

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2021.03.008

【工程应用】

地铁旁侧深大基坑的支护及变形控制技术

虞革新¹, 金琳²

(1. 杭州钱江绿星乐居建设管理有限公司, 浙江 杭州 311215; 2. 浙江省建工集团有限责任公司, 浙江 杭州 330106)

摘要: 基于某地铁边的深大基坑工程, 介绍了工程背景、基坑支护方案和针对地铁保护的变形控制措施等。项目实施情况表明, 在敏感建(构)筑物周边进行基坑开挖, 应充分重视基坑的“时空效应”, 并针对性地采取变形控制措施; 该项目所采取的措施合理且有效, 可为类似基坑工程设计和施工提供借鉴。

关键词: 地铁保护; 基坑支护; 变形控制

中图分类号: TU74

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)03-0221-06

Supporting technology and deformation control technology of deep and large foundation pit beside subway

YU Ge-xin¹, JIN Lin²

(1. Hangzhou Qianjiang Greentown Star Leju Construction & Management Co., Ltd., Hangzhou 311215, China;

2. Zhejiang Construction Engineering Group Co., Ltd., Hangzhou 330106, China)

Abstract: Based on a deep and large foundation pit project near a subway, the engineering background, foundation pit support scheme and deformation control measures for subway protection are introduced in this paper. Combined with the actual monitoring results, this study shows that the “space-time effect” of the foundation pit should be given much attention during foundation pit excavation process adjacent to sensitive structures. Reasonable and effective deformation control measures should be fully considered. Hence, this paper provides reference for the design and construction of similar foundation pit engineering projects.

Key words: subway protection; foundation pit; deformation control

0 引言

截至2020年底,我国40余座城市有已运营或在建的地铁设施,其中上海、北京等城市的地铁总里程更是位居世界前列。同时,城市中地铁沿线区域,往往也是城市建设项目分布密集的区域。因此,在已运营或在建的地铁设施周边进行工程建设时,如何采取措施对地铁设施进行保护,日渐成为一项重要课题。

基坑工程因涉及支护结构施工、土方开挖等地下工程,对地铁设施影响相对较大^[1,2],通常也是各地地铁设施保护管理的关注重点。魏纲等^[3]和朱正锋等^[4]通过实测分析上跨基坑对运营地铁隧道的影响,地铁隧道变形主要为竖向位移,对水平位移影响不大。况龙川^[5]也通过实测数据分析了旁侧基坑对地铁隧道的影响,主要表现为隧道的水平位

移,且对土方开挖、支撑拆除时的震动敏感。高广运等^[6]通过数值分析对不同施工方案下旁侧基坑对地铁隧道的影响进行对比分析。上述研究中所采取的变形控制措施主要为针对性的地基加固、分块开挖和注浆纠偏等,研究表明,这些措施均为有效措施,但控制效果受到地质条件、工程特点等实际情况的显著影响。

基坑工程因涉及支护结构施工、土方开挖等地下工程,对地铁设施影响相对较大,通常也是各地地铁设施保护管理的关注重点。本文通过对某地铁周边深大基坑项目的工程概况、围护设计方案及针对地铁保护的变形控制措施、项目实施过程中基坑监测和地铁监测的成果等进行介绍,希望能为相关课题的进一步研究和类似工程的设计施工提供有益的参考。

收稿日期: 2021-04-25

作者简介: 虞革新(1967—),男,汉族,浙江人,本科,工程师,主要从事工程建设管理。E-mail: 645011794@qq.com。

1 工程概况与地质条件

该项目总用地面积为 34 453 m², 总建筑面积为 279 449 m², 整体设有 3 层连通的地下室。

该工程±0.000 为绝对标高 6.550 m。场地周边自然地坪相对标高为-0.850 m (下文中标高除注明外, 均为相对标高)。地下室周边地梁均上翻, 具体结构标高情况见表 1。

综合考虑承台、地梁的平面尺寸和间距, 以及电梯井坑中坑的分布情况等, 设计计算中取基坑底标高分别为-16.900~-22.200 m, 故设计基坑开挖深度为 16.05~21.15 m, 基坑设计等级为一级。

