

【工程应用】

基于已有实测数据的深基坑开挖对邻近 地铁车站影响的实例简析

徐良仲¹, 赖小勇², 李慧慧²

(1. 上海虹源盛世投资发展有限公司, 上海 200003; 2. 杭州市勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 邻近既有地铁站的基坑, 在开挖时会因土体卸荷作用引起地铁站的变形。本文以杭州地铁6号线旁侧某商业项目基坑工程为例, 通过Plaxis 3D有限元软件建立三维模型进行数值模拟, 通过施工过程评估来预测基坑后续变形, 对深基坑开挖时对邻近既有地铁站的影响进行了分析, 可供类似工程参考。

关键词: 深基坑; 开挖; 地铁站; 施工过程评估

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)03-0238-08

Case study on impact of deep excavation on adjacent subway tunnels based on the existing measured data

XU Liang-zhong¹, LAI Xiao-yong², LI Hui-hui²

(1. Shanghai Hongyuan Shengshi Investment Development Co., Ltd., Shanghai 200003, China;

2. Hangzhou Geotechnical Engineering & Surveying Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

Abstract: The foundation pit adjacent to the existing subway station may lead to the deformation of subway station due to the unloading effect during excavation. This paper takes the foundation pit of a commercial project beside Hangzhou Metro Line 6 as an example, and establishes three-dimensional model using PLAXIS 3D finite element software for numerical simulation. Through the construction process evaluation, the subsequent deformation of the foundation pit is predicted, and the influence of the deep excavation on the adjacent existing subway station is analyzed. The results can provide reference for similar projects.

Key words: deep foundation pit; excavation; subway station; construction process assessment

0 引言

随着城市建设的快速发展, 城市地下空间日益紧张, 大量的基坑工程邻近已运营或在建的地铁设施, 地铁设施保护区变形控制严格, 需采取有效的手段来控制基坑的变形。

高盟等^[1]基于FLAC软件建立模拟基坑开挖过程的三维模型, 分析了紧贴已运营车站基坑施工的工程实例, 模拟了各种施工方式及施工参数, 并进行对比分析。李伟强等^[2]针对某工程深基坑与邻近地铁站的相互影响, 应用有限元建立岩土-结构整体计算模型, 通过分析预测基坑回弹量大, 开挖过程中对地铁结构产生竖向位移较大。曾远等^[3]通

过数值模拟分析, 研究了张杨路地铁站基坑开挖时两车站间距、源头变形、土体弹性模量3个因素对在运营车站变形的影响; 马乾瑛等^[4]运用数值仿真分析模型, 研究了基坑施工过程中土体应力、应变特征, 分析了基坑开挖对地铁车站结构的影响, 评估了地铁车站结构的安全性, 对项目进行可行性分析, 并给出了建议措施。总的来讲目前的研究工作针对基坑施工过程中的模拟分析, 及后续施工工况的变形增量预测涉及较少。

本文以杭州市某施工过程中的商业项目地下室基坑工程为例, 利用Plaxis 3D有限元软件, 采用土体硬化(HSs)模型对其进行施工过程阶段数值模拟, 模拟参数取值考虑了地基土强度折减、围护结

构施工质量、时空效应、基坑既有变形等诸多问题对土体强度、围护结构刚度等指标进行了折减。模拟结果与理正深基坑设计计算软件进行了比较, 验证了数值分析的有效性, 对类似工程有参考意义。

1 项目简介

1.1 项目概况

项目位于杭州市转塘镇, 之浦路和云河路交叉口的西北角。项目总用地面积 89 303 m², 总建筑面积 413 144 m², 下设 3 层地下室, 基坑开挖深度约 18.6 m, 桩基采用钻孔灌注桩基础。

基坑北侧为已建某地铁车站站房, 邻近本基坑段车站底埋深约 18.5~18.8 m。车站为地下二层岛式车站, 车站总建筑面积 20 977 m², 车站有效站台中心里程处轨面埋深为 16.136 m, 顶板覆土 2.61~4.89 m, 长度 472.4 m, 标准段宽度 19.9 m。车站采用明挖顺筑法施工。车站共设置 3 个出入口, 3 组风亭组, 5 个紧急疏散口。车站北侧设外挂地下一层附属一个。A、C 出入口、1~3 号疏散口已施工完成并已回填。本基坑围护桩与地铁站房地墙净距最小约 4 m, 与已建成附属结构净距最小约 3.3 m, 见图 1。

