

杭州某深基坑工程施工对地铁隧道的影响研究

徐银锋, 张宏建, 赵华, 岑维杰
(杭州市勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 随着人类城市化进程不断发展, 对于城市地下空间的开发规模也逐步增加, 涉及到的基坑工程也逐步向着更深更大的方向发展, 针对基坑支护设计的要求也越来越高。本文以杭州市余杭区某地铁上盖项目为例, 详细介绍了其基坑特点及基坑支护设计方案, 并采用了 Plaxis 有限元数值模拟软件建立三维模型, 模拟基坑施工全过程, 最后结合监测数据分析了基坑开挖过程中对邻近地铁隧道的影响, 并总结归纳了施工过程中造成地铁隧道变形报警的原因。本项目基坑面积较大, 深度较深, 且涉及保护对象较多, 本工程的变形报警原因可以为后续邻近区域或类似工程提供参考。

关键词: 深大基坑; 变形监测; 数值模拟; 有限元; 三维模型; 数据分析

中图分类号: TU473.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S1-0097-08

Study on the influence of construction of a deep foundation pit project on subway in Hangzhou

XU Yin-feng, ZHANG Hong-jian, ZHAO Hua, CEN Wei-jie

(Hangzhou Geotechnical Engineering and Surveying Research Institute with Limited Liability, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: With the continuous development of human urbanization process, the development scale of urban underground space has gradually increased, and the foundation pit engineering involved has gradually developed in a deeper and larger direction. Meanwhile, the requirements for foundation pit support design are getting higher and higher. Taking a subway upper cover project in Yuhang District of Hangzhou City as an example, this paper introduced the characteristics of foundation pit and its support design scheme in detail. The finite element numerical software Plaxis was used to establish a three-dimensional model to simulate the whole construction process of the foundation pit. Finally, combined with monitoring data, the influence of foundation pit excavation on adjacent subway tunnels was analyzed. The causes of subway tunnel deformation alarm during construction are summarized. The excavation area of this project is large, the depth is deep, and there are many protected objects involved. The deformation alarm causes of this project can provide a reference for subsequent neighboring areas or similar projects.

Key words: deep and large foundation pits; deformation monitoring; numerical simulation; finite element; 3D model; data analysis

0 引言

伴随着人类社会对地下空间需求的日益增长, 基坑开挖深度和面积不断增加, 在复杂的城市环境中越来越多的深大基坑投入建设, 也对控制基坑变形提出了更高的要求。在地铁周边开挖基坑势必会对地铁隧道产生不利影响, 由此引起的事故数量也逐渐增加, 造成了大量人员伤亡和财产损失^[1-10]。因此, 研究基坑开挖对既有地铁隧道的影响具有重大意义。

本文以杭州市余杭区地铁上盖综合体项目为

例, 通过 Plaxis 3D 有限元数值模拟软件, 并结合现场监测数据, 研究分析了深基坑开挖对邻近地铁的变形影响以及施工中的重要风险点。研究结果对后续类似工程具有借鉴意义。

1 工程概况

1.1 项目概况

总体情况: 项目位于杭州市余杭区, 东邻龙舟路(在建), 南至余杭塘河及绿化带, 西邻杭腾大道

(已建),北至钱神大街(在建)。本项目由3个地块组成,分别为I-09、I-10和I-15。

地铁分布:本项目西侧为杭州地铁3号线文一西路站—龙舟路站区间,涉及保护的地铁设施包括文龙区间盾构段(含2号联络通道兼泵站)、文龙区间盾构工作井、文龙区间明挖段(含1号联络通道)、龙舟路车站主体、龙舟路站附属1号风亭及C出入口,目前均在土建结构施工中。本项目基坑与地铁设施关系详见图1。

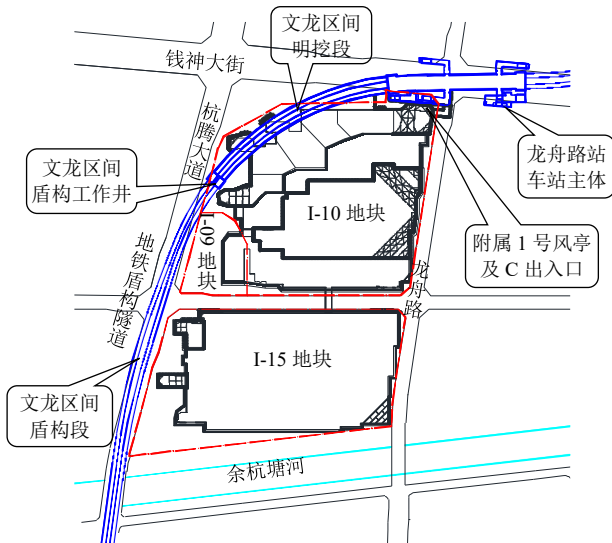


图1 本项目基坑与地铁设施关系

Fig. 1 Relationship between the foundation pit and subway facilities

设计方案:距地铁50m内工程桩为旋挖成孔灌注桩,直径为700~800mm,桩长26~38m不等。明挖段上盖段主楼为扩底桩,直径为1200mm,扩底直径1600mm,有效桩长35m。距地铁50m外主楼桩基础为灌注桩,地库工程桩为预应力管桩,桩型为PHC600AB130,有效桩长22m。