根据该项目岩土工程勘察报告, 场地地貌属于平原区, 地势较为平坦。基坑开挖深度影响范围内各土层主要物理力学性质指标见表 2 所示。典型地质剖面如图 1 所示。

场地地下水主要为孔隙型潜水。地下水主要赋存于上部粉土、粉砂层中, 其它均为弱透水层, 地下水位受大气降水和人工排水控制明显, 随季节变化而升降。勘察期间实测稳定水位埋深为 1.10~2.10 m。年变化幅度 1.00 m 左右。该层地下水对混凝土及混凝土制品具微腐蚀性, 对钢筋混凝土结构中的钢筋有中等腐蚀性, 对钢结构具中等腐蚀性。

表 1 地下室结构标高概况

项目	结构标高
地下 1 层楼板面	-6.250、-8.350 m
地下 2 层楼板面	-12.250 m
底板面	-15.800、-16.300、-18.300 m
底板底	-16.900、-17.400、-19.600 m (含 100 mm 素混凝土垫层, 下同)
周边地梁底	同底板底标高
周边承台底	-17.400~-20.600 m
电梯井底	-19.900~-24.400 m

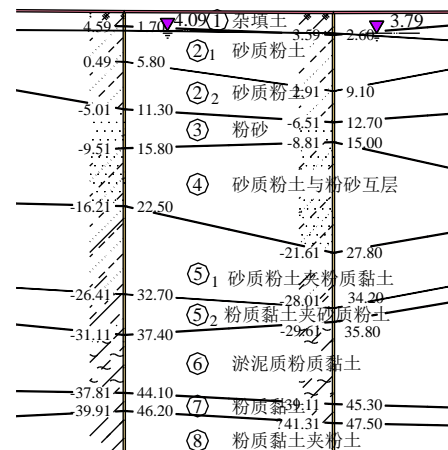


图 1 典型地质剖面图

Fig. 1 Typical geological profile

表 2 各土层物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of each soil layer

层号	土层名称	w/%	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	e	地基承载力特征值/	水平渗透系数/	固结快剪	
					kPa	(cm/s)	$\phi/(\circ)$	c/kPa
①	杂填土	—	—	—	—	—	—	—
② ₁	砂质粉土	28.8	19.07	0.788	140.0	3.0×10^{-4}	27.3	12.5
② ₂	砂质粉土	28.7	18.99	0.793	145.0	3.0×10^{-4}	27.2	12.6
③	粉砂	29.0	19.01	0.796	160.0	30.0×10^{-4}	—	—
④	砂质粉土与粉砂互层	29.5	18.95	0.810	155.0	—	27.4	12.8
⑤ ₁	砂质粉土夹粉质黏土	31.0	18.83	0.844	135.0	—	27.5	12.9
⑤ ₂	粉质黏土夹砂质粉土	31.6	18.65	0.872	100.0	—	26.3	12.7
⑥	淤泥质粉质黏土	41.0	17.43	1.173	80.0	—	7.7	8.4

2 周边环境条件

基坑东侧与用地红线最小距离为 2.20 m (与基坑上坎线距离, 下同), 用地红线以东为空地。

基坑南侧与用地红线最小距离为 8.70 m, 用地红线以南为已建市政道路, 道路下有已投入运营的地铁隧道及车站主体结构。地铁车站为钢筋混凝土

框架结构, 顶面标高为绝对标高 3.370 m, 板底标高为绝对标高-9.390~-11.370 m。车站施工期间曾采用钻孔咬合桩围护 (墙底绝对标高为-21.390~-25.370 m), 咬合桩与本基坑地下连续墙间的净距约为 28.12 m。地铁 A 出入口底板大部分绝对标高为-2.880 m, 与本基坑地下连续墙间的净距约为 15.10~28.50 m。1 号风亭底板绝对标高为

-4.030 m, 与本基坑地下连续墙间的净距约为 16.20 m。地铁隧道中心点绝对标高-6.200 m, 直径 6.2 m, 壁厚 350 mm, 轨顶绝对标高-8.060 m, 隧道与本基坑地下连续墙间的净距约为 15.53 m。市政道路下还埋有通信管、污水管、燃气管、通讯管、雨水管等市政管线, 距基坑的距离约在 10.9~15.20 m 之间。