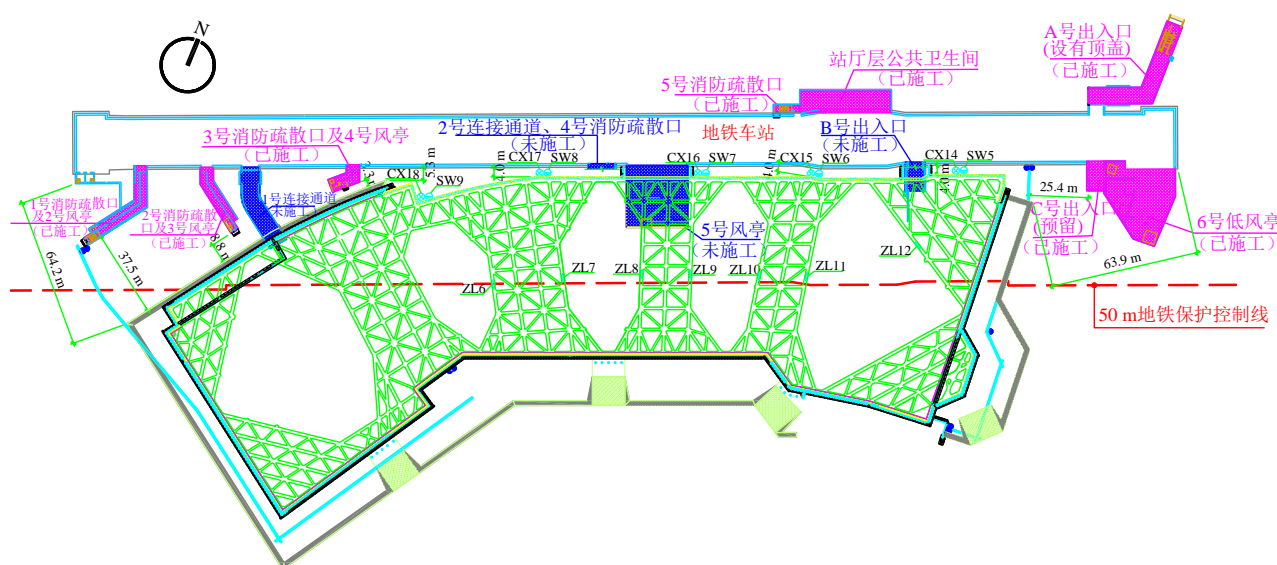


图 1 基坑平面示意图

Fig. 1 Schematic plan of foundation pit

1.2 工程地质条件

根据地质勘察报告, 基坑影响深度范围内的地基土主要为填土、黏质粉土、圆砾、淤泥质粉质黏土、角砾混粉质黏土以及其下的全风化、强风化、中风化泥质粉砂岩等。浅部除地表 1.5~2 m 厚的填土外, 15 m 深度以上均为黏质粉土, 具有一定的黏粒含量, 渗透系数较大但低于粉土; 其降水后强度高, 遇水容易引发管涌。在粉质黏土层与五层约 15 m 厚的淤泥质粉质黏土层之间, 为一层较薄的圆砾层, 约 1~3 m 厚。

孔隙潜水赋存于上部粉土层中, 土层渗透系数为 10^{-5} cm/s, 属较弱透水性。水位埋深为 1.10~2.40 m, 年水位变幅约为 1.00~1.50 m。

孔隙承压水主要赋存于⑧₁圆砾层中。⑧₁圆砾层分布于商业地块场地南半部, 层顶埋深 28.50~

31.60 m, 层顶高程 -24.52~-20.67 m, 层厚 1.60~8.50 m。渗透性较好, 水量较丰富, 水头高程约为 2.00~4.00 m (1985 国家高程基准), 具有承压水特性。

2 邻地铁侧围护方案

基坑紧邻地铁站房位置采用 1 000 mm 厚地下连续墙, 其余范围采用直径 1 200 mm 间距 1 400 mm 钻孔灌注桩作为支护桩; 连续套打三轴水泥搅拌桩作为止水帷幕; 水平受力构件为三道钢筋混凝土水平内支撑; 在基坑阳角部位、支撑与支撑间部位以及电梯坑临边部位增设三轴水泥搅拌桩被动区加固; 在第二、第三道支撑梁上增设了钢筋混凝土支撑板带, 以增强支撑整体刚度, 见图 2。

