

预制混凝土支撑对地铁竖井施工稳定性的影响

黄安平¹ 李华龙¹ 王招兵¹ 任建喜² 谢 易² 邹翔宇²

(1. 中建三局集团有限公司, 430070, 武汉; 2. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 710054, 西安//第一作者, 高级工程师)

摘要 目的:为了验证预制混凝土支撑的安全稳定性与优越性,需分析预制混凝土支撑对竖井施工稳定性的影响。方法:以现浇支撑支护方式为对比,针对采用预制混凝土支撑的地铁竖井,对其施工过程开展平面分析和三维数值模拟,通过分析支撑轴力,计算围护桩的沉降和水平位移变化情况,来分析预制混凝土支撑对地铁竖井施工稳定性的影响,并通过现场实测数据进行验证。结果及结论:该竖井的空间效应明显,三维模拟值与实测值更吻合。与现浇式支撑相比,采用预制混凝土支撑时的支撑轴力、围护桩水平位移更小,说明预制混凝土支撑能更好地保证竖井施工的稳定。两种支护方式下围护桩的沉降基本一致,桩顶累计沉降值自竖井开挖后呈“台阶式”下降,平面模拟值于后期加速下降。现浇支撑一开始即受到压力的作用,预制混凝土支撑因预应力抵消作用在施工开始阶段受拉。在施工过程中,现浇式支撑的轴力大于预制混凝土支撑的轴力。根据平面模型计算结果,围护桩桩体上下端水平位移偏大。根据三维模拟结果,竖井的两侧壁能够抑制北侧桩所受的土压力及其水平位移,一至七道支撑的约束作用降低了各道支撑标高处的桩身变形。

关键词 地铁竖井; 预制混凝土支撑; 桩变形; 数值模拟

中图分类号 TU94⁺²; U231.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.08.018

Influence of Precast Concrete Support on Metro Shaft Construction Stability

HUANG Anping, LI Hualong, WANG Zhaobing, REN Jianxi, XIE Yi, ZOU Xiangyu

Abstract Objective: To verify the safety, stability, and advantages of precast concrete support, it is necessary to analyze its impact on shaft construction stability in metro project. Method: Compared with cast-in-place support mode, the metro shaft adopting precast concrete support is targeted for analysis. The construction process is analyzed in 2D and is numerical simulated in 3D. By analyzing the support axial forces and calculating the retaining pile settlement and horizontal displacement, the impact of precast concrete support on metro shaft construction stability is analyzed and verified through field

measured data. Result & Conclusion: The spatial effect of the shaft is evident, and the 3D simulation results are more consistent with field-measured ones. Compared to cast-in-place support, the precast concrete support exhibits smaller axial forces and less horizontal displacement of the retaining piles, indicating that precast concrete support can provide better stability during shaft construction. The settlement of the retaining piles is consistent for both support modes, showing a 'step-like' decrease in cumulative settlement at pile top after excavation, with accelerated descent of the 2D simulation results in later stages. The cast-in-place support experiences pressure from the initial stage, while the precast concrete support is subjected to tension due to the counter-prestressing action during the early stages of construction. Throughout the construction process, the axial forces in the cast-in-place support are greater than those in the precast concrete support. According to the 2D model simulation results, the horizontal displacement at the upper and lower ends of the retaining piles is relatively large. The 3D simulation results show that shaft walls on both sides can restrain the soil pressure and horizontal displacement on the north side piles, and the constraint action of supports 1 to 7 reduces pile deformation at different elevations.