基坑西侧与用地红线的距离约为 4.10 m, 用地红线以西为已建市政道路。道路下有通信管、燃气管、给水管、雨水管、污水管和电力管等市政管线, 到基坑边的距离约在 5.20~19.20 m 之间。

基坑北侧距用地红线 4.00~8.10 m, 用地红线以北为空地。

项目周边的环境条件如图 2 所示。

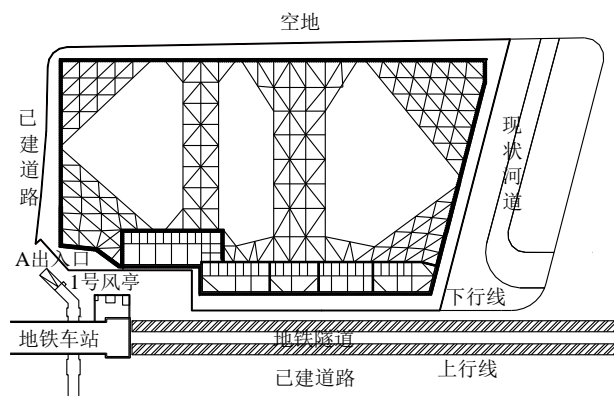


图 2 基坑周边环境示意图

Fig. 2 Schematic diagram of surrounding environment of foundation pit

3 工程特点

综合基坑开挖深度、地质条件、水文条件和周围环境条件等, 该基坑工程具有如下特点:

(1) 基坑开挖深度大: 大面积开挖深度达 16.05~21.15 m。

(2) 基坑开挖面积大: 基坑落地面积约近 28 000 m², 东西向最大长度约为 240 m, 南北向宽度约 130 m。

(3) 场地地基土质情况较好: 基坑开挖影响深度范围内主要为填土、粉土及粉砂。

(4) 地下水位埋深浅, 基坑浅部土层渗透系数大, 因此地下水位控制是该基坑工程实施过程中的关键之一。

(5) 周围环境条件比较复杂: 基坑周边有地铁车站、隧道、市政道路及地下管线等需保护, 对基坑的稳定和变形要求较高, 尤其是基坑南侧的地

铁隧道对变形控制要求非常严格, 地铁隧道变形控制值为竖向位移 10 mm, 水平位移 5 mm; 地铁车站及其附属设施变形控制值竖向位移和水平位移均为 15 mm。

4 围护设计及变形控制措施

该基坑开挖深度和开挖面积大, 且邻近地铁隧道, 周边环境条件较为复杂, 本可以考虑采用“逆作法”进行施工。采用“逆作法”利用楼板作为支撑体系, 可节约临时支撑费用。但采用“逆作法”也存在以下不足: (1) 需在地下连续墙中植入预埋件, 预埋件定位困难, 致使施工难度增大; (2) 由于“逆作法”需先施工绝大部分楼板, 仅留下少量空当作为出土口, 导致土方开挖困难, 施工作业环境恶劣, 施工工期长, 无法满足业主对工期的要求;

(3) 基坑全部采用地下连续墙支护, 围护成本较高。

根据项目实际情况, 该基坑未采用“逆作法”施工。根据当地城市轨道交通保护相关管理规定及类似项目的成功经验, 该基坑采用“分仓挖土”的围护措施, 充分利用基坑的“时空效应”, 先开挖远离地铁隧道侧的大地下室, 待大地下室完成地下室结构施工后, 再对邻近地铁隧道侧的地下室部分进行分仓开挖施工, 由于分仓施工后基坑体量变小, 有利于控制围护结构的位移, 以实现保护地铁隧道的目的。

由于该基坑开挖深度大且邻近地铁, 因此不适宜采用拉锚式等围护结构型式, 而只能考虑内撑式围护结构。内撑式围护结构具有受力合理、变形易控制、可靠性高、对周围环境影响小等优点, 在变形控制要求较高的基坑工程中被普遍采用。