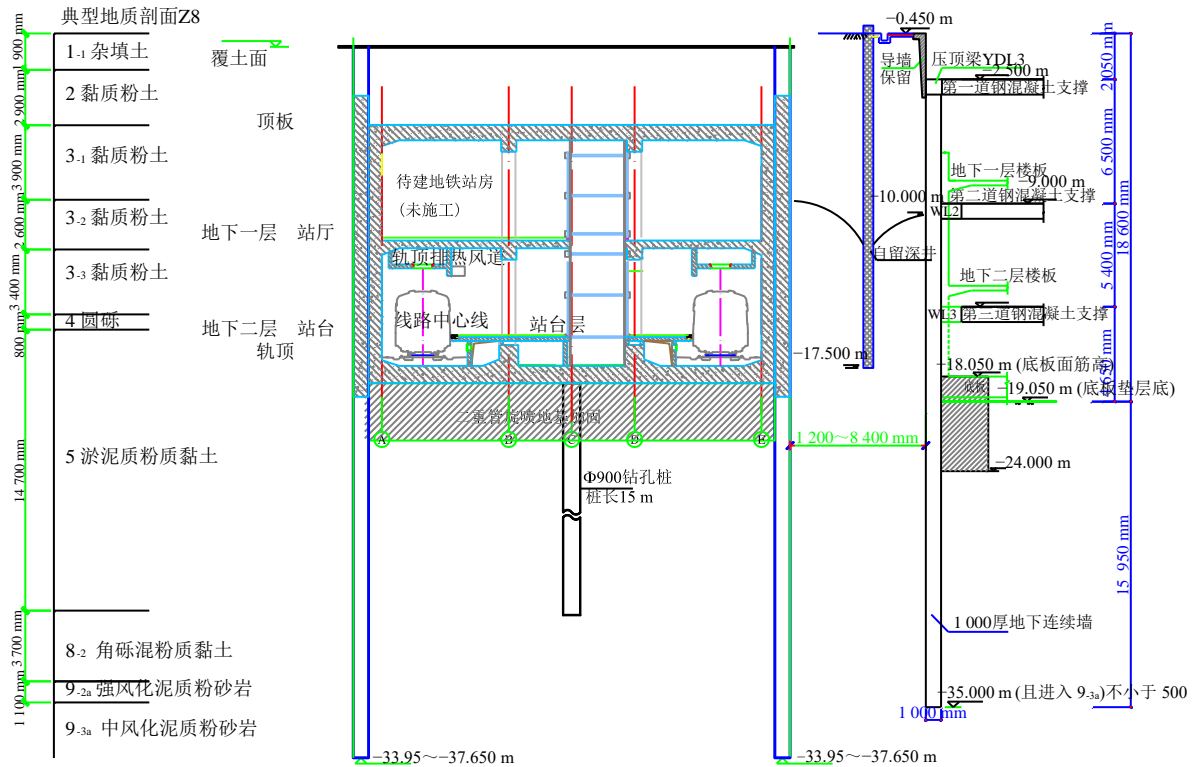


图2 临地铁围护墙剖面图
Fig. 2 Sectional of the enclosure wall adjacent subway

3 基坑施工及变形情况

3.1 基坑施工情况

截至2019年6月,基坑已开挖至第三道支撑~14.4 m 标高, 三道支撑基本施工完成。

3.2 基坑变形情况

本项目基坑暴露时间太长, 截止目前已超过3年, 前后停工2次, 分别为3个月和9个月, 导致2017年10月深层土体测斜变形已超过报警值, 截止2019年5月所有存活的测斜点监测数据已基本超过45 mm, 部分第一道支撑轴力值超过6000 kN, 处于报警状态。并且局部支护体系存在缺陷。

本项目监测周期为2016年12月6日至今。根据本项目施工进度情况, 分别选取7个时间节点的北侧典型深层土体水平位移监测孔(CX14~CX18)的测斜数据, 各测点最大水平位移64.25~77.90 mm, 具体如表1所示。

选取北侧典型水位监测孔(SW5~SW9)的数据, 基坑北侧坑外地下水位累计变化量1092~3497 mm, 具体如表2所示。基坑内已施工两道支撑轴力累计变化量见表3, 第一道撑部分测点已报警。