1.2 工程地质条件

本场地以冲湖相沉积的陆相黏性土为主,间夹海积、湖积成因的软土,深部古苕溪的冲洪积相沉积的碎石类土和砂性土等河床堆积物,底部基岩为白垩系的泥质粉砂岩(局中含砾),属沉积岩类。基坑开挖范围内影响土层自上而下为:杂填土(mlQ)、素填土(mlQ)、黏土(粉质黏土)(L-hQ₄²)、淤泥(淤泥质粉质黏土)(mQ₄³)、粉质黏土(al-lQ₄¹)、粉土夹粉质黏土(al-lQ₄¹)、粉质黏土(al-lQ₄¹)、淤泥质粉质黏土(mQ₄¹)、含黏粉砂(al-lQ₃²)、黏土(al-lQ₃²)、粉质黏土(灰色)(lQ₃²)、粉质黏土(al-lQ₃²)、含黏粉砂(alQ₃²)、圆砾(al-plQ₃²)、粉质黏土(lQ₃²)、圆砾(al-plQ₃²)。主要土层物理力学性质指标如表1所示。

1.3 水文地质条件

场地内无河流类等流动地表水。钻探揭示场地地下水主要为第四系松散孔隙型潜水、孔隙型承压水、基岩裂隙水。

表1 土层物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of soils

层号	岩土名称	天然重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	水平渗透系数 $k_H/(\times 10^{-4} \text{ cm}/\text{s})$	垂直渗透系数 $k_V/(\times 10^{-4} \text{ cm}/\text{s})$	固结快剪试验	
					黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
① ₁	杂填土	19.0	—	—	(8.0)	(14.0)
① ₂	素填土	17.8	—	—	(12.0)	(9.0)
② ₁	黏土	18.5	0.01	0.05	18.0	14.0
② ₂	黏质粉土	18.6	0.70	0.20	10.0	20.0
③	淤泥	17.2	0.01	0.01	12.0{10.8}	7.5{7.0}
④ ₁	粉质黏土	19.2	0.01	0.01	28.0	16.0
④ ₂₋₁	粉质黏土夹粉土	19.1	0.07	0.50	25.0	13.0
④ ₂₋₂	粉土夹粉质黏土	19.1	0.01	0.10	10.0	22.0
④ ₃	黏土	19.0	—	—	30.0	18.5
⑤	淤泥质黏土	17.7	—	—	12.0{10.8}	11.0{10}
⑥ ₁	含黏粉砂	19.6	—	—	11.0	25.0
⑥ ₂	黏土	19.0	—	—	32.0	8.0
⑥ ₂₋₁	粉砂	19.0	—	—	15.0	28.0
⑦ ₁₋₁	粉质黏土	19.6	—	—	12.0	16.0
⑧ ₃	圆砾	(20.0)	—	—	(5.0)	(30.0)

注:本表各参数取自岩土工程勘察报告,()内数值为经验指标,{}内数值为抗剪强度指标打九折。

(1) 孔隙型潜水

存在于本工程场地浅部地层的地下水性质属松散孔隙型潜水, 主要分布在①填土、②黏质粉土中。①填土, 透水性一般, ②黏质粉土, 透水性稍强。地下水水位埋深较浅, 详勘期间在勘探孔内测得地下水水位埋深在现地表下 0.50~3.0 m, 高程在 1.44~4.07 m (85 国家高程), 年均变化幅度值约 1.5~2.0 m。

(2) 孔隙型承压水

拟建场地中部承压水, 主要赋存于③圆砾中, 水量丰富, 隔水层为上部的淤泥质土和黏性土层。承压水受侧向径流补给, 富水性好, 具有明显的埋藏深、污染少、水量大、流速极慢、咸-微咸的特点。

(3) 基岩裂隙水

场地深部为基岩裂隙水, 主要赋存于⑫风化基岩的裂隙之中, 主要受上部土层补给, 侧向补给较少。

为规划祥余线, 北侧为钱神大道, 杭州地铁 3 号线文一西路—龙舟路站区间由北向南贯穿 I-10 地块。

杭腾大道距 I-10 地块基坑最小平面净距为 17.7 m, 杭腾大道距 I-15 地块基坑最小平面净距为 7.5 m。距基坑由近及远分布管线为通信管、燃气管、雨水管、污水管、给水管和电力管。

龙舟路(已施工部分)距 I-10 地块基坑最小平面净距为 1.4~6.0 m, 距基坑由近及远分布管线为通信管、给水管、雨水管、燃气管和通信管。

钱神大街(已施工部分)距 I-10 地块基坑最小平面净距为 51.0 m, 距基坑由近及远分布管线为电力管、给水管、雨水管、污水管、雨水管、燃气管和通信管。

仓兴街距 I-10 地块基坑最小平面净距为 7.0 m, 仓兴街距 I-15 地块基坑最小平面净距为 2.3 m。由南向北分布管线为 10 kV 电力管、给水管、雨水管、污水管、燃气管和通信管。

