土体发生回弹变形,导致下方隧道的应力状态发生变化,隧道结构易产生竖向位移和收敛变形<sup>[1-3]</sup>。

文献[4]以上海某立交基坑工程为依托背景,分析了基坑施工过程中土体卸荷对邻近地铁隧道竖向位移的影响规律,并以此为依据推导出经验公式。文献[5]对某基坑工程沉降进行数值模拟,并与现场观测数据进行对比分析,研究表明:当盾构隧道在基坑下方时,基坑开挖卸载会导致隧道产生竖向隆起,在基坑开挖结束时隆起量达到峰值。文献[6]通过有限元模型分析发现基坑在选取适当的开挖顺序时,可降低基坑开挖对隧道的影响。而针对隧道的上盖物业施工,国内外学者在隧道周围群坑开挖对其结构的影响方面却鲜有研究。

本文以宁波市矮潘地块项目为背景,基于实测数据分析基坑群开挖对下方地铁隧道结构沉降、水平位移和收敛变形的影响,并进一步分析周围基坑群开挖过程中下方地铁隧道的变形特征,研究结论可为类似工程提供参考与借鉴。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

矮潘地块项目位于宁波市鄞州区,宁波轨道交通4号线隧道由东南至西北方向穿越该场地,将其划分为南侧、北侧及中间3个区域,如图1所示。其中:南、北两侧区域为1层地下室,开挖深度为5.2~6.7 m,基础型式为桩基,分界支护桩距离盾构隧道侧最近处约6.0 m;中间区域为地铁上盖地下室,基坑周圈的开挖深度为6.0 m,工程桩为钻孔灌注桩。

地铁盾构两侧 10.0 m 范围内的工程桩已施工完成。区间隧道顶部平均埋深约为 15.5 ~ 21.5 m。地铁区间段采用盾构法施工,其标准横断面如图 2 所示。盾构隧道管片厚度  $e$  为 0.35 m,外径  $D$  为 6.20 m,左、右两线净间距为 10.0 m。

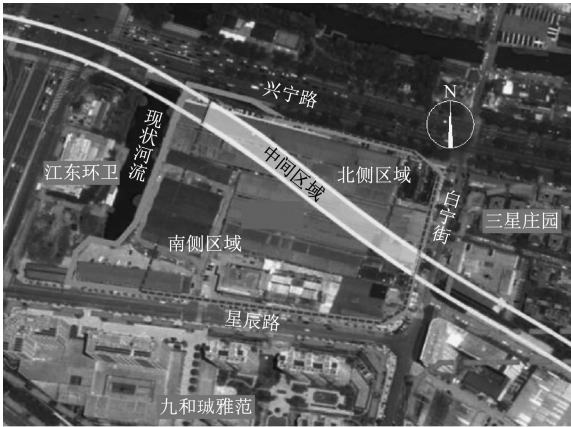


图1 矮潘地块的工程平面图

Fig.1 Engineering plan of Aipan plot

如图 2 所示,根据地质勘察报告,拟建场地的土

表 1 矮潘地块的土体物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of the Aipan plot soil

土层编号	土层名称	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	含水率 $W/\%$	层顶埋深/m	层厚/m
1-0	素填土	(18.00)	(5.0)		0	0.7 ~ 5.4
1-1	黏土	18.23	21.2	36.6	0.7 ~ 3.7	0.5 ~ 3.2
2-1	淤泥质粉质黏土	17.89	11.9	39.1	1.9 ~ 5.4	0.8 ~ 4.3
2-2	淤泥质粉质黏土	16.94	10.5	45.2	4.4 ~ 7.3	5.2 ~ 9.9
3-1	含粉砂粉质黏土	18.86	12.1	25.6	11.3 ~ 16.3	3.5 ~ 11.1
3-3	淤泥质粉质黏土	17.51	13.9	39.1	17.2 ~ 25.2	1.3 ~ 14.9
4-1	粉质黏土	18.50	26.0	32.0	22.5 ~ 35.7	2.2 ~ 15.2
4-2	粉质黏土	18.31	16.4	33.0	32.9 ~ 41.2	5.0 ~ 14.3