Key words metro shaft; precast concrete support; pile deformation; numerical simulation

First-author's address China Construction Third Engineering Bureau Co., Ltd., 430070, Wuhan, China

地铁建设离不开车站主体基坑^[1]及施工竖井^[2]等工程。学者们已对现有支撑体系下的深基坑施工稳定性进行了研究。文献[3]考虑了软土蠕变和混凝土强度随时间变化,分析了基坑围护结构的变形规律。文献[4]研究了钢支撑的刚度和间距对深基坑桩体侧移变形的影响。西安地铁8号线新植物园站2[#]出入口垂直电梯井兼作施工竖井(以下简称“2[#]竖井”),其施工采用了预制混凝土支撑。这是该支撑在我国地铁建设中的首次应用^[5]。为

了验证预制混凝土支撑的安全稳定性与优越性,本文基于 FLAC3D 软件的计算结果与现场监测数据,分析空间效应下竖井支撑轴力和围护桩的侧向及竖向位移,以现浇式支撑为对比,研究预制混凝土支撑对竖井施工稳定性的影响。

1 项目概况

1.1 竖井结构

2#竖井位于西安市公园南路与三环快速路交叉口的西北角,紧贴高边坡,东西宽 9.20 m,南北长 17.80 m,开挖深度为 38.56 m。边坡采用直径为 1.20 m、长度为 27.30 m、横向及纵向间距分别为 3.60 m 及 1.50 m 的双排桩,截面为 0.30 m×0.30 m 的预制混凝土格构梁,以及长度为 2.00 m、横向及纵向间距分别为 3.00 m 及 3.00 m 的锚杆。竖井主体支护采用 ϕ 1.80 m@2.35 m 的围护桩联合钢筋混凝土支撑的方案。其中第一道为现浇的混凝土支撑,第二至第七道为预制混凝土支撑。预制混凝土支撑如图 1 所示。

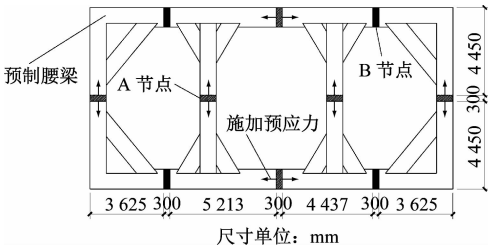


图 1 预制混凝土支撑

Fig. 1 Precast concrete support

1.2 竖井开挖工序

2#竖井的施工进度可划分为 8 个阶段,见表 1。各道预制混凝土支撑的施工工艺为:①放样八块腰梁的控制点;②开挖土方至腰梁底标高处,将各块腰梁吊装至中部,再由挖掘机配合手拉葫芦运到指定位置,凿除相应围护桩的混凝土保护层,并将预埋套筒与腰梁的钢筋连接;③如图 1 所示,支撑湿接缝的 B 节点较 A 节点先拼装焊接且无需施加预应力,当 B 节点达到设计强度后,每道预制支撑的所有 A 节点同时施加预应力,焊接工字钢,取出千斤顶后焊接钢筋,支模并灌注微膨胀混凝土,细节见文献[5];④每根桩与腰梁上部采用花篮螺丝连接,待土层开挖后再安装下支架。