2.2 基坑围护方案选择

根据工程规模、挖深、分坑、周边环境、地质情况, 按照“安全、经济、施工方便”的原则, 结合邻近类似工程经验, 本工程基坑具体围护选型如表 2 所述, 基坑平面布置以一期为例如图 2~3 所示。

2 基坑围护方案选型

2.1 基坑工程特点

本项目西侧为杭腾大道, 东侧为龙舟路, 南侧

表 2 基坑围护选型表

Table 2 Selection of foundation pit support

分区	挖深/m	净距/m	面积/m ²	尺寸/m	围护方案	
I-15	⑧	4.70	19.3	1 827.3	$L_1=22.7$	西侧(地铁侧): $\Phi 800@1 050$ 钻孔桩+700 TRD+一道混凝土撑+三轴墩式被动区加固; 东侧: 1:0.8 放坡+IV 拉森钢板桩 12 m; 北侧: $\Phi 800@1 050$ 钻孔桩(双排桩)+700 TRD
	⑨	4.70	18.1	1 014.1	$L_1=22.1$	其余侧(地铁侧): $\Phi 800@1 050$ 钻孔桩+700 TRD+一道混凝土撑; 东侧: 1:0.8 放坡+IV 拉森钢板桩 12 m
I-09		3.85	47.3	2 268.1	$L_1=60.9$	西侧(地铁侧): 放坡+IV 拉森钢板桩 12 m; 南侧: 1:0.8 放坡+IV 拉森钢板桩 9 m; 东侧: 1:0.8 放坡+留土
	①	7.55	连通区	276.3	$L_1=11.9$	$\Phi 900@1 100$ 钻孔桩+700 TRD+一道混凝土撑+一道钢撑
I-10	②	6.35	2.0	2 055.4	$L_1=35.1$	其余侧(地铁侧): $\Phi 900@1 100$ 钻孔桩+700 TRD+一道混凝土撑; 南侧: $\Phi 700@900$ 钻孔桩+三轴+一道混凝土撑
	③	3.95	10.2 紧 贴明挖 区间 附属	2 946.4	$L_1=33.8$	明挖区间侧: 利用明挖区间 800 地墙; 地铁附属侧: $\Phi 900@1 100$ 钻孔桩+700 TRD+一道混凝土撑、 $\Phi 600@900$ 钻孔桩+三轴搅拌桩+一道混凝土撑; 南侧: 放坡+IV 拉森钢板桩 12 m
	④	3.95	紧贴明 挖区间	2 494.2	$L_1=46.3$	明挖区间侧: 利用明挖区间 800 地墙; 东侧: 放坡+IV 拉森钢板桩 12 m
	⑤	西侧 6.10 东侧 3.95	紧贴明 挖区间	3 129.1	$L_1=40.3$	明挖区间侧: 利用明挖区间 800 地墙; 东侧: 放坡+IV 拉森钢板桩 12 m; 西侧: $\Phi 800@1 050$ 钻孔桩(双排桩)+三轴搅拌桩

分区	挖深/m	净距/m	面积/m ²	尺寸/m	围护方案
⑥	西侧 6.10	紧贴明挖区间	2 520.6	L ₁ =42.0	明挖区间侧：利用明挖区间 800 地墙；东侧：放坡+IV 拉森钢板桩 12 m；
	东侧 3.95				西侧：Φ 800@1 050 钻孔桩（双排桩）+三轴搅拌桩、Φ 800@1 050 钻孔桩+三轴搅拌桩+一道混凝土撑
I-10	区间 4.0		5 711.4	L ₁ =52.3	明挖区间侧：利用明挖区间 800 地墙；东侧：放坡+IV 拉森钢板桩 12 m；
	⑦	工作井 4.2			西侧：Φ 800@1 050 钻孔桩+三轴搅拌桩+一道混凝土撑、Φ 800@1 050 钻孔桩+三轴搅拌桩、Φ 800@500 全套管咬合桩+一道混凝土撑

注：1. 地铁控制保护区内基坑分为①~⑨区，地块内各分区采用放坡，要求跳区开挖施工；2. L₁为与轨道交通设施平行方向的基坑边长；3. 施工工序：第一批次地保区内②、④、⑥、⑧、⑨区→第二批次地保区内①、③、⑤、⑦区及 I15 坡道（配筋垫层浇筑）→地保区外一层区域底板→地保区外二层区域底板。

