

黄土地区洞桩法地铁车站边桩和中柱的 受力变形机理*

郑选荣¹ 杨 辉¹ 商学旋² 王少雄² 姚寒涓² 雷 奇² 杨 康¹

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 710054, 西安; 2. 陕西建工集团股份有限公司, 710003, 西安)

摘 要 [目的] 为了确保黄土地区洞桩法车站施工过程中重要竖向承重构件的稳定性, 需要对施工过程中边桩和中柱的受力变形机理进行研究, 并对最不利受力阶段边桩和中柱提出变形控制措施。[方法] 以西安地铁 2 号线何家营站为研究背景, 通过数值模拟与现场监测的方法, 对施工过程中边桩的水平位移、钢筋内力、水平土压力及中柱应变展开研究。[结果及结论] 扣拱施作以及站厅层和站台层土体开挖是边桩水平位移最不利的三个阶段, 在这些关键阶段施工时, 应在结构内部架设钢支撑并适当加固已扰动的地层; 在桩梁和扣拱施作中, 边桩主筋承受轴向压力, 而在站内剩余土方施工阶段, 边桩背土侧的钢筋由轴向压力逐渐转化为轴向拉力, 且随着边桩埋深的增大, 钢筋的轴向拉压力增长变缓; 在扣拱初期支护施作中, 土压力在边桩埋深 6.6 m 处达到最大值 34.5 kPa, 且随着边桩埋置深度增大, 边桩的桩侧压力增长速率显著, 因此车站内侧的土方开挖是控制边桩迎土侧土压力大小的关键阶段, 必要时对桩后土体进行注浆加固有利于提高桩基的承载力; 中跨扣拱施工时, 中柱的应变呈现出先减小、后增大的趋势。

关键词 地铁; 车站; 边桩; 中柱; 受力变形机理; 洞桩法; 黄土地区

中图分类号 U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.03.005

Study on Stress and Deformation Mechanism of Side Pile and Middle Column for PBA Method Metro Station in Loess Area

ZHENG Xuanrong¹, YANG Hui¹, SHANG Xuexuan², WANG Shaoxiong², YAO Hanjuan², LEI Qi², YANG Kang¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, 710054, Xi'an, China;

2. Shaanxi Construction Engineering Group Corporation Limited, 710003, Xi'an, China)

Abstract [Objective] In order to ensure the stability of important vertical load-bearing components in the process of sta-

tion construction with PBA (pile-beam-arch) method in loess area, it is necessary to study the stress and deformation mechanism of side piles and middle columns during construction, and put forward measures to control the deformation in the most unfavorable stress stage. [Method] With Hejiaying Station of Xi'an Metro Line 2 as the research background, the methods of numerical simulation and field monitoring are used to study the horizontal displacement, internal force of steel bar, horizontal earth pressure and strain of middle column of side piles during construction. [Result & Conclusion] Construction of buckle arch, excavation of station hall layer and platform layer are the three most unfavorable stages for horizontal displacement of side piles. During the critical stages of construction, steel support should be set up inside the structure and the disturbed stratum should be properly reinforced. During construction of pile beam and buckle arch, the main rebar of side pile bears axial pressure, while during construction of residual earthwork in the station, forces borne by the rebar of side pile back on the soil side gradually change from axial pressure to axial tension. With the increase of buried depth of side pile, the growth of axial tension pressure slows down. In the construction of the initial support of the buckle arch, the earth pressure reaches the maximum value of 34.5 kPa at the buried depth of 6.6 m of the side pile. As the aforementioned depth deepens, the growth rate of the pile side pressure is significant. Therefore, the excavation of the inner side of the station is the key stage to control the earth pressure of the side pile at the earth facing side. If necessary, grouting reinforcement of the soil behind the pile is helpful to improve the bearing capacity of the pile foundation. During the construction of the mid-span arch, the strain of the middle column shows a trend of decreasing first and then increasing.