3.3 基坑后续施工计划

后续将进行第三道支撑以下土方的开挖及后续拆换撑的施工。

表1 北侧典型深层土体水平位移监测孔变形数据
Table 1 Deformation of horizontal displacement monitoring hole for typical deep soil on the north side

监测孔	最大水平位移/mm	发生最大位移处对应深度/m
CX14	69.13	8.0
CX15	66.82	8.0
CX16	76.05	10.0
CX17	77.90	10.0
CX18	70.48	9.0

注: 深层土体水平位移监测报警值为45 mm

表2 北侧典型地下水位监测孔变化数据
Table 2 Change data of typical groundwater level monitoring holes on the north side

监测孔	累计变化量/mm
SW4	1092
SW5	3497
SW6	1974
SW7	1736
SW8	2633

注: 地下水位监测报警值为±500 mm/d

表 3 基坑典型支撑轴力监测点变化数据

Table 3 Change data of typical support axial force monitoring points of foundation pits

监测点	累计变化量/kN	
	第一道支撑	第二道支撑
ZL6	6 313	11 985
ZL7	6 794	10 262
ZL8	6 563	8 117
ZL9	6 671	7 842
ZL10	5 312	890
ZL11	5 045	618
ZL12	5 980	313

注: 第一道支撑轴力监测报警值为 6 000 kN, 第二道支撑轴力监测报警值为 12 000 kN

4 基坑围护结构计算

4.1 计算说明

本项目较之常规的地铁安评项目有以下几个方面的问题需引起重视, 并在复核计算中有所考虑:

(1) 地基土强度问题

本项目基坑与地铁基坑间夹心土受到两侧基

坑施工反复扰动导致强度折减。

(2) 时空效应问题

本项目基坑暴露时间很长, 基坑施工中土体的应力松弛及土体蠕变引起的应力和变形不断变化, 使得施工拖延周期较长时基坑安全性会逐渐降低。

(3) 基坑变形问题

截止 2019 年 5 月所有存活的测斜点监测数据已基本超过 45 mm, 处于报警状态。

另外考虑到局部支护体系存在缺陷, 本次剖面验证复核以及后文中有限元分析计算中, 需对土层参数指标、围护结构刚度进行折减。

4.2 土层计算参数

土层计算参数见表 4。

4.3 变形内力计算结果

(1) 现场当前工况: 开挖到第三道支撑底, 施工第三道支撑工况变形, 见图 3。由于理正计算软件中无法考虑时空效应, 虽然对土层参数指标进行了折减, 但计算结果与实测数据之间仍有一定差距。

(2) 预测开挖到基坑底工况变形, 见图 4。

(3) 预测支撑全部拆除完成工况变形, 见图 5。

表 4 各层土物理力学性质参数

Table 4 Physical and mechanical properties of each soil layer

层号	天然重度/(kN/m ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	水平渗透系数/(cm/s)	垂直渗透系数/(cm/s)
①-1	(20.0)	(6.00)	(7.50)	3.0	3.0
②	18.7	(5.25)	(18.75)	4.0	4.0
③-1	18.5	(6.00)	(18.75)	1.2	1.2
③-2	18.5	(5.25)	(20.25)	3.0	3.0
③-3	17.7	(13.50)	(12.75)	6.5	6.5
④	(20.0)	(3.75)	(22.50)	3.0	3.0
⑤	17.1	(13.50)	(7.50)	25.0	25.0