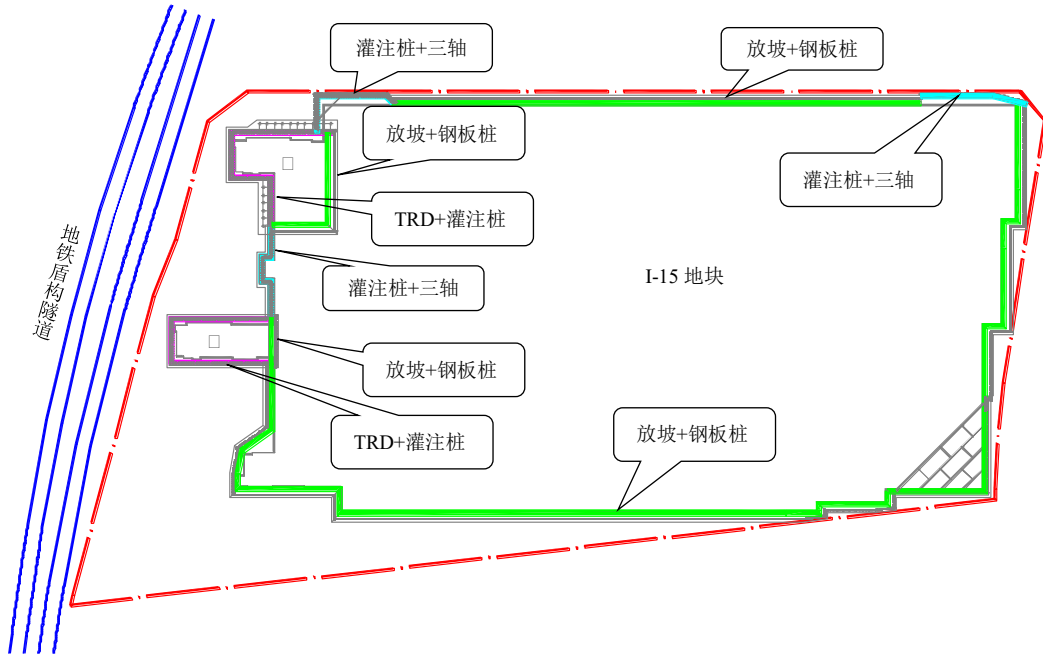


图 2 项目 I-15 地块围护结构平面布置图
Fig. 2 Layout of project I-15 bracing structure

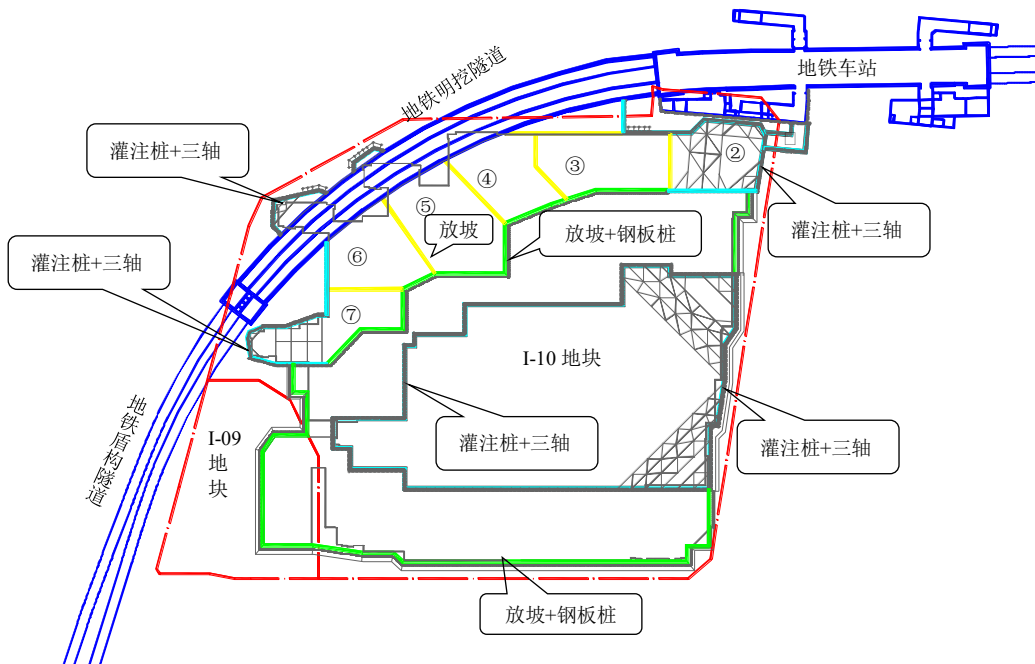


图 3 项目 I-09/I-10 地块围护结构平面布置图
Fig. 3 Layout of project I-09/I-10 bracing structure

3 有限元数值模拟

3.1 模型建立

采用 Plaxis 3D 有限元数值模拟软件建立三维有限元模型分析本项目基坑施工对地铁设施的影响。模型的 X 方向取 600 m, Y 方向取 600 m, Z 方向(厚度方向)取 60 m。为确保分析结果不受边界约束的影响,基坑距模型边界大于基坑挖深的 3 倍,整体模型如图 4 所示,新建设施和既有地铁设施的关系如图 5 所示。