注:括号内数值为经验取值。

矮潘地块围护结构平面图如图 3 所示。为了减小地下室开挖对下方地铁隧道的影响,不同基坑区域采用了不同的支护方式,各区域支护桩的相关参数如表 2 所示。

1.2 基坑开挖方案及地铁隧道变形监测

宁波轨道交通 4 号线区间隧道横穿该地块,将地块地分为南侧区域、北侧区域,以及有地铁上盖物业的中间区域。为了减小地下室开挖对下方地铁隧道的影响,对该地块采用分坑开挖的施工方式。如图 3 所示:南、北侧两个区域共分为 20 个独立基坑进行施工,其中:B 区(细分为 B1 ~ B3 区块)为临近地铁区块;A 区(细分为 A1 ~ A5 区块)为中间区域,共分为 9 个独立基坑进行施工;C 区为距离

层主要是淤泥质粉质黏土、含粉砂粉质黏土和粉质黏土等。本工程地下水位深度为 1.6 ~ 2.7 m,水位年变化幅度约为 1.0 ~ 1.5 m。表 1 给出了该场地主要土层的物理力学指标。

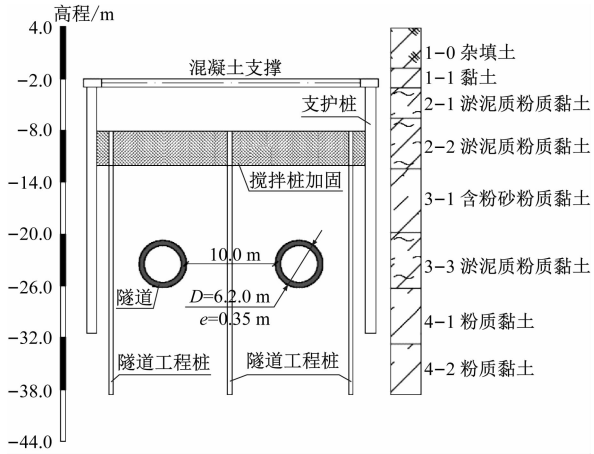


图2 矮潘地块地铁隧道段的标准横断面图

Fig.2 Standard cross-section drawing of metro tunnel section of Aipan plot

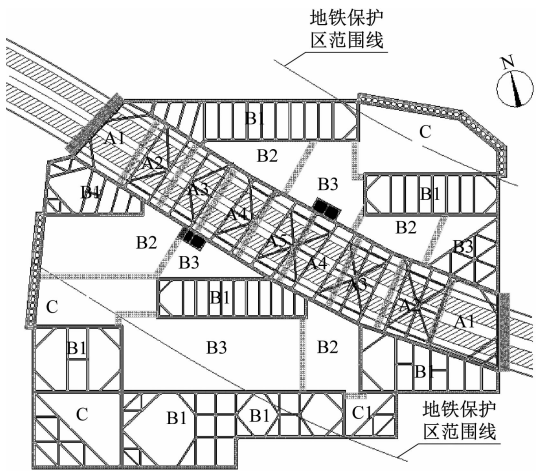


图3 矮潘地块围护结构平面图

Fig.3 Plan drawing of enclosure structure of Aipan plot

表 2 矮潘地块不同基坑区域的支护桩参数

Tab.2 Supporting pile parameters of different foundation pit areas in Aipan plot

桩型	布置区域	桩径/mm	桩净间距/mm	桩长/m
钻孔灌注桩	临近隧道两侧	800	200	23.0~28.0
	基坑周围	600	2 000	16.0~17.0
		700	2 500	18.0~19.0
三轴搅拌桩	B1 区块	650	450	16.0
	A1 区块	850	650	13.5~15.0

注:在三轴搅拌桩施工中,B1 区块支护桩的排列布局采用“插二跳一”的方式;A1 区块支护桩的排列布局采用“插一跳一”的方式。

地铁较远区域。基坑各阶段施工的开始时间和结束时间如表 3 所示。

表 3 矮潘地块基坑各阶段施工的开始时间和结束时间

Tab.3 Start time and end time of foundation pit construction at various working phases of Aipan plot