在挡土结构的选择上, 基坑南侧因邻近地铁车站及隧道, 周围环境条件比较恶劣, 对环境保护要求较高, 采用地下连续墙围护结构。利用地下连续墙作为围护结构时可以考虑采用“二墙合一”的施工工艺, 即地下连续墙除了作为围护结构外兼作为地下室外墙, 可节约地下室外墙的施工费用。但“二墙合一”施工工艺也相应存在总体费用高、施工难度大等不足, 在该项目中没有必要采用。该项目除南侧外, 其他区域环境条件相对较好, 考虑整体经济性, 采用钻孔灌注桩排桩墙围护结构即可。在两种围护结构型式的交界处应采用高压旋喷桩进行封闭, 以确保止水帷幕的连续性。

基坑围护平面布置及分仓情况如图 3 所示, 整

个基坑分成一、二期分期实施。其中远离地铁隧道的一期(A区)大基坑先行实施,在二期基坑开挖的过程中,第二道支撑以下的土方要求按A1→A2→A3的顺序进行分段开挖,在先行开挖段的地下室底板浇筑完毕后再进行邻近区段的土方开挖。在二期地下室顶板施工完毕后,再进行二期(D区)基坑的开挖,二期基坑共分为5个区块,分2个批次进行开挖施工,先施工编号为D1的区块,后施工编号为D2的区块。

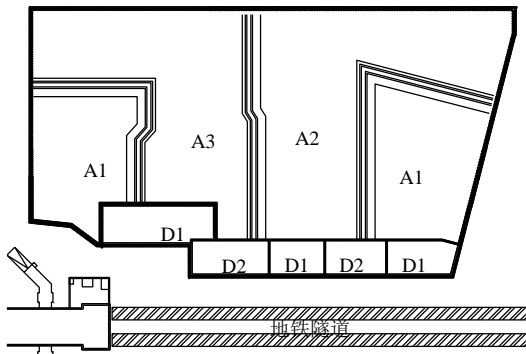


图3 围护平面布置示意图

Fig. 3 Layout plan of enclosure structure

在竖向支撑层数的选择上,根据基坑开挖深度,一期基坑可考虑采用二层或三层支撑的围护方案。由于该项目南侧有地铁轨道及车站需保护,因此考虑采用三层钢筋混凝土支撑的围护方案,以更好地控制基坑围护结构变形,提高围护体系可靠性。二期基坑距离地铁更近,则增加至四层支撑,其中第一层支撑采用钢筋混凝土支撑,其余三层采用带有应力伺服系统的钢管支撑。围护结构典型剖面做法如图4所示,采用800 mm厚地下连续墙支护。根据设计规范方法计算结果,该侧围护墙最大

水平位移13.4 mm,发生于坑底附近。根据三维有限元分析结果,隧道上行线沉降1.23 mm,水平位移4.86 mm,隧道下行线沉降1.07 mm,水平位移3.10 mm,车站及附属设施沉降1.08 mm,水平位移2.98 mm。

针对地铁设施的保护,除上述分期、分区块施工、加密支撑竖向间距、采用钢支撑轴力补偿系统等措施外,该基坑设计方案中还采取了如下措施:

(1) 加大邻地铁侧围护墙插入深度,墙底均穿透⑥淤泥质粉质黏土层,进入物理力学性质较好的土层。

(2) 取消地铁设施保护区范围内的基坑外降水井,防止坑外降水引起周边地下水渗流,造成地铁设施变形。

(3) 在该场地土质条件下,地铁盾构隧道对管涌和渗流异常敏感,不允许止水帷幕有缺陷。为保证该侧止水帷幕的质量,确保其连续性,设置双重止水帷幕,除地下连续墙外,其外侧增设三轴水泥搅拌桩兼作槽壁加固和止水帷幕。

(4) 因一期基坑平面范围大,施工时间长,空间和时效效应差。故二期基坑四周均采用封闭的地下连续墙作为围护结构,并在坑内设置被动区加固措施。如此,一期基坑施工时,二期围护结构作为大刚度隔离体,可有效减小一期大基坑施工时围护结构的侧向位移。