Key words metro; station; side pile; middle column; stress deformation mechanism; PBA method; loess area

* 国家自然科学基金项目(42072319)

洞桩法是一种基于浅埋暗挖法的施工思想,符合对地层的适用范围及控制变形要求,适用于城市轨道交通车站的新型的暗挖施工方法^[1-2]。其主要流程为施工导洞、边桩、中柱、冠梁、扣拱等框架结构,形成桩-梁-拱的共同受力支撑体系,在此基础上逐步开挖车站内部土体,最后施作边墙和二次衬砌等结构。在整个车站结构体系中,边桩和中柱是重要的竖向与侧向承力结构,尤其是扣拱传递的斜向桩顶荷载以及桩侧水平土压力对边桩受力极为不利;而中柱主要承受边跨和中跨扣拱传递的不平衡推力,其顶部易发生较大的水平位移。目前已有部分学者对洞桩法车站边桩与中柱的受力和变形展开了相关研究。文献[3]以新疆地铁1号线为工程背景,通过数值模拟的方法,对边桩、中柱的主应力分布规律进行了分析。文献[4]通过数值模拟和现场监测的方法得出了洞桩逆作法在不同施工工序下的地面沉降和边桩轴力的变化规律。文献[5]通过现场监测的方法对黏质粉土等交互地层的边桩内力进行了分析,总结得到单层洞桩法施工过程中边桩的混凝土应变与桩顶压力的变化规律。

本文以西安黄土地区地铁车站——何家营站洞桩法施工为研究背景,通过现场监测和数值模拟的方法对黄土地区不同施工阶段下边桩的水平位移、水平土压力、钢筋内力,以及中柱的受力变形机理进行了分析,为黄土地区地铁车站洞桩法理论研究和施工提供参考。

1 工程概况

何家营站沿南长安街南北设置,整个车站采用三跨双柱地下两层现浇直墙三连拱结构。车站的标准段宽度为 21.9 m,高度为 16.5 m,长度为 230.3 m。车站采用 PBA(洞桩逆作)法施工,其中导洞采用“上4+下2”导洞法:上导洞采用台阶法施工,开挖宽度为 4 m,开挖高度为 5 m;下导洞采用 CD(中隔墙)法施工,开挖宽度为 11.4 m,开挖高度为 6 m。车站主体结构拱部埋深为 13.3~24.8 m,车站边桩结构采用 $\phi 1\ 000$ mm、间距 1 400 mm 的钻孔灌注桩结构,桩长为 10.75 m;钢管柱直径为 1 000 mm,间距为 6 500 mm,长度为 10.95 m。车站地层主要由人工素填土、3-1-1 新黄土、3-2 古土壤、4-1-1 老黄土、4-2-1 古土壤、4-2-2 古土壤和 4-1-2 老黄土组成,其中整个车站穿越的主要土层为古土壤与老黄土层。

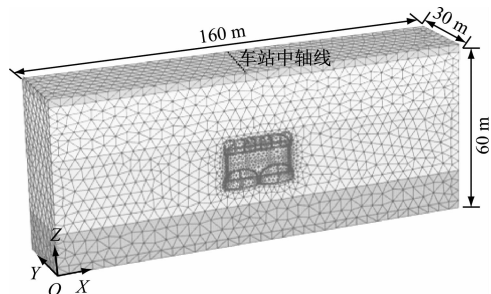
2 洞桩法车站数值模拟

2.1 数值计算假定条件

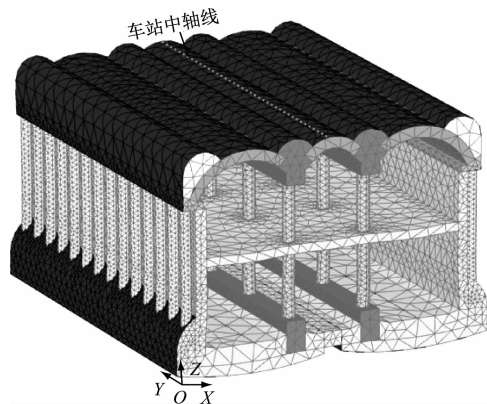
- 1) 假定模型中各个土层是平整的,其厚度根据现场各土层的平均厚度确定。
- 2) 根据现场施工环境,不考虑地下水的作用。
- 3) 模型中的荷载仅考虑土体自重和地面超载。
- 4) 初期支护结构为线弹性材料。
- 5) 预注浆后进行土体开挖,并同步完成支护。