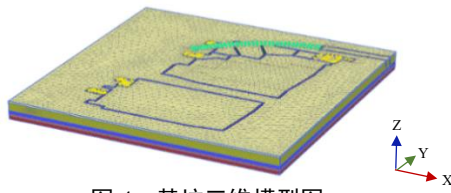


图 4 基坑三维模型图

Fig. 4 3D model of foundation pit

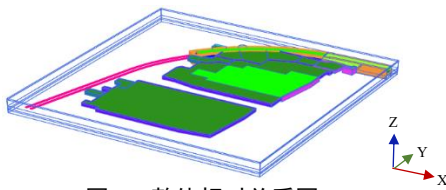


图 5 整体相对关系图

Fig. 5 Relative position between the subway and the foundation pit

3.2 模型参数

本项目根据项目施工现状、地铁变形、基坑测斜和变形原因进行岩土体参数的反演,反演后的土体参数如下表。岩土体单元采用小应变硬化土本构模型,结构单元采用弹性本构模型。桩基础采用桩单元,既有隧道衬砌、地下室的板和墙采用板单元,既有地下室柱子和支撑采用梁单元,汽车坡道考虑后期运营时荷载为 15 kPa。

模型底部的约束条件为水平、竖直方向都固定;模型两侧约束条件为水平方向固定,竖直方向自由;地表面自由。土体 HSS 模型参数如表 3 所示。

3.3 计算结果

根据 Plaxis 3D 数值模拟分析结果,通过三维数值分析,本项目施工对盾构隧道最大水平变形为 6.4 mm,竖向变形为-3.0 mm,收敛变形为 7.0 mm;盾构工作井最大水平变形为 5.0 mm,竖向变形为-3.0 mm,差异变形为 3.0 mm;文龙区间明挖段最大水平变形为 9.9 mm,竖向变形为-4.0 mm,差异变形为 5.0 mm;龙舟路车站主体最大水平变形为 4.5 mm,竖向变形为-3.0 mm,差异变形为 3.0 mm;附属 1 号风亭和 C 出入口最大水平变形为 7.0 mm,竖向变形

为-4.0 mm,差异变形为 4.0 mm。详见图 6~8。

表 3 土体 HSS 模型参数

Table 3 Parameters of soil HSS model

层号	岩土名称	E_{50}/MPa	$E_{\text{oed}}/\text{MPa}$	E_{ur}/MPa
① ₁	杂填土	3.0	3.0	9.0
② ₂	黏质粉土	5.5	5.5	16.5
③	淤泥	1.5	1.5	6.0
④ ₃	粉质黏土	7.5	7.5	30.0
⑧ ₃	圆砾	16.0	16.0	48.0
⑨	粉质黏土	7.5	7.5	30.0
⑩	圆砾	18.0	18.0	54.0
⑫	泥质粉砂岩	40.0	40.0	120.0

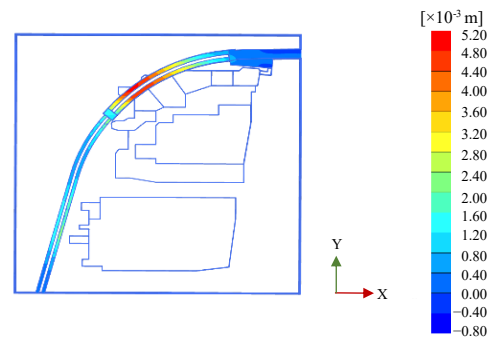


图 6 地铁设施水平变形图(X向)

Fig. 6 Horizontal deformation diagram of subway facilities (X-direction)

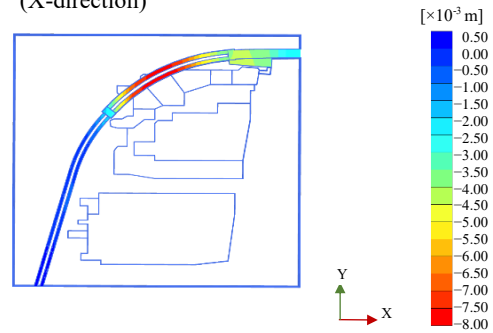


图 7 地铁设施水平变形图(Y向)

Fig. 7 Horizontal deformation diagram of subway facilities (Y-direction)

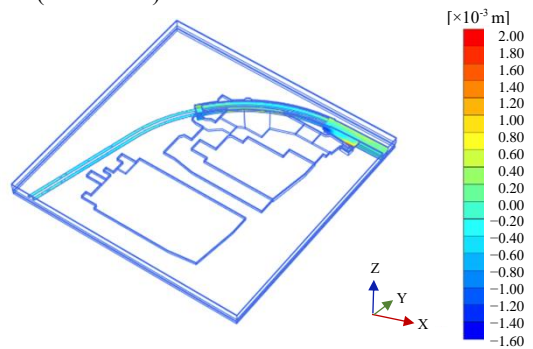


图 8 地铁设施竖向变形图(Z向)

Fig. 8 Vertical deformation diagram of subway facilities (Z-direction)