(5) 要求严格控制基坑南侧的施工荷载,严禁挖土、运输机械等动荷载在南侧行驶。限制基坑南侧10 m范围内施工静荷载不得超过10 kN/m²,10 m范围以外施工静荷载不得超过5 kN/m²。

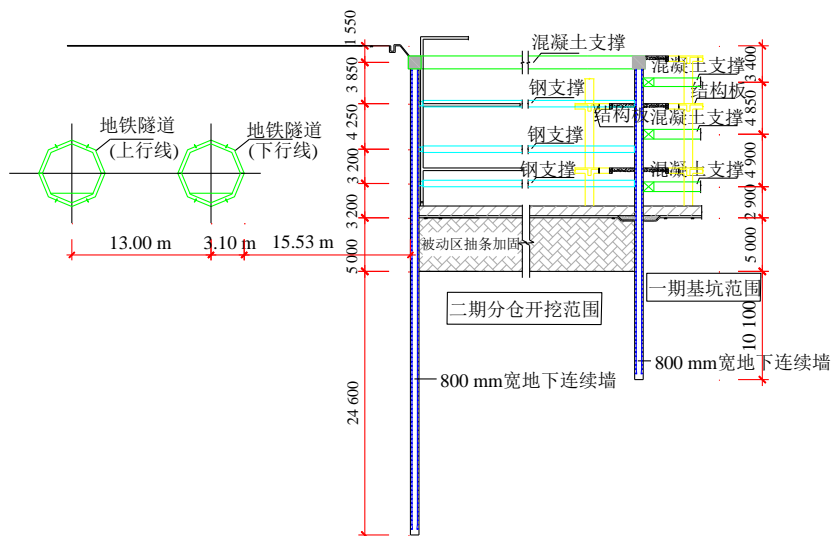


图4 围护结构典型剖面图

Fig. 4 Typical section of enclosure structure

5 基坑及地铁设施监测

基坑开挖过程监测是保证基坑安全的一个重要措施,通过监测可以及时了解围护结构体系的实际受力状况,也可以对设计参数进行反分析,必要时可调整施工参数,指导后续施工,如呈现异常情况则可及时采取措施。

该项目基坑监测内容和报警值如下:

(1) 深层土体水平位移监测:累计位移报警值邻地铁侧为 18 mm,其余三侧分别为 40 mm 和 50 mm;或位移发展速率连续 3 d 超过 3 mm/d。

(2) 墙体水平位移监测:累计位移 20 mm;或位移发展速率连续 3 d 超过 3 mm/d。

(3) 钢筋混凝土支撑轴力监测:第一道支撑报警值为 6 000 kN,其余各道支撑报警值为 9 000 kN。

(4) 基坑周边地下水位观测:报警值为地下水位稳定后变化幅度超过 500 mm/d。

(5) 基坑周边地表沉降观测:累计沉降 20 mm,或变化速率连续 3 d 超过 3 mm/d。

该工程已完成地下室施工,基坑已回填。根据基坑监测成果,邻地铁侧各监测孔的深层土体水平位移最大累计值为 7.24~14.99 mm,最大位移主要分布在 7~17 m 深度范围内;地表沉降最大值为 17.25 mm;其余各项监测数据的变化速率及累计值也均未超过监测报警值。在整个基坑工程施工过程中,基坑围护结构本体及周边环境变形较为稳定,未发现危及基坑安全的情况。

根据地铁监测成果,在该基坑一期土方开挖至底板施工期间,隧道呈现明显的下沉、向基坑侧偏移且有收敛增大的趋势,车站也呈现明显的下沉、向基坑侧偏移的趋势;二期基坑土方开挖期间,隧道仍有一定量的下沉、收敛增大的趋势;二期底板完成至顶板施工期间,地铁设施位移变化量较小。

地铁主要监测项目最大变化量如表 3 所示,竖向位移负值为沉降,水平位移正值为向基坑偏移。

对比地铁变形控制标准、设计计算结果和实际监测成果表明:整个基坑施工过程中,地铁隧道保护区范围内除隧道下行线变形略大于控制值外,其余各测点位移均满足变形控制值,日变形量均未出现明显的突变现象。围护结构变形监测成果与计算结果基本吻合。而地铁设施变形均略大于计算结果,根据现场实际施工情况,在土方开挖过程中发生过大量地下有害气体释放,对周边环境变形发展有明显影响,这是在设计分析过程中未曾考虑到的