2.2 模型建立及边界条件

本文采用 PLAXIS 有限元软件对何家营站施工阶段进行数值模拟分析。该车站覆土层厚度选取最大值,车站的整体高度为 16.5 m,整体宽度为 21.9 m。模型边界到车站中心线的距离取 3~5 倍的洞径,即模型的总高度取值为 60 m(Z 轴),模型的宽度取值为 160 m(X 轴),同时考虑到导洞错步开挖步距,车站的纵向长度取值为 30 m(Y 轴)。对模型施加边界条件时,底部设为固定约束,四周设为法向约束,模型地面无约束。何家营站有限元计算模型如图 1 所示。



a) 车站-土层有限元模型



b) 车站主体结构

图1 何家营站有限元计算模型

Fig.1 Finite element calculation model of Hejiaying Station

2.3 计算参数

模型中土体采用 3D 实体单元摩尔-库伦材料

进行模拟,初衬拱拱采用板单元进行模拟,二衬、冠梁及围护结构采用实体单元模拟。各土层土体参数通过勘察报告,并结合西安地区典型黄土地层数值分析的相关文献综合确定^[6-8]。模型中土层物理力学参数和车站支护结构参数见表 1—表 2。

表 1 土层物理力学参数

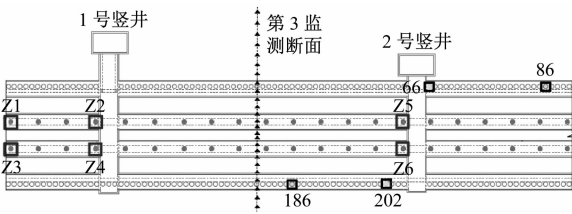
名称	弹性模量/ MPa	泊松比	重度/ (kN/m ³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
素填土	5.0	0.33	20.0	10	8.0
3-1-1 新黄土	13.0	0.28	16.7	32	23.9
3-2 古土壤	12.2	0.28	17.7	36	23.2
4-1-1 老黄土	23.5	0.28	17.4	35	23.9
4-2-1 古土壤	18.6	0.29	17.6	35	24.0
4-1-2 老黄土	23.5	0.28	17.6	35	24.0

表 2 支护结构参数

类别	弹性模量/MPa	泊松比	重度/(kN/m ³)
初期支护	33 500	0.25	25.0
二次衬砌	25 500	0.20	23.0
围护桩	33 500	0.25	25.0
钢管柱	43 000	0.20	23.0
冠梁	33 500	0.25	25.0
底板	33 500	0.25	23.5
顶纵梁	43 000	0.25	25.0

3 洞桩法施工监测方案

本文主要针对黄土地区洞桩法车站的地面沉降规律、边桩的水平位移、桩侧土压力、钢筋轴力,以及中柱的应变进行监测分析。主要监测断面和测点布置如图 2 所示。对第 3 监测断面进行地面沉降分析。第 3 监测断面距离 2 号竖井约 27.5 m,该断面上总共布置 30 个测点。以靠近竖井和横通道的边桩 66 与中柱 Z5、Z6 为最不利位置进行受力与变形分析。边桩仪器安装示意如图 3 所示。沿着边桩的埋深方向每隔 2.2 m 分别在其迎土侧和背土侧的主筋上焊接钢筋计;沿着边桩的埋深方向在迎土侧每隔 2.2 m 在桩土接触表面安装土压力计;应变计安装在中柱的底端,安装方向和钢筋计安装方向一致。监测不同施工工况下边桩的钢筋轴力、水平土压力及中柱的应变变化规律。