计算获得的各工况下深层土体最大水平位移以及地表沉降如表 4 所示。

表4 明挖法地铁设施的计算变形最大值统计表

Table 4 Statistical table of maximum value of calculated deformation of open-cut subway facilities		mm		
地铁设施	施工工况	②、④、⑥、⑧、⑨ 区开挖到坑底	①、③、⑤、⑦区开挖到底且 I-15 坡道配筋垫层浇筑完成	项目施工完成
文龙区间盾构段	水平变形 (X 向)	+1.3	+2.6	+4.4
	水平变形 (Y 向)	+0.2	-1.0	+0.3
	竖向变形	-0.5	-0.8	-1.0
	收敛变形	+1.0	+2.5	+5.0
文龙区间盾构工 作井	水平变形 (X 向)	+0.6	+1.2	+2.0
	水平变形 (Y 向)	-0.2	-1.1	-3.0
	竖向变形	-0.2	-0.5	-1.0
	差异沉降	-0.2	-0.5	-1.0
文龙区间 明挖段	水平变形 (X 向)	+1.3	+2.4	+5.0
	水平变形 (Y 向)	-3.1	-3.9	-7.9
	竖向变形	+0.9	+1.1	+2.0
	差异沉降	+1.0	+1.2	+2.0
龙舟路站 车站主体	水平变形 (X 向)	+0.3	+0.3	+0.4
	水平变形 (Y 向)	-2.0	-2.3	-2.5
	竖向变形	-0.3	-0.7	-1.0
	差异沉降	-0.3	-0.7	-1.0
附属 1 号风亭及 C 口	水平变形 (X 向)	+0.3	+0.4	+0.4
	水平变形 (Y 向)	-2.0	-3.0	-5.0
	竖向变形	+0.7	+1.1	+2.0
	差异沉降	+0.7	+1.2	+2.0

注：水平变形 X 向朝东为正，水平变形 Y 向朝北为正，竖向变形“-”为沉降，收敛变形“+”为扩径。

4 现场实测数据分析

2022年5月29日—2022年10月21日对该项目施工影响区内地铁隧道进行自动化监测，共146期自动化监测日报。

根据监测数据统计情况来看，本工程施工期间，地铁隧道各项监测数据无超报警值情况。工后各测项变化较平稳，工后100d最大变化速率为0.028mm/d，小于停测要求的±0.03mm/d。