注: () 内为折减后强度指标

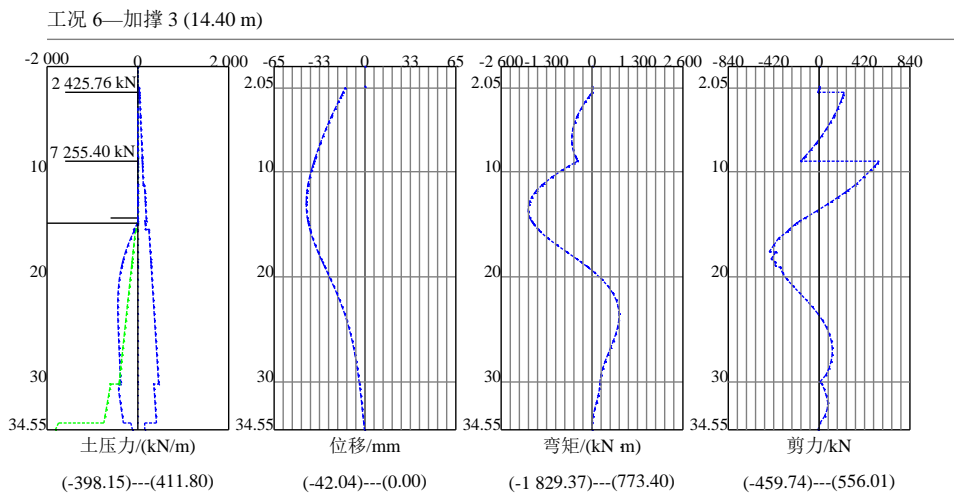


图 3 现阶段工况位移内力图

Fig. 3 Displacement and internal force diagram of current working condition

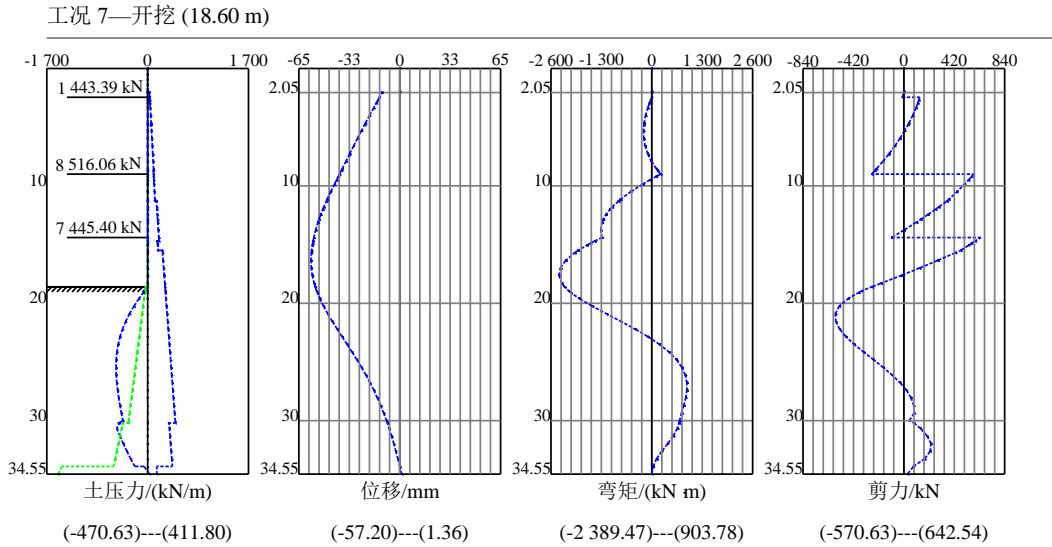


图 4 开挖到基坑底工况位移内力图

Fig. 4 Displacement and internal force diagram of excavation to the bottom of foundation pit