注:Z1、Z2、Z3、Z4、Z5、Z6 为中柱;66、86、186、202 为边桩。

图 2 主要监测断面和测点布置平面图

Fig. 2 Main monitoring section and layout plan of measuring points

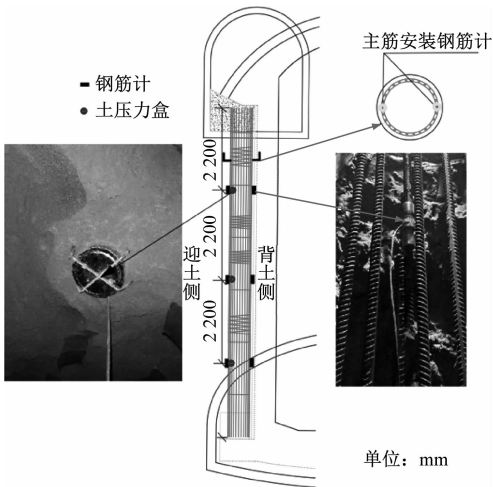


图 3 边桩仪器安装示意图

Fig. 3 Diagram of side pile instrument installation

4 数值模拟与监测结果分析

4.1 地面沉降结果分析

由于整个车站的现场施工尚未完成,因此本文根据现场施工监测情况,整理导洞和中板施作完成后的地面沉降累计数据,并绘制地面沉降监测曲线。图 4 显示了通过地面 $Y=15\text{ m}$ 和 $Z=60\text{ m}$ 的测点处所形成的地面沉降曲线。

由图 4 可见:模型的地面沉降主要发生在距车站中轴线 40 m 范围内,且在车站中线位置处地面沉降值达到最大;在导洞和中板施作完成后,地面沉降的监测值分别为 46.8 mm 和 56 mm,地面沉降的模拟值分别为 40.2 mm 和 52.0 mm,其模拟值与监测值误差较小,分别为 14.10% 和 7.14%。因此,采用该模型研究黄土地区洞桩法车站的边桩和中柱的变形规律是可行的。

4.2 边桩水平位移分析

边桩作为洞桩法车站框架受力的主要围护结构,在施工过程中桩-柱-梁的受力转换频繁,因此,

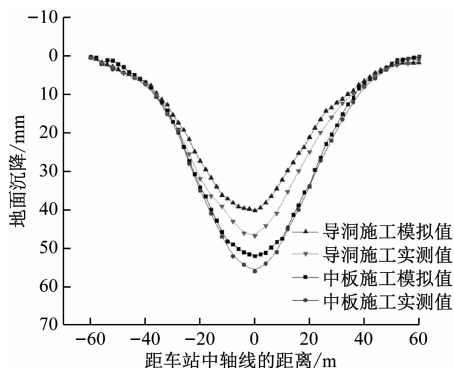


图4 地面沉降-距车站中轴线的距离曲线

Fig. 4 Curves of surface settlement and distance to the central axis of the station

本文采用数值模拟方法对边桩最不利受力工况下的水平位移进行分析。边桩水平位移-埋深关系曲线如图5所示。

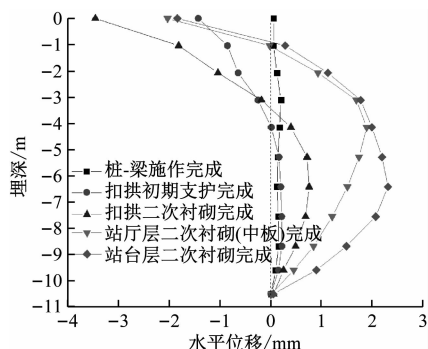


图5 边桩水平位移-埋深关系曲线

Fig. 5 Relation curves of horizontal displacement and buried depth of side pile

当桩梁施作完成后,桩身内外侧并无土方作业,在该阶段边桩并无明显的水平变形。在扣拱施工完成后,整个车站结构的受力体系发生了转变,其上覆土压力逐渐由扣拱全部承担并传递至边桩,使边桩桩顶水平位移达到了最大值 -3.46 mm 。尽管桩身内外侧并无土压力差值,但由于在导洞和扣拱开挖的过程中一直存在临空面,长时间的空间临空以及时间的积累效应使土体发生变形剥落^[9],使其在边桩下部 $3\sim 9\text{ m}$ 范围内仍发生了较小的挠曲变形。边桩在扣拱施作阶段的受力分析如图6 a)所示。随着站厅层土方的开挖,既有地层应力的平衡状态再次被打破。受扰动地层在其新的受力平衡过程中,带动附近受扰动地层向车站中轴线移动,同时在扣拱斜向荷载的作用下,使得距离桩顶 4.15 m 范围内的最大水平位移达到 1.94 mm 。边