项目	施工开始时间	施工结束时间
隧道正上方搅拌桩施工	2020-03-23	2020-04-20
A、B、C 区围护结构施工	2020-04-27	2020-07-03
B1 区块施工	2020-07-18	2020-09-05
A 区施工	2020-09-23	2020-10-25
B2 区块、B3 区块、C 区施工	2020-11-12	2021-01-05

矮潘地块的总体施工顺序共分为 3 个阶段:

1) 第 1 阶段:开挖 B1 区块,同时地下室主体结构向上施工且保留支撑体系。

2) 第 2 阶段:开挖 A 区。先开挖 A1 区块,在 A1 区块地下室底板施工完成后开挖 A2 区块土方,同时 A1 区块地下室主体结构向上施工。以此工序类推,直至 A5 区块施工完成。

3) 第 3 阶段:开挖其余区块。按顺序依次实施

B2 区块、B3 区块、C 区施工。

为分析矮潘项目施工对既有地铁隧道的影响,沿隧道轴向选取上行线和下行线部分沉降监测点进行分析。其中:沉降监测点共 82 个(X1060~X855,S1060~S855);水平位移监测点共 98 个(X1060~X865,S1050~S855);隧道收敛变形监测点共 80 个(Sh1050~Sh855,Ss1050~Ss855,Xh1060~Xh865,Xs1060~Xs865)。

由于上行线和下行线的变形规律大致相同,本文以下行线数据为例进行分析。图 4 为与下行线隧道结构监测相关的测点平面位置分布图。



图 4 地铁下行线隧道结构监测点平面布置图

Fig. 4 Layout of monitoring point of metro down line tunnel structure

## 2 地铁隧道实测变形数据分析

### 2.1 地铁隧道结构累计沉降分析

图 5 给出了不同监测点累计沉降值随时间的变化曲线。

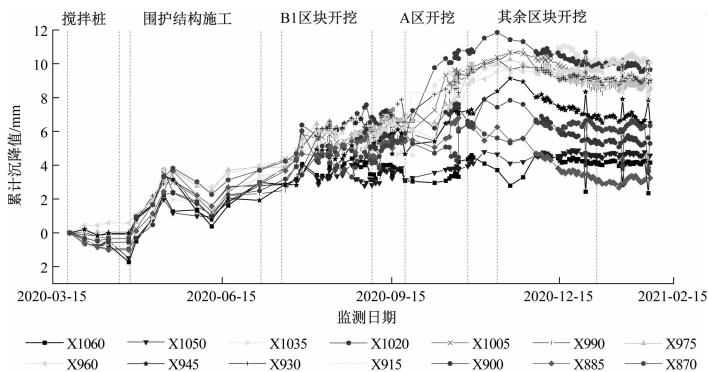


图 5 地铁下行线隧道各测点累计沉降时程曲线

Fig. 5 Cumulative settlement time history curve of metro down line tunnel measurement points

由图 5 可看出:

1) 随着项目施工的开展,隧道结构总体呈现先

下沉、后上浮的趋势。

2) 随着基坑的不断开挖,下部隧道结构的上浮

值呈现先增大、后减小、再增大、最后趋于稳定的趋势。

3) 在搅拌桩施工阶段,隧道结构呈下沉趋势,其原因在于搅拌桩重度大于原有的土体重度,隧道周围土体受到搅拌桩自重的影响,使得隧道结构产生一定的下沉。

4) 在围护结构施工阶段,隧道结构呈先上浮、后下沉趋势,其原因因为围护结构在成槽阶段存在土体卸载,周边土体隆起使得隧道结构上浮;在地下连续墙浇筑混凝土后,由于混凝土的重度大于土体的重度,使得土体产生沉降,导致隧道结构下沉。

