

大跨度地铁车站十导洞洞桩法施工变形规律及其影响因素研究

周 涛

(长沙市城投基础设施建设项目管理有限公司, 410011, 长沙)

摘 要 [目的] 为确保大跨度地铁车站施工安全, 需对十导洞洞桩法施工过程中车站结构的变形规律及其影响因素进行研究。[方法] 以西黄村站为工程背景, 建立了大跨度车站十导洞洞桩法施工数值模型, 分析了不同施工阶段地面的沉降以及桩的水平变形规律, 研究了导洞开挖顺序、导洞开挖错距及扣拱施工顺序等三种因素对地面沉降的影响规律。[结果及结论] 车站上方导洞以及中间导洞施工对地面沉降的影响较大; 各施工阶段的地面沉降规律均满足正态分布, 最大沉降位于车站中线处, 导洞施工及扣拱施工两个阶段引起的地面沉降占总沉降的 74.7%。车站负二层土体开挖后, 桩在水平方向的约束急剧减弱, 导致桩水平变形增大。先开挖下层导洞引起的地面沉降较小; 随着导洞开挖错距的增大, 地面最大沉降逐渐减小; 先开挖两侧扣拱再依次开挖中间扣拱的施工顺序引起的地面沉降最小。

关键词 大跨度地铁车站; 十导洞洞桩法; 施工变形规律; 影响因素

中图分类号 U231.4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2025.01.010

Research on Deformation Patterns and Influencing Factors of Ten Pilot Tunnel Pile Method Construction in Large Span Metro Stations

ZHOU Tao

(Changsha Urban Investment Infrastructure Construction Project Management Co., Ltd., 410011, Changsha, China)

Abstract [Objective] To ensure the construction safety of large span metro stations, it is necessary to conduct research on the deformation patterns of the station structure and the influencing factors in the construction process of ten pilot tunnel pile method. [Method] With Xihuang Village Station as the engineering background, a numerical model for the construction of ten pilot tunnel pile method in large span stations is established. The patterns of ground settlement law and the pile horizontal deformation patterns at different construction stages are analyzed. The influence pattern of the three factors, namely the excavation sequence of pilot tunnels, the staggered distance of pilot tunnel excavations, and the construction sequence of

arch closing, on the ground settlement is studied. [Result & Conclusion] The construction of the upper pilot tunnels and the middle pilot tunnels above the station has a greater impact on the ground settlement. The ground settlement patterns of each construction stage all conform to the normal distribution. The maximum settlement locates at the center line of the station, and the ground settlement caused by the pilot tunnel construction and the arch closing construction accounts for 74.7% of the total settlement. After the excavation of the soil on the second basement level of the station, the horizontal restraint of the piles is sharply weakened, resulting in increased horizontal deformation of the piles. The ground settlement caused by the first excavation of the lower pilot tunnels is relatively small. As the staggered distance of the pilot tunnel excavation increases, the maximum ground settlement gradually decreases. The construction sequence of first excavating the side arch closings and then successively excavating the middle arch closings causes the least ground settlement.

Key words large span metro tunnel; ten pilot tunnels construction with pile-beam-arch method; construction deformation pattern; influencing factor

洞桩法是城市轨道交通车站常用的暗挖施工方法^[1-2]。目前众多学者对洞桩法施工引起的地面沉降及结构受力、变形等做了相关研究。文献[3]介绍了洞桩法的优点, 并对洞桩法施工中存在的边拱施工及导洞回填、初支扣拱等技术进行了详尽研究。文献[4]获取的有限元计算和实测数据的对比分析结果, 对车站施工起到了重要的指导作用。文献[5]采用数值方法研究了洞室跨度、高度、埋深及施工工序等因素对浅埋暗挖洞桩法的影响规律。文献[6]采用现场实测方法研究了大跨度分离式地铁车站洞桩法施工引起的周围地层变形、拱顶沉降及地面沉降的规律及其影响因素。目前, 针对洞桩法车站的研究主要为八导洞和六导洞洞桩法施工, 几乎未见大跨度车站十导洞洞桩法施工的研究, 而

十导洞洞桩法施工过程更加复杂,对地面沉降的影响更大^[7-8]。

本文以西黄村站为工程背景,建立了大跨度车站十导洞洞桩法施工数值模型,分析了不同施工阶段地面沉降规律以及桩的水平变形,并采用现场监测数据对模拟结果进行验证。在此基础上分析了导洞开挖顺序、导洞开挖错距及扣拱施工顺序等因素对地面沉降的影响规律,可为类似大跨度车站十导洞洞桩法施工提供参考。