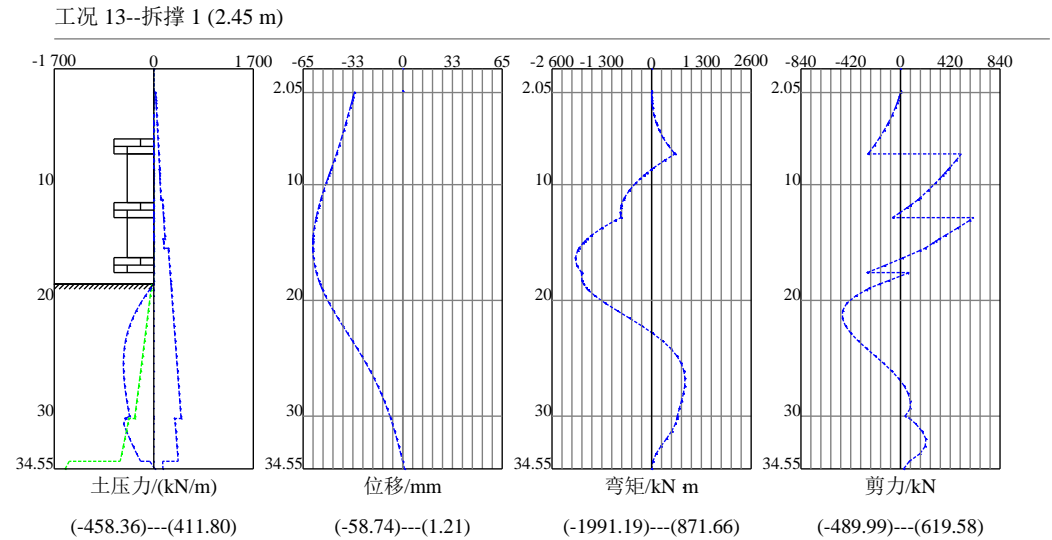


图 5 支撑全部拆除完成工况位移内力图

Fig. 5 Displacement and internal force diagram of complete support removal

当前及后续各工况计算结果如表 5 所示。

表 5 理正计算结果汇总表

Table 5 Summary of Lizheng calculation results

计算剖面	计算工况	围护结构最大位移/mm	
		总量	增量
1-C1剖面	开挖到第三道支撑底	43.30	—
	开挖到基坑底	58.91	+15.61
	拆除第三道支撑	60.97	+2.06
	拆除第二道支撑	60.10	-0.87
	拆除第一道支撑	60.35	+0.25
	合计	—	+17.05

根据上述计算结果可知，在当前施工工况（即

本基坑第三道支撑施工完成）之后，后续邻地铁侧围护结构的水平位移增量约 17 mm。

5 有限元数值模拟

采用大型商业有限元数值软件 PLAXIS 3D，建立三维有限元模型进行基坑各个阶段的施工工况对地铁车站变形的分析，分析基坑开挖时地铁车站的位移响应。土体材料本构模型采用土体硬化(HSs模型)，基坑支护结构、支撑、换撑、车站结构等采用弹性材料类型。基坑支护结构、支撑、车站结构等采用板单元模拟，换撑采用锚锭杆模拟。详见表 6~7。

表 6 土体 HSs 模型参数
Table 6 Parameters of soil HSs model

层号	E_{50}/MPa	$E_{\text{oad}}/\text{MPa}$	E_{ur}/MPa	G_0/MPa	$\gamma_{0.7}$
①-1	3.0	3.0	15.0	45.0	—
②	6.0	6.0	30.0	90.0	1.5×10^{-4}
③-1	6.0	6.0	30.0	90.0	1.5×10^{-4}
③-2	8.0	8.0	40.0	120.0	1.5×10^{-4}
③-3	5.0	5.0	25.0	75.0	1.5×10^{-4}
④	(12.0)	(12.0)	60.0	180.0	1.5×10^{-4}
⑤	2.5	2.5	12.5	37.5	1.5×10^{-4}
⑥	7.5	7.5	37.5	112.5	1.5×10^{-4}
⑧-2	(15.0)	(15.0)	75.0	225.0	1.5×10^{-4}
⑨-2a	250.0	250.0	—	—	—
⑨-3a	500.0	500.0	—	—	—

注: () 内为折减后强度指标

表 7 结构材料参数
Table 7 Structural material parameters

名称	材料类型	轴向刚度 $EA/(\text{kN}/\text{m}$ 或 kN)	抗弯刚度 $EI/(\text{kN} \cdot \text{m}^2/\text{m}$ 或 $\text{kN} \cdot \text{m}^2)$	泊松比
车站 800 mm 厚地连墙	弹性	34.500×10^6	2.880×10^6	0.20
车站顶板	弹性	37.950×10^6	3.830×10^6	0.20
车站中板	弹性	31.050×10^6	2.100×10^6	0.20
车站底板	弹性	41.400×10^6	4.970×10^6	0.20
车站框架柱	弹性	37.800×10^6	—	0.20
1 m 地连墙	弹性	22.500×10^6	1.880×10^6	0.20
1 000 mm×800 mm 钢筋混凝土支撑	弹性	18.000×10^6	—	—
1 300 mm×900 mm 钢筋混凝土支撑	弹性	26.300×10^6	—	—
地下室底板	弹性	30.000×10^6	2.500×10^6	—

根据基坑开挖所产生的影响范围, 合理选取模型尺寸以减少边界条件对计算结果的影响。确定分析模型尺寸为 550 m (X 方向) × 300 m (Y 方向) × 40 m (Z 方向), 见图 6。模型边界采用标准约束形式, 即在侧面施加法向约束, 在底面施加完全约束, 顶面自由。网格划分总计单元数 465 290 个, 节点数 588 512 个。