5) 在 B1 区块和 A 区开挖期间,隧道结构呈明显的上浮趋势,其原因在于周边基坑开挖导致周围土体卸载,基坑底部隆起时带动周围土体产生向上的位移,使得隧道结构产生一定的上浮。

6) A 区开挖对隧道结构上浮的影响最大,其原因在于 A 区位于隧道结构的正上方,无法通过支护桩来减少 A 区坑底隆起对隧道结构的影响。

7) 在其余区块开挖期间,隧道结构呈明显的下沉趋势。其原因有两方面:一是因前阶段 A 区施工隧道结构变形过大,施工方在其余区块开挖完成后立即施作垫层并及时施作混凝土底板,并在累计沉降上浮量超过 10 mm 的测点处进行堆载,以控制隧道结构的进一步上浮;二是在此期间,B1 区块开始施工上部主体结构,该施工同样起到了堆载效果,能够控制下部土体隆起,进而控制隧道结构的上浮。

## 2.2 地铁隧道结构累计水平位移分析

选取矮潘项目下卧地铁隧道下行线的测点,对隧道结构累计水平位移进行分析,如图 6 所示(将图中水平位移向南取为正值)。

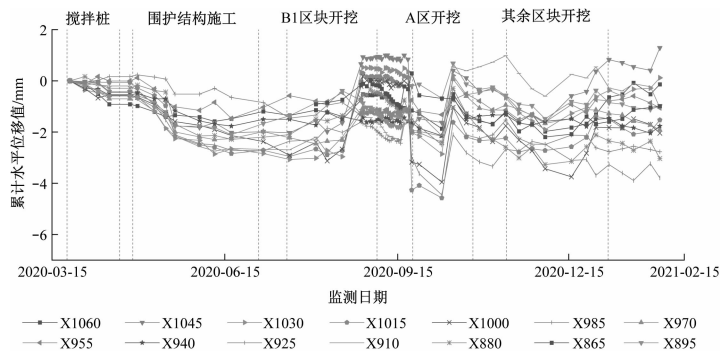


图 6 地铁下行线隧道各测点累计水平位移时程曲线

Fig. 6 Horizontal displacement time history curve of metro down line tunnel measurement points

由图 6 可以看出:

1) 随着矮潘项目的施工,隧道累计水平位移呈现先向北、后向南、而后再向北的趋势,其原因因为北侧区域中的 B1 区块基坑距离隧道更近,B1 区块基坑开挖带动周围土体向坑内移动,使得隧道产生了向北的水平位移。

2) 在 A 区开挖时,由于 A 区基坑坑底土体隆起,带动周围土体向 A 区坑内移动,使得隧道产生了向南的水平位移。

3) 在其余区块开挖时,由于两侧基坑开挖卸载引起分坑土体隆起,带动周围土体向坑内移动,隧道结构产生向北的水平位移,而后由于及时施作底板、垫层等措施,隧道结构的水平位移量趋于稳定。

## 2.3 地铁隧道结构收敛变形分析

仍选取下行线测点对结构收敛变形值进行分

析,如图 7 所示(图中横向收敛值为隧道衬砌拱腰两点之间的距离增量,将拱腰两点距离增大设为正值)。

由图 7 可以看出:

1) 随着矮潘项目的施工,隧道收敛变形先增大、后减小、而后趋于稳定的趋势,且隧道横截面呈现“横鸭蛋”变形趋势。原因主要为在 B1 区块开挖时,隧道两侧的土压力减少,而隧道上部因三轴搅拌桩施工导致隧道上部的土压力增大,隧道受到竖向挤压,横截面呈现“横鸭蛋”变形。