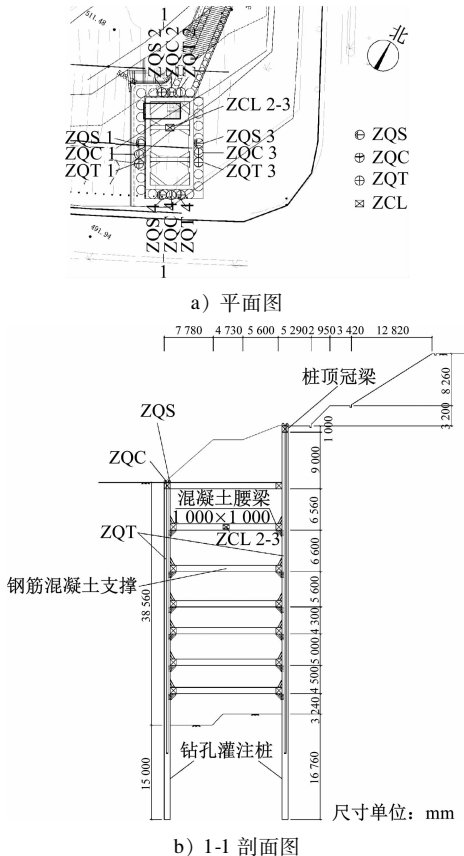
1.3 监测方案

2#竖井的测点布置图如图 2 所示。

表 1 2#竖井施工进度表

Tab. 1 Schedule of 2# shaft construction progress

施工阶段	开挖深度/m	内容	累计天数/d
阶段一	1.00	浇筑第一道支撑	17
阶段二	7.56	拼装第二道支撑	50
阶段三	14.16	拼装第三道支撑	67
阶段四	19.76	拼装第四道支撑	95
阶段五	24.06	拼装第五道支撑	129
阶段六	29.06	拼装第六道支撑	174
阶段七	33.56	拼装第七道支撑	215
阶段八	38.56	竖井封底	217



注:ZQS—桩顶水平位移监测点;ZQC—桩顶竖向位移监测点;ZQT—桩体测斜监测点;ZCL—支撑轴力监测点。

图 2 2#竖井的测点布置示意图

Fig. 2 Layout diagram of measuring points in 2# shaft

2 竖井施工的数值模拟方法

2.1 建立计算模型

建立三维模型对竖井施工过程进行计算。为降低边界效应对计算结果的影响,三维模型的长、宽、高分别取 129.00 m、46.00 m、80.46 m,如图 3 所示。作为对比,还建立平面模型进行计算。平面

模型的长、宽、高分别取 129.00 m、1.00 m、80.46 m,其余参数与三维模型相同。根据抗弯刚度相等的原则,将竖井围护桩和边坡双排桩分别折算成一定厚度的地下连续墙^[6]。

$$\frac{(D+t)h^3}{12}=\frac{\pi D^4}{64}$$

(1)

式中:

- D ——桩的直径,单位 mm;
- t ——桩的净间距,单位 mm;
- h ——折算成地下连续墙的厚度,单位 mm。

对于竖井围护桩, $D=1\,800\text{ mm}$, $t=550\text{ mm}$,由式(1)计算并取整可得, $h=943\text{ mm}$;对于边坡双排桩, $D=1\,200\text{ mm}$, $t=300\text{ mm}$,由式(1)计算并取整可得, $h=934\text{ mm}$ 。

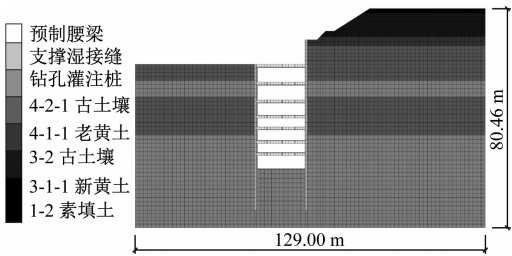


图 3 三维模型图

Fig. 3 Diagram of three-dimensional model

2.2 模型参数和开挖步骤

本次模拟选用摩尔-库仑理论作为土体的破坏准则,支护结构均设置为弹性本构模型。锚杆与格构梁由软件内置的结构单元生成,其余构件均采用实体单元构建。假设地表和土层为水平分层,相应的土体物理力学参数如表 2 所示。支护结构的模拟计算参数见表 3。

表 2 土体物理力学参数

Tab.2 Physical and mechanical parameters of soil

土层名称	层厚/ m	天然密度/ (kg/m ³)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	泊松比
1-2 素填土	1.60	1 590	15	15.0	0.35
3-1-1 新黄土	8.70	1 590	20	22.5	0.29
3-2 古土壤	3.36	1 740	26	23.0	0.28
4-1-1 老黄土	12.80	1 750	24	21.0	0.28
4-2-1 古土壤	6.00	1 810	28	22.5	0.26
4-1-1 老黄土	14.00	1 750	24	21.0	0.28
4-2-1 古土壤	34.00	1 810	28	22.5	0.26