5.1 邻地铁侧围护结构变形预测

根据 Plaxis 3D 数值模拟分析结果, 在当前施工工况 (即本基坑第三道支撑施工完成) 之后, 后续邻地铁侧围护结构的水平位移增量约 15 mm, 见图 7、8。

5.2 地铁结构变形预测

根据 Plaxis 3D 数值模拟分析结果, 在当前施工工况之后, 后续车站主体结构的最大变形增量为: 水平位移 4.79 mm、竖向位移 0.71 mm; 车站附属

结构的最大变形增量为: 水平位移 2.91 mm, 竖向位移 3.15 mm; 车站与附属结构交接处差异沉降最大增量 3.16 mm, 详见表 8。

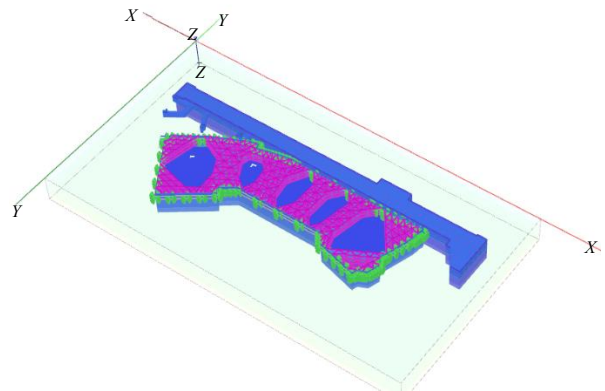


图 6 基坑与地铁车站相对位置关系图

Fig. 6 Relative position of foundation pit and tunnel

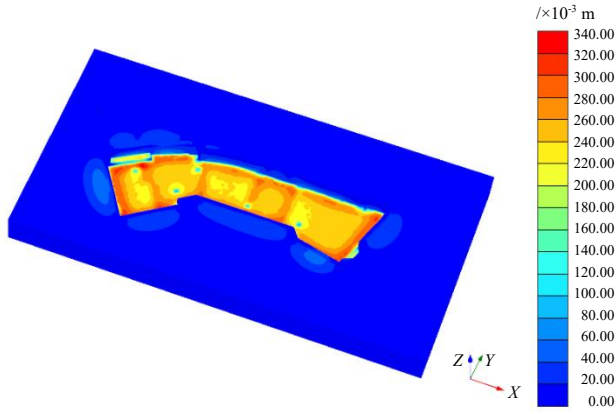


图7 土体总位移云图

Fig. 7 Total displacement of soil mass

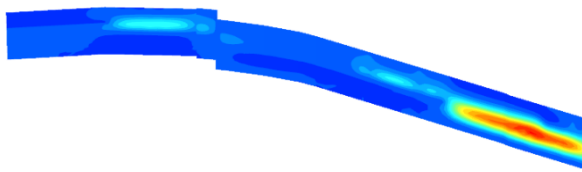


图8 围护结构水平增量位移云图

Fig. 8 Horizontal incremental displacement nephogram of retaining structure

表8 地铁结构变形预测值

Table 8 Predicted value of subway structure deformation

地铁结构	项目	变形预测值/mm
车站主体结构	水平位移增量	+4.79
	竖向位移增量	-0.71
车站附属结构	水平位移增量	+2.91
	竖向位移增量	+3.15
车站与附属结构交接处	差异沉降增量	3.16

注：水平位移中“+”代表往本项目基坑内方向；竖向位移中“+”代表向上隆起，“-”代表向下沉降

6 土体计算参数对计算结果的影响

6.1 土体计算参数取值

前文第4、第5节中基坑围护结构计算及有限元模拟时对土层参数指标进行了折减。本小节中就土体计算参数取值及其对计算结果的影响进行简要的对比分析。表9为主要计算土层HSs模型计算参数折减前后对比表。

6.2 土体计算参数对计算结果的影响

由表10可知，采用折减前后的土层参数指标

表9 主要计算土层HSs模型计算参数对比表

Table 9 Comparison of calculation parameters of HSs model for main calculation soil layers