4.1 竖向变形

截至2022年10月21日施工影响区自动化监测数据最大累计变化量：道床沉降上行线为-5.4mm，

下行线为-5.3mm，详见图9~10，与数值模拟计算结果较接近。

4.2 水平变形

截至2022年10月21日施工影响区自动化监测数据最大累计变化量：水平位移上行线为3.0mm，下行线为3.5mm，详见图11~12，与数值模拟计算结果较接近。

4.3 收敛变形

截至2022年10月21日施工影响区自动化监测数据最大累计变化量：收敛上行线为1.4mm，下行线为-1.9mm，详见图13~14，与数值模拟计算结果较接近。

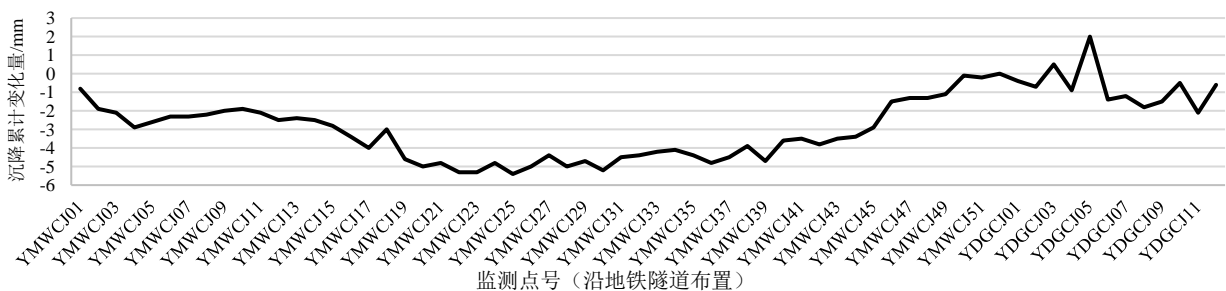


图9 地铁上行线道床自动化沉降累计变化量曲线图

Fig. 9 Cumulative automatic settlement of ballast bed on upbound subway

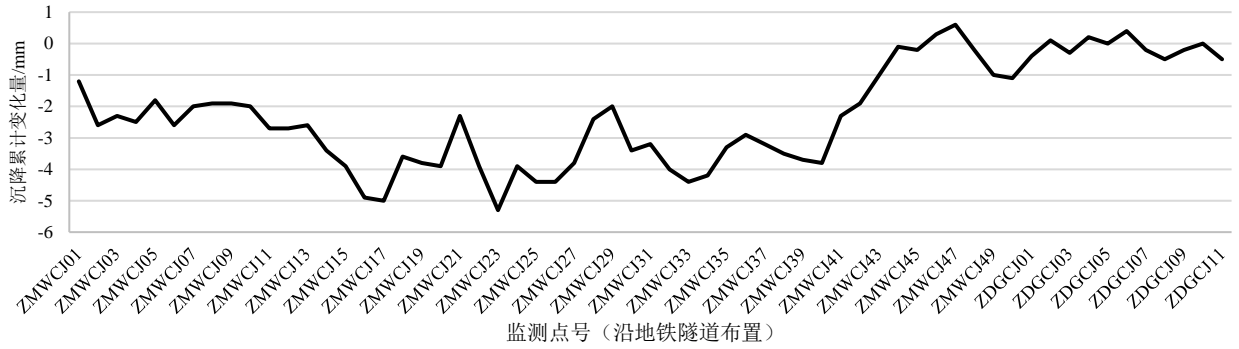


图 10 地铁下行线道床自动化沉降累计变化量曲线图

Fig. 10 Cumulative automatic settlement of ballast bed on downbound subway

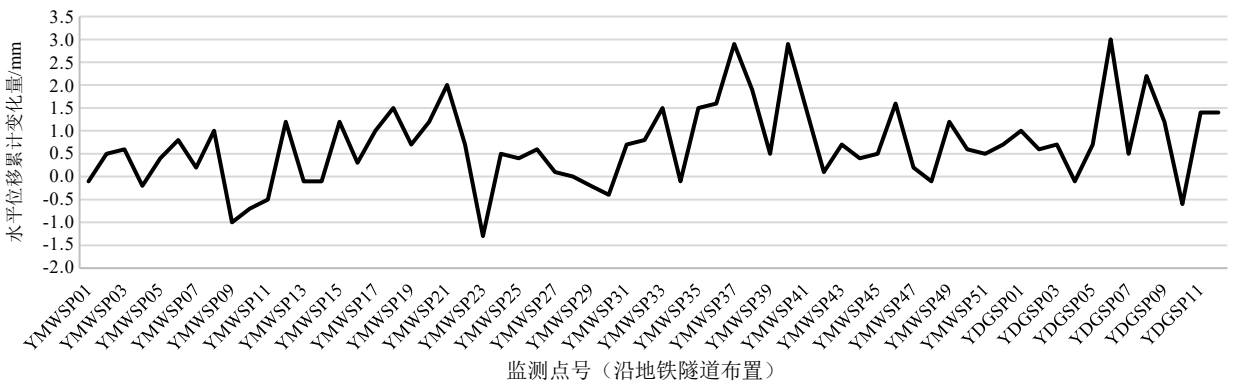


图 11 地铁上行线自动化水平位移累计变化量曲线图

Fig. 11 Cumulative automatic horizontal displacement on upbound subway

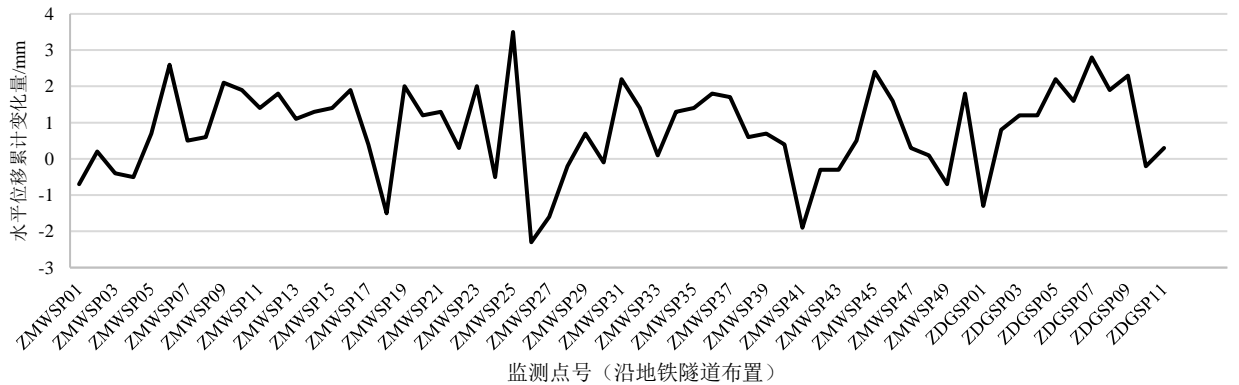


图 12 地铁下行线自动化水平位移累计变化量曲线图

Fig. 12 Cumulative automatic horizontal displacement on downbound subway

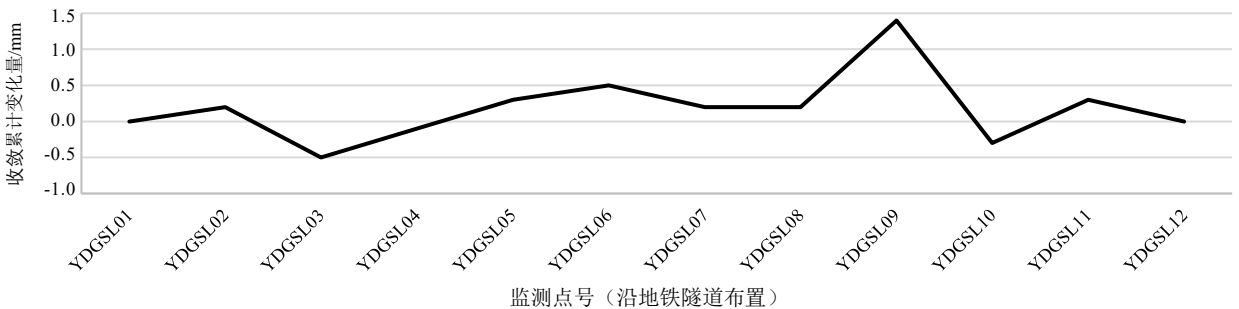


图 13 地铁上行线自动化收敛累计变化量曲线图

Fig. 13 Cumulative automatic convergence on upbound subway

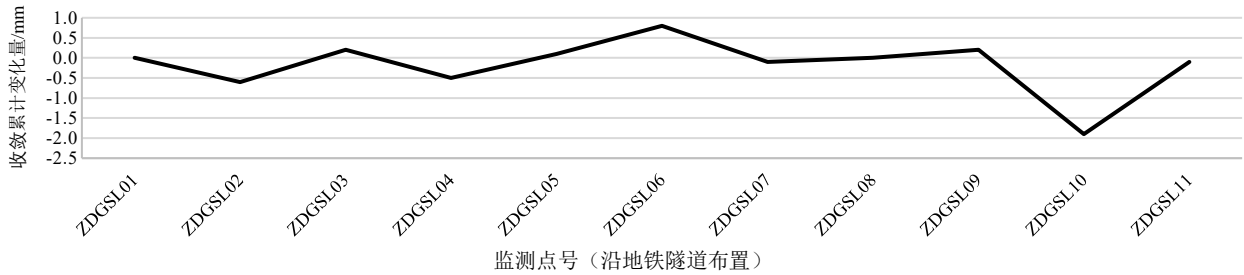


图 14 地铁下行线自动化收敛累计变化量曲线图

Fig. 14 Cumulative automatic convergence on downbound subway

5 结 论

针对本深大基坑案例,结合数值模拟和基坑施工监测数据,总结如下:

(1)本工程位于杭州软土地区,施工过程中对隧道有一定影响,但工后监测数据变化较平稳,数据稳定。工后 100 d 各项监测数据最大变化速率为 0.028 mm/d,小于停测要求的 ± 0.03 mm/d,说明整体分坑方式和支护形式成熟可靠。

(2)前期数值计算结果在一定程度上与实测结果较为一致,说明所建立数值模型合理可靠,工程中借助数值软件方法进行辅助设计具有一定的价值。

(3)基坑开挖应分层分段分块对称开挖,附属设施两侧土方需平衡开挖。应加强对基坑与地铁监测联控,加强施工管理,根据监测数据及时调整施工方案,进行动态设计和信息化施工。

(4)本项目基坑面积较大,深度较深,且涉及保护对象较多,本工程的变形报警原因可以为后续邻近区域或类似工程提供参考。

参考文献

[1] 沈华骏,蒋正,祝斌. 软土地区某地铁车站深基坑变形分析[J]. 城市勘测, 2022(5): 184-189.
SHEN Hua-jun, JIANG Zheng, ZHU Bin. Deformation analysis of deep foundation pit of a subway station in soft soil area[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2022(5): 184-189.