在模拟计算中:当全部支撑为现浇式支撑时,

弹性模量从 6.76 GPa 逐渐增加至 32.50 GPa;预制混凝土支撑与预制腰梁的弹性模量一直保持为 32.5 GPa;湿接缝处混凝土的弹性模量则从 6.9 GPa 逐渐增加至 34.5 GPa。如图 1 所示,预制混凝土支撑还需用千斤顶施加预应力 F_0 。各道支撑的 F_0 取值见表 4。

表 3 支护结构的模拟计算参数

Tab.3 Simulation calculation parameters of supporting structure

构件名称	密度/ (kg/m ³)	泊松比	弹性模量/ GPa
锚杆	2 500	0.2	200.00
格构梁	2 500	0.2	32.50
钻孔灌注桩、双排桩	2 500	0.2	32.50
现浇混凝土(浇筑 1 d)	2 500	0.2	6.76
现浇混凝土(浇筑 3 d)	2 500	0.2	10.72
现浇混凝土(浇筑 5 d)	2 500	0.2	15.70
现浇混凝土(浇筑 7 d)	2 500	0.2	18.98
现浇混凝土(浇筑 14 d)	2 500	0.2	25.74
现浇混凝土(浇筑 28 d)	2 500	0.2	32.50
湿接缝(浇筑 1 d)	2 500	0.2	6.90
湿接缝(浇筑 2 d)	2 500	0.2	13.80
湿接缝(浇筑 3 d)	2 500	0.2	20.70
湿接缝(浇筑 4 d)	2 500	0.2	27.60
湿接缝(浇筑 5 d)	2 500	0.2	34.50

表 4 各道支撑的 F_0 取值

Tab.4 F_0 value of each support

支撑	F_0 /MN	支撑	F_0 /MN
第二道支撑	6.58	第五道支撑	9.89
第三道支撑	8.84	第六道支撑	12.90
第四道支撑	9.59	第七道支撑	19.90

根据现场实际施工步骤,将 2[#]竖井的模拟建造过程划分为 4 个模拟工序,如图 4 所示。

3 数值模拟结果与现场监测结果

3.1 支撑轴力

对比分析第二道支撑测点 ZCL2-3 轴力(轴力以拉为正,以压为负)的模拟值与实测值,结果如图 5 所示。

结合图 5 分析可知:现浇支撑一开始即受到压力的作用;预制混凝土支撑受预应力作用,在该阶段受拉。经核实,在混凝土浇筑 37~58 d 时,现浇

法支撑施工时所受轴力与装配法支撑轴力的差值为 $0.75 F_0$; 在混凝土浇筑 79 d 后, 两者的差值基本稳定为 $0.90 F_0$ 。平面模型计算结果偏大, 三维模型的模拟值与实测值更接近。