桩在中板施作阶段的受力分析如图6 b)所示。站台层土体在开挖过程中,中板以上的边桩水平位移变化不大,这是由于中板的施作对边桩的水平挠曲变形具有抑制作用,但中板以下 2 m 位置处在较大的内外侧土压力差的作用下产生了 2.32 mm 的水平位移。边桩在中板施作阶段的受力分析如图6 c)所示。由此可见,在以上3种工况下边桩变形最为不利,应及时监测边桩的水平位移变化,以便采取相应措施。

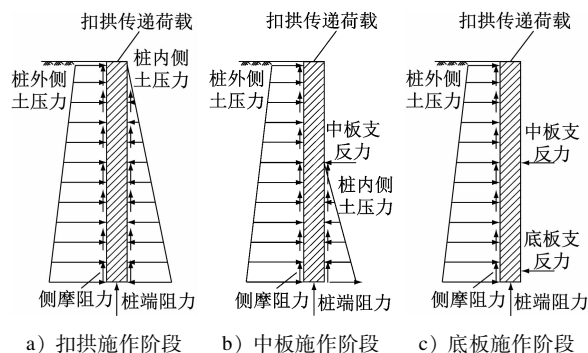


图6 边桩在最不利工况下的受力分析图

Fig. 6 Diagram of stress analysis of side piles under most unfavorable working conditions

4.3 边桩钢筋轴力分析

归纳整理测点的钢筋轴力数据,并绘制钢筋轴力时程曲线,如图7所示。

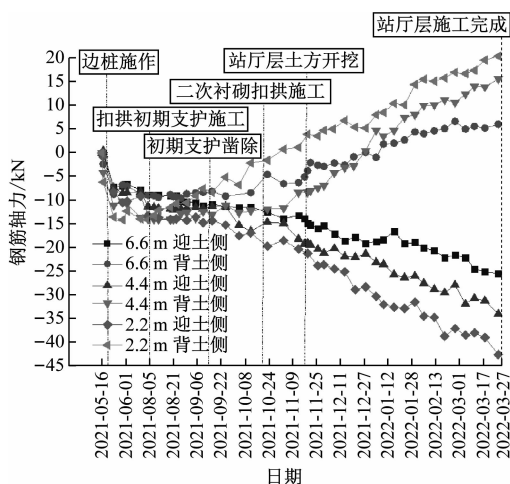


图7 边桩钢筋轴力时程曲线

Fig. 7 Time history of steel bar axial force of side piles

在边桩冠梁施作的过程中,边桩迎土侧和背土侧的钢筋以受压为主,其最大压力达到 14.1 kN 。随着扣拱初期支护的施工,距离桩顶 3 m 范围内的钢筋内力迅速增加,边桩的其余部位内外侧钢筋压力逐渐趋于稳定,究其原因扣拱施工中,边桩两

侧土体对其水平位移起到了约束作用。导洞初期支护凿除后,车站结构的受力体系发生了转化,原先由导洞初期支护承担的荷载全部由扣拱的初期支护承担,使得边桩在扣拱斜向荷载的作用下产生了偏向车站内侧的位移,从而导致钢筋的轴向压力增长速率加快。此时距桩顶 2 m 范围内,迎土侧钢筋的轴向压力增加了 4.6 kN,背土侧钢筋的轴向压力减少了 1.9 kN。随着扣拱二次衬砌的施作,边桩钢筋的轴力增长速率逐渐减缓,且在边桩背土侧约 2 m 的范围内钢筋出现了轴向拉力。当站厅层土方开挖时,边桩背土侧的约束与侧摩阻力逐渐消失,背土侧的钢筋轴力呈现全部受拉的状态,而迎土侧的钢筋轴力呈现全部受压的状态,且随着深度的增加,背土侧与迎土侧钢筋的拉、压力增长趋势逐渐减缓。