[2] 雷崇. 杭州地区坑底软弱土对基坑变形的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
LEI Chong. Effect of Hangzhou soft-clay on deformation of foundation pit[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

[3] 胡琦,许四法,陈仁朋,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, 35(增刊 2): 537-541.
HU Qi, XU Si-fa, CHEN Ren-peng, 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, 35(S2): 537-541.

[4] 许斌. 杭州软土地区地铁车站深基坑开挖引起的变形效应分析研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
XU Bin. Analysis on effect of deep foundation pit excavation of metro station in soft soil area of Hangzhou[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.

[5] 刘瑜. 杭州地铁工程某车站深基坑及周边环境变形监测研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018.
LIU Yu. Research on the deformation monitoring of deep foundation pit and surrounding environment of a metro station in Hangzhou[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2018.

[6] 袁静,刘兴旺,陈卫林. 杭州粉砂土地基深基坑施工对邻近地铁隧道、车站的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊 1): 398-403.
YUAN Jing, LIU Xing-wang, CHEN Wei-lin. Effect of construction of deep excavation in Hangzhou silty sand on adjacent metro tunnels and stations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 398-403.

[7] 汪小兵,贾坚. 深基坑开挖对既有地铁隧道的影响分析及控制措施[J]. 城市轨道交通研究, 2009, 12(5): 52-57.
WANG Xiao-bing, JIA Jian. The influence of deep foundation pit excavation on nearby metro tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2009, 12(5): 52-57.

[8] 李伟强,孙宏伟. 邻近深基坑开挖对既有地铁的影响计算分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊 1): 419-422.

(下转第 111 页)