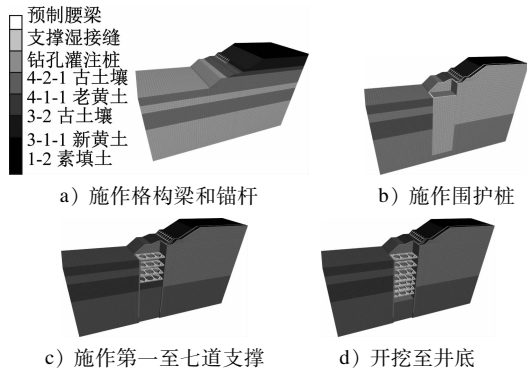


图 4 竖井模拟工序

Fig. 4 Simulation of shaft construction procedure

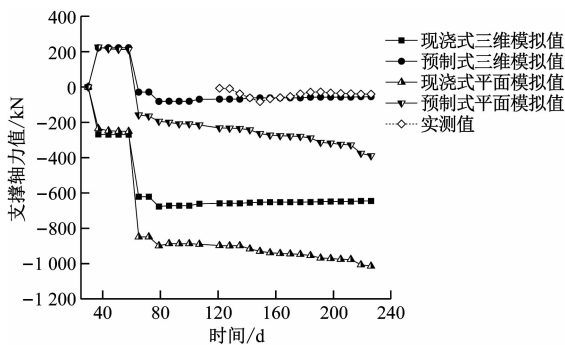


图 5 测点 ZCL2-3 的支撑轴力

Fig. 5 Support axial force at measuring point ZCL2-3

3.2 围护桩桩体的水平位移

选取测点组 ZQT2, 分析开挖结束时其水平位移与深度之间的关系。桩体不同深度处测点组 ZQT2 的水平位移(以向外为正, 向内为负)如图 6 所示。

由图 6 可知: 该竖井的空间效应明显; 平面计算得出的桩体上下端水平位移偏大; 在三维模型的模拟计算中, 竖井两侧壁能有效减少北侧桩所受的土压力, 并抑制其水平位移; 三维模拟值与实测值的变化规律较吻合, 第一至七道支撑的约束作用降低了深度为 1.00、7.56、14.16、19.76、24.06、29.06、33.56 m 处的桩身变形。

3.3 围护桩的桩顶水平位移

测点组 ZQS2 的桩顶水平位移如图 7 所示。由图 7 可知: 预制混凝土支撑的桩顶水平位移均小于现浇支撑的桩顶水平位移; 当第一道支撑布置时, 三维模型的桩顶水平位移模拟值迅速增大, 之后平缓地朝着零偏移发展; 当第四道支撑安装并达到设

计强度后, 桩顶水平位移实测值才有所稳定; 平面模型计算得到的模拟值反而加速下降。

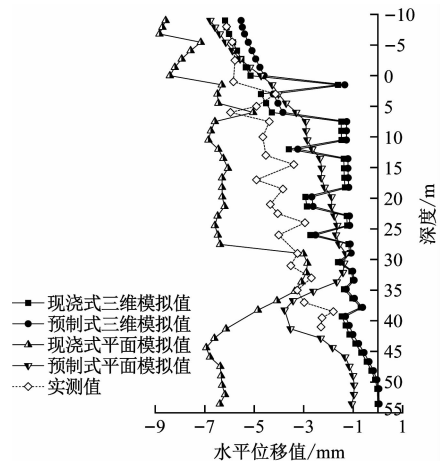


图 6 桩体不同深度处测点组 ZQT2 的水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of measuring point group ZQT2 at different pile depths

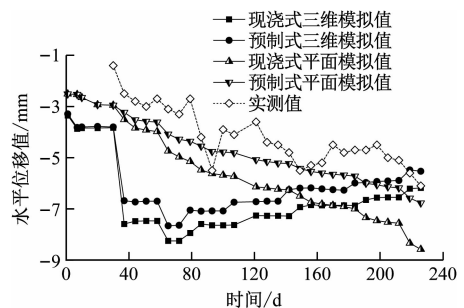


图 7 测点组 ZQS2 的桩顶水平位移

Fig. 7 Pile top horizontal displacement of measuring point group ZQS2

3.4 桩顶沉降

测点组 ZQS2 的桩顶沉降如图 8 所示。由图 8 可看出: 桩顶累计沉降值自竖井开挖后呈台阶式下降; 三维模型的模拟值与实测值基本一致; 而平面模型的模拟值于施工 130 d 后加速下降, 与实测值相差较大。

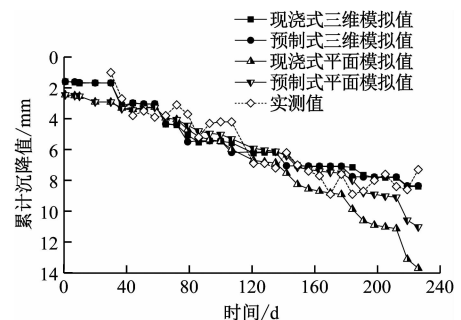


图 8 测点组 ZQS2 的桩顶沉降

Fig. 8 Pile top settlement of measuring point group ZQS2

4 结论

1) 该竖井的空间效应明显,三维模拟较平面计算更符合实测的围护桩变形规律。

2) 混凝土支撑可减小其所处位置桩体的内倾,预压力可降低最终的支撑轴力值且有助于抑制桩的水平位移,但对竖井围护桩沉降的影响较小。

3) 采用现浇法时,完整地施作每道钢筋混凝土支撑共需 35 d。而实际中,2[#]竖井各道支撑完整安装所需的时间分别为 17、14、8、13、11、10、10 d。该竖井紧邻高边坡且开挖深度大,预制混凝土支撑由于提前施加预应力可以充分激发围护桩后的被动土压力,从而减小桩的水平位移,更好地保证竖井稳定性。