层号	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	E_s /MPa	E_{50}/E_{oed} /MPa	E_{ur} /MPa
①-1	8.0(6.00)	10.0(7.50)	2.50(3.0)	2.50(3.0)	12.50(15.0)
②	9.8(5.25)	25.3(18.75)	7.15(6.0)	7.15(6.0)	35.75(30.0)
③-1	10.1(6.00)	25.8(18.75)	8.58(6.0)	8.58(6.0)	42.90(30.0)
③-2	10.0(5.25)	27.2(20.25)	9.43(8.0)	9.43(8.0)	47.15(40.0)
③-3	18.2(13.50)	17.7(12.75)	5.59(5.0)	5.59(5.0)	27.95(25.0)
④	5.0(3.75)	30.0(22.50)	16.00(12.0)	16.00(12.0)	80.00(60.0)
⑤	18.4(13.50)	10.1(7.50)	2.79(2.5)	2.79(2.5)	13.95(12.5)

注：表中数据为详勘报告提供值；() 内为折减后强度指标

表10 邻地铁侧围护结构及地铁结构变形预测值对比表

Table 10 Comparison table of deformation prediction value of adjacent subway side enclosure structure and subway structure

结构	项目	变形预测值/mm	
		折减前	折减后
邻地铁侧围护结构	水平位移增量	10.20	15.20
车站主体结构	水平位移增量	+2.24	+4.79
	竖向位移增量	-0.48	-0.71
车站附属结构	水平位移增量	+1.71	+2.91
	竖向位移增量	+2.08	+3.15
车站与附属结构交接处	差异沉降增量	1.93	3.16

注：地铁结构水平位移中“+”代表往本项目基坑内方向；竖向位移中“+”代表向上隆起，“-”代表向下沉降

计算得出的后续邻地铁侧围护结构水平位移增量差值约 4.80 mm; 车站主体结构变形增量差值约为水平位移 2.55 mm、竖向位移 0.23 mm; 车站附属结构变形增量差值约为水平位移 1.20 mm, 竖向位移 1.07 mm; 车站与附属结构交接处差异沉降变形增量差值约为 1.23 mm。

7 结 语

本文以杭州市某商业项目地下室基坑工程为背景, 通过 Plaxis 3D 有限元计算软件对紧邻地铁车站的基坑工程施工对既有车站的影响进行了模拟分析, 得出以下结论:

(1) 施工过程评估根据已有设计、评估、施工、监测等资料, 通过模拟分析来复核修正有关参数。然后根据调整后的施工方案, 从数值模拟以及风险角度来分析基坑工程施工对地铁设施的后续影响。

(2) 施工过程评估与施工前评估相比, 需对地基土强度折减、围护结构施工质量、时空效应、基坑既有变形等问题进行考虑, 并结合理论、经验等进行反演分析, 对土体强度、围护结构刚度等指标进行折减, 由此得出的结果与实际情况偏差更小。

(3) 基坑开挖时应考虑时空效应, 沿按限定长度的开挖段逐段开挖, 在每个开挖段中分层、分小段开挖, 随挖随撑, 按规定时限完成支撑、地下室底板浇筑, 减少基坑暴露时间。

(4) 通过有限元模拟分析, 可以为设计方案的制定和围护结构体系的优化提供重要的依据。模拟结果与理正深基坑设计计算软件计算结果接近。

参考文献

- [1] 高盟, 高广运, 冯世进, 等. 基坑开挖引起紧贴运营地铁车站的变形控制研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 818-823.
GAO Meng, GAO Guang-yun, FENG Shi-jin, et al. Control of deformation of operating subway station induced by adjacent deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 818-823.
- [2] 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(S1): 419-422.
LI Wei-qiang, SUN Hong-wei. Influence of deep excavations on existing subways[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 419-422.
- [3] 曾远, 李志高, 王毅斌. 基坑开挖对邻近地铁车站影响因素研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 642-645.
ZENG Yuan, LI Zhi-gao, WANG Yi-bin. Research on influencing factors of deep excavation adjacent to subway station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(4): 642-645.
- [4] 马乾瑛, 毛念华, 赵均海, 等. 基坑开挖对已建地铁站结构的安全性影响研究[J]. 铁道工程学报, 2014(4): 107-112.
MA Qian-ying, MAO Nian-hua, ZHAO Jun-hai, et al. Research on the existing subway station structure safety effected by foundation pit excavation[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014(4): 107-112.