4.4 边桩水平土压力分析

在不同的施工工序下,归纳整理测点的土压力数据,绘制不同工况下边桩 66 测点的土压力时程曲线,如图 8 所示。

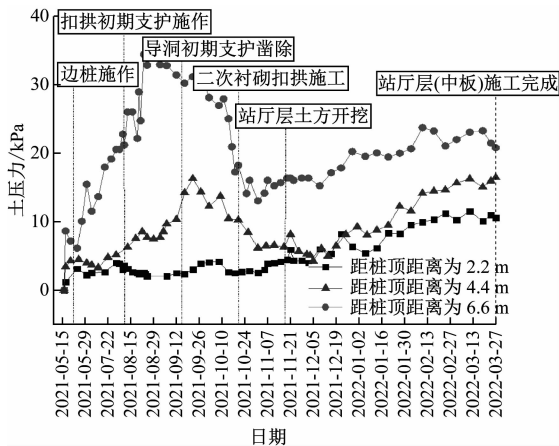


图 8 边桩 66 测点土压力时程曲线

Fig. 8 Time history of earth pressure at measuring point side pile 66

在边桩和冠梁的施作过程中,随着导洞开挖过程中应力的充分释放,使得埋设的土压力盒与土体充分接触,水平土压力增长速率加快,其值达到 26.8 kPa。扣拱的初期支护施作中,边桩水平土压力进一步增大,究其原因是在施工扣拱的过程中,产生了斜向荷载,使得边桩受到水平推力,由于桩与土的相互挤压作用,使得桩周土的土压力增大,当扣拱开挖产生一定的步距后,对边桩的土体扰动逐渐减小,在该阶段桩周土体处于稳定状态,此时

土压力在边桩埋深 6.6 m 处达到最大值 34.5 kPa。导洞初期支护凿除后,车站结构的受力体系发生转变,边跨扣拱不断向围护桩传递荷载,造成围护桩周围土体应力重新分布,使边桩周围水平土压力呈减小趋势。扣拱二次衬砌的施工对土体的扰动较小,同时黄土由于自身结构的自稳性,使得作用在边桩的土压力逐渐趋于稳定。当站厅层土方开挖时,边桩背土侧的土体逐渐消失,使得桩体两侧产生较大的压力差,造成边桩迎土侧的土压力随着施工的进行呈现增长的趋势,且边桩埋置深度越大,水平土压力增长速率越快。

4.5 中柱应变分析

整理中柱的监测数据,绘制中柱 Z5、Z6 的应变时程曲线,如图 9 所示。

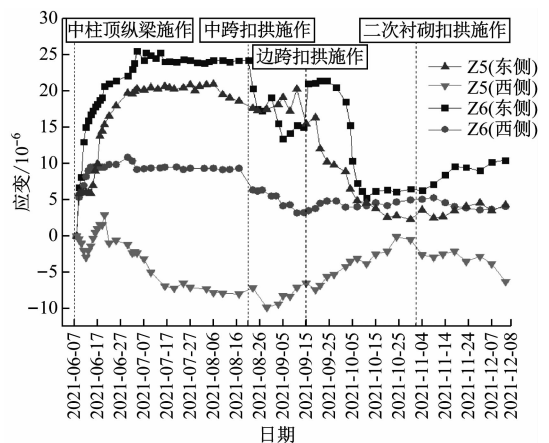


图 9 中柱 Z5、Z6 应变时程曲线

Fig. 9 Time history of middle column Z5 and Z6 strain

随着顶纵梁的施作,上部的荷载通过顶纵梁传递给中柱,同时导洞开挖形成大幅度的空间临空面,引起地层发生不均匀的变形,从而导致中柱的应变急剧增加。对中跨扣拱下方土体进行开挖时,中跨扣拱的施工使得中柱不仅要间接承受竖向的土压力,同时还需承受拱脚较大的水平推力和地层产生的水平土压力,导致中柱的应变呈现先减小、后增大的趋势。而对于两边跨初期支护扣拱下方土体开挖时,由于边跨扣拱开挖过程需同步进行,可以很好地平衡中跨扣拱拱脚两侧的部分水平推力,使得中柱应变呈减小趋势。随着二次衬砌扣拱的施作,中柱两侧的拉压应变逐渐趋于稳定,这是由于中柱顶部已施作的二次衬砌结构可作为 1 道水平支撑结构,对中柱的水平向位移进行限制,使中柱不会产生较大的变形,确保整个车站结构的整体

稳定和安全。

5 结语

1) 针对边桩变形控制较高的黄土地区地铁车站洞桩法工程,扣拱、站厅层及站台层的施工是控制边桩水平变形的关键阶段。在以上关键阶段施工时,应在车站结构内部架设钢支撑,并适当加固已扰动的地层来减小边桩的水平变形。