2) 由于 A 区土体开挖,隧道上部因土体卸载导致土压力减小,隧道受到横向挤压,横截面呈现“竖鸭蛋”变形趋势,隧道收敛值有所减小。

3) 其余区块开挖时,由于及时施作混凝土垫层、浇筑底板,隧道收敛值逐渐趋于稳定。

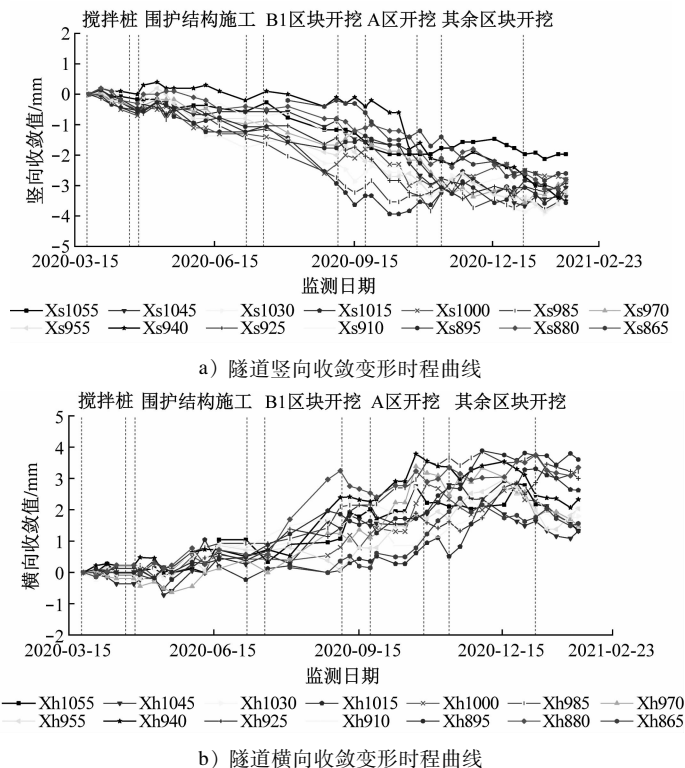


图7 地铁下行线隧道各测点收敛变形时程曲线

Fig. 7 Convergence deformation time history curve of metro down line tunnel measurement points

### 3 结论

1) 矮潘地块土建施工对下卧地铁隧道的结构变形产生了一定的影响。隧道结构在搅拌桩施工时呈下沉趋势,在基坑开挖阶段呈上浮趋势。对比不同开挖阶段的隆起情况,隧道上部土体开挖对隧道结构上浮值的影响最大。

2) 在矮潘项目基坑施工期间,隧道横向收敛变形呈现先增大、后减小、而后趋于稳定的趋势,隧道两侧基坑开挖会使得隧道结构横断面变形总体呈现“横鸭蛋”变形。隧道上部基坑土体开挖时,隧道结构横断面变形呈现“竖鸭蛋”变形趋势。

3) 垫层、底板施做的时效性决定了隧道变形的速率及变形绝对值的大小。及时对已开挖部分采取施作垫层、底板和压重等措施,能够有效地控制地铁隧道结构的变形。

### 参考文献

[1] 张俊峰. 软土地区基坑对下卧隧道变形的影响与控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.  
ZHANG Junfeng. Tunnel displacement induced by above excavations in soft soils and its controlment[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013.

[2] 李平, 杨挺, 刘汉龙, 等. 基坑开挖中既有下穿地铁隧道隆起变形分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2011(5): 480.  
LI Ping, YANG Ting, LIU Hanlong, et al. Heave deformation of existing tunnels under new tunnel excavation[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011(5): 480.

[3] SHI J, NG C W W, CHEN Y. Three-dimensional numerical parametric study of the influence of basement excavation on existing tunnel[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 63: 146.

[4] 李志高, 刘浩, 刘国彬, 等. 基坑开挖引起下卧隧道位移的实测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005(4): 619.  
LI Zhigao, LIU Hao, LIU Guobin, et al. Influence analysis of deep-dip excavation on down tunnel based on the measured displacement[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005(4): 619.

[5] 魏纲. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的实测与分析[J]. 岩土力学, 2013(5): 1421.  
WEI Gang. Measurement and analysis of impact of foundation pit excavation on below existed shield tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013(5): 1421.

[6] BIAN X, HU H, ZHAO C, et al. Protective effect of partition excavations of a large-deep foundation pit on adjacent tunnels in soft soils; a case study[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021(7): 5693.

(收稿日期: 2021-06-11)