情况。工后监测数据反映地铁设施变形已趋于稳定。

表 3 地铁监测项目最大变化量

Table 3 The maximum variation of metro monitoring items

区域	项目	最大变化量/mm
隧道上行线 (离基坑较远)	竖向位移	-8.2
	水平位移	2.8
隧道下行线 (离基坑较近)	竖向位移	-11.1
	水平位移	6.9
车站主体	竖向位移	-5.2
	水平位移	4.7
A 出入口	竖向位移	-3.9
1 号风亭	竖向位移	-2.7

6 结 论

该工程的基坑监测及地铁监测结果表明,基坑工程中空间和时效效应对围护结构变形和周边环境变形影响显著。将基坑邻近地铁的区域进行分仓,严格控制单仓面积,并采取跳仓施工等措施,可有效减小围护结构变形及其对周边环境的影响,有利于保障邻近地铁设施的安全和正常运行。

而该基坑一期区域因平面范围大,空间和时效效应较差,虽然距离地铁设施相对较远,施工过程中仍对地铁设施的变形发展有明显影响。

虽然围护结构的变形主要表现为水平变形,但该基坑施工引起的地铁隧道竖向位移要远大于水平位移。考虑到邻地铁一侧并未进行基坑外降水,较远处的大范围基坑外降水是否仍对地铁设施变形有不可忽略的影响,值得进一步调查研究。

参考资料

- [1] 龚晓南. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [2] 刘国彬, 等. 基坑工程手册[M]. (第二版). 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [3] 魏纲, 李钢, 苏勤卫. 基坑工程对运营地铁隧道影响的实测分析[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(1): 179-185.
WEI Gang, LI Gang, SU Qin-wei. Analysis of the influence of foundation pit construction on an operating metro tunnel based on field measurement[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(1): 179-185.
- [4] 朱正锋, 陶学梅, 谢弘帅. 基坑施工对运营地铁隧道变形影响及控制研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(1):

- 128-131.
- ZHU Zheng-feng, TAO Xue-mei, XIE Hong-shuai. The influence and control of dip excavation on deformation of operating metro tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 128-131.
- [5] 况龙川. 深基坑施工对地铁隧道的影响[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 284-288.
- KUANG Long-chuan. Influence of construction of deep foundation pit on tunnels of metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 284-288.
- [6] 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 Guang-yun, GAO Meng, YANG Cheng-bin, 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.

【简 讯】

第四届交通运输与土木建筑国际学术论坛 (ISTTCA 2021)

由中交天津港湾工程研究院有限公司与天津大学联合主办, AEIC 学术交流中心承办的“第四届交通运输与土木建筑国际学术论坛 (ISTTCA 2021)”, 将于 2021 年 11 月 12—14 日在中国苏州隆重举行。诚邀各有关单位学者和技术人员踊跃参会, 交流技术, 推动创新!

重要时间:

大会时间: 2021 年 11 月 12—14 日

一轮报名/截稿: 2021 年 9 月 27 日

接受/拒稿通知: 投稿后 1 周内

(收录检索: SCI、EI Compendex、Scopus、Inspec)

组织单位:

主办单位: 中交天津港湾工程研究院有限公司天津大学

承办单位: AEIC 学术交流中心

征文主题:

(1) 交通工程 (公路桥梁、水运、车辆运行、交通控制、交通运输)

(2) 运输系统 (供应链管理、物流管理、智能交通系统、轨道交通)

(3) 土木工程 (岩土工程、工程力学、结构工程、地震工程、防灾减灾)

(4) 建筑、建筑材料和工程管理 (景观规划、建筑设计)

联系方式:

大会秘书处: Irene 凌老师

咨询邮箱: ISTTCA@163.com

手机/微信: 13902297125

QQ 咨询: 3488185507

AEIC 水利土建工程学术②群: 912234794 (QQ 群)