2) 在桩梁和扣拱施作的过程中,边桩钢筋主要承受轴向压力的作用。而在后续施工阶段,迎土侧的钢筋主要承受压力,背土侧的钢筋由轴向压力逐渐转化为轴向拉力,且随着施工的进行钢筋的拉压力增长趋势逐渐减缓。在施工中通过在围护桩位置焊接横向连接钢筋,使由单桩所承受的荷载需通过横向连接由两侧桩体共同承担,从而显著减少桩体两侧钢筋的受力和变形。

3) 在扣拱初期支护施作的过程中,导洞初期支护的凿除会使围护桩周围土体应力重分布,使边桩水平土压力呈现减小的趋势。站厅层土方开挖到中板施工完成阶段,随着围护桩埋置深度的增大,边桩的水平土压力增长速率越快。因此,车站内侧的土方开挖是控制边桩迎土侧土压力大小的关键阶段,必要时应对桩后土体进行注浆加固,有利于提高桩基的承载力。

4) 中跨初期支护扣拱的施工使得中柱受力较为复杂,导致中柱的应变呈现出先减小、后增大的趋势。两边跨初期支护扣拱和二次衬砌扣拱的施工则会对中柱的水平变形进行限制,使中柱两侧的拉压应变逐渐减小最终趋于稳定。因此在中跨扣拱土体开挖完成后,充分对拱后土体回填注浆,对提高围岩的稳定性和减小中柱的变形具有显著作用。

参考文献

[1] 王明胜. 复杂环境下洞桩法地铁车站设计关键技术研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(3): 87.
WANG Mingsheng. Research on the key technique of subway station design with hole-pile method under complex environment[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(3): 87.

[2] 罗富荣, 汪玉华, 郝志宏. 地铁车站洞桩法设计与施工关键技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
LUO Furong, WANG Yuhua, HAO Zhihong. Key technology of design and construction of PBA method for subway station[M].

Beijing: China Railway Publishing House, 2015.

[3] 刘加柱, 孙礼超, 张壮, 等. 地铁车站 PBA 洞桩法施工力学效应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增刊1): 240.
LIU Jiazhu, SUN Lichao, ZHANG Zhuang, et al. Study on mechanical effect of PBA method in metro station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S1): 240.

[4] 周稳弟, 梁庆国, 张晋东. 某地铁车站洞桩法施工变形和结构受力分析[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(6): 121.
ZHOU Wendi, LIANG Qingguo, ZHANG Jindong. Analysis of the deformation and structural stress of a metro station constructed by pile-beam-arch method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(6): 121.

[5] 孙玉辉, 张子真, 陈昌彦, 等. 单层洞桩法暗挖车站边桩结构受力及变形特征研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(9): 30.
SUN Yuhui, ZHANG Zizhen, CHEN Changyan, et al. Study on stress and deformation characteristics of side pile structure of station excavated by single-storey hole-pile method[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(9): 30.

[6] 陈武. 黄土地层洞桩法暗挖地铁车站设计施工关键技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
CHEN Wu. Key techniques for design and construction of metro station in loess strata using PBA method[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.

[7] 赖金星, 余德强, 冯志华, 等. 黄土连拱隧道支护结构力学特性现场试验[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(5): 180.
LAI Jinxing, YU Deqiang, FENG Zhihua, et al. Mechanical characteristics of a multi-arch tunnel support structure in loess[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(5): 180.

[8] 杨锋. 西安某地铁车站洞桩法施工的地表变形规律数值模拟分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(12): 43.
YANG Feng. Numerical simulation analysis of surface deformation law in certain Xi'an metro station with PBA construction[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(12): 43.

[9] 付春青, 刘波. PBA 法非对称不均匀变形引起地表沉降规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(3): 927.
FU Chunqing, LIU Bo. Study on the law of surface subsidence caused by asymmetric and uneven deformation of PBA method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(3): 927.

• 收稿日期:2022-09-19 修回日期:2022-10-11 出版日期:2024-03-10
Received:2022-09-19 Revised:2022-10-11 Published:2024-03-10

• 第一作者:郑选荣,副教授,254519207@qq.com
通信作者:杨辉,硕士研究生,1932424783@qq.com

• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license