此外,预制混凝土支撑能克服锚索支护在土层中锚固力不足的缺陷,充分结合钢支撑与现浇混凝土支撑的优势,保证支护体系的整体性、刚度大且施工效率高,适用于边坡附近。

参考文献

- [1] 任建喜,谭牧凡.黄土地区地铁车站深基坑变形规律[J].城市轨道交通研究,2021,24(8):55.
REN Jianxi, TAN Mufan. Deformation pattern of deep foundation pit of metro station in loess area[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(8): 55.

- [2] 王飞,郑余朝,罗川疆.兰州地铁黄河岸滩深大竖井结构设

(上接第 104 页)

- [6] 中铁二院工程集团有限责任公司.丽江城市综合轨道交通项目一期工程可行性研究报告[R].成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2018.
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Feasibility study report of Lijiang urban integrated rail transit project phase I [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2018.
- [7] 任冲.高寒山区长大坡道铁路列车下坡限速研究[J].高速铁路技术,2019,10(2):14.
REN Chong. Study on speed limit of downhill trains on long-slope railways in Alpine and cold region[J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(2): 14.
- [8] 郑昊迪.高速铁路长大坡道设置对动车组运行的影响研究

- 计及力学特性研究[J].城市轨道交通研究,2019,22(1):15.

WANG Fei, ZHENG Yuchao, LUO Chuanjiang. On the deep & large shaft structural design and mechanical characteristics of Lanzhou Metro on Yellow River floodplain[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(1): 15.

- [3] 林志斌,李元海,刘继强.软土基坑变形时空演化规律研究[J].现代隧道技术,2016,53(3):82.

LIN Zhibin, LI Yuanhai, LIU Jiqiang. A study on the spatial-temporal evolution regularity of the deformation of a foundation pit in soft soil[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(3): 82.

- [4] 汪鹏程,文杰,邵长征,等.基于数值分析的深基坑围护结构优化设计[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2016,39(9):1248.

WANG Pengcheng, WEN Jie, SHAO Changzheng, et al. Optimization design of retaining structure of deep excavation based on numerical analysis[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2016, 39(9): 1248.

- [5] 李强,骆发江,李鹏,等.一种预制装配式竖井内支撑结构:202010819455.1[P].2020-11-13.

LI Qiang, LUO Fajiang, LI Peng, et al. Prefabricated vertical shaft internal support structure: 202010819455.1 [P]. 2020-11-13.

- [6] 黄生根,付卓,吴军林.洞桩法施工引起土体变形的规律研究[J].铁道工程学报,2018,35(1):11.

HUANG Shenggen, FU Zhuo, WU Junlin. Study of soil deformation caused by construction with PBA method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(1): 11.

(收稿日期:2021-11-21)

[D].北京:北京交通大学,2021.

ZHENG Haodi. Study on the influence of high-speed railway long-steep ramps on the operation of EMU train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

- [9] 范晓佳.高寒山区30‰长大坡道列车下坡限速研究[C]//朱颖.“川藏铁路建设的挑战与对策”2016学术交流会议论文集.北京:人民交通出版社股份有限公司,2016:314.

FAN Xiaojia. Research on train downhill speed limit of 30‰ long-large ramp in high-altitude mountainous area[C]//ZHU Ying Proceedings of 2016 Academic Exchanges on Challenge and Countermeasures of Sichuan-Tibet Railway Construction. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2016: 314.

(收稿日期:2023-02-06)