1 工程概况

西黄村站主体结构采用十导洞 PBA 工法(洞桩逆作法)施工。该车站为岛式站台,有效站台宽度 14.0 m,车站总长 252.0 m,车站三跨段净宽 23.0 m,四跨段净宽 39.6 m,有效站台中心里程为右 K4 + 761.266,有效站台中心位置轨顶标高 40.60 m(路面标高 63.65 m)。西黄村站断面图如图 1 所示。

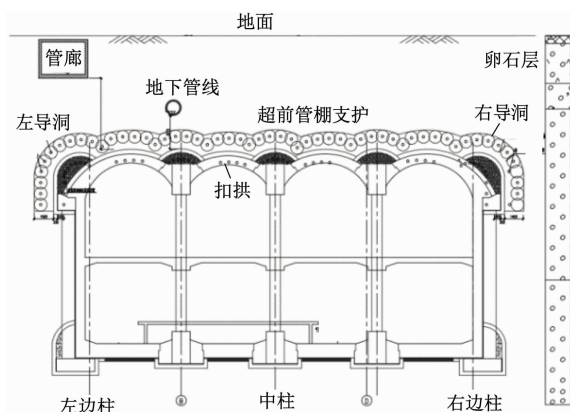


图 1 西黄村站断面图

Fig. 1 Profile of Xihuangcun Station

2 大跨度车站十导洞洞桩法施工数值模拟

2.1 模型建立

为了研究大跨度车站十导洞洞桩法施工过程中的地面沉降规律,本文建立了大跨度车站十导洞洞桩法施工数值模型,模拟了洞桩法施工的全过程。该模型尺寸为 120 m × 60 m × 60 m,共计 536 872 个单元,356 872 个节点。模型顶部为自由面,底部为固定约束,4 个侧面为法向约束,导洞宽 4.5 m、高 5.0 m,车站跨度约 39.6 m,车站埋深约 12 m。西黄村站有限元模型如图 2 所示。地层以及车站的二次衬砌采用三维实体单元模拟,导洞初支采用二维壳单元模拟,桩采用一维桩单元模拟。地层采用 Mohr-Coulumb 本构模型,初支和桩为 C30 混凝土,采用弹性本构模型。模型参数根据地勘资料及试验测试选取,主要物理力学参数如表 1 所示。在模拟过程中通过单元“杀死”模拟开挖,通过改变单元参数模拟支护。

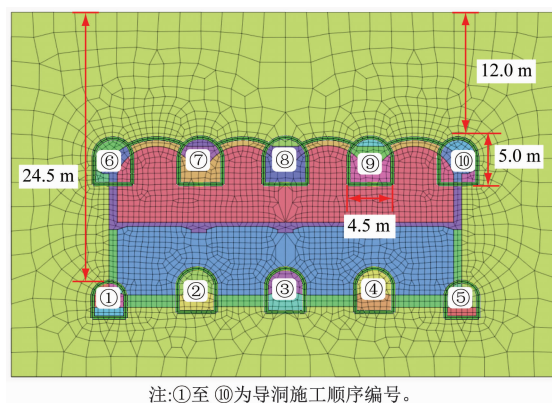


图 2 西黄村站有限元模型

Fig. 2 Finite element model of Xihuangcun Station

表 1 模型材料物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of model materials

材料	本构模型	弹性模量/MPa	重度/(kN/m ³)	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	泊松比	剪胀角/(°)
卵石层	Mohr-Coulumb		16.7	32	660	0.37	0
初支	弹性	32 500	25.0			0.21	
桩	弹性	32 500	25.0			0.20	

2.2 施工过程模拟

为了研究洞桩法施工过程中的地面沉降规律,将洞桩法施工划分为 4 个阶段:

阶段 I 导洞开挖,采用先下后上、先两侧后中间的错距同步开挖方式。

阶段 II 桩梁施作,先施作两侧导洞的底梁、桩和冠梁,后续施作中间导洞的底梁、桩和冠梁。

阶段 III 扣拱施工,先开挖中间两跨拱下方土体并架设初支,后续开挖两边跨拱下方土体,并架设初支,最后施作扣拱二衬。

阶段Ⅳ 车站主体结构施工,开挖车站主体部分土体至中板以下,并施作部分车站侧墙及中板;后续开挖车站土体至底板下方,并施作全部侧墙及车站底板。

2.3 地面沉降规律

图3为阶段Ⅰ的土体竖向位移云图。由图3可以看出:导洞施工后导洞上方地层发生沉降,导洞下方地层发生隆起;地层最大沉降发生在⑧号导洞洞顶,约为16.8 mm,越往两侧导洞洞顶沉降越小;地层最大隆起发生在③号导洞洞底,最大隆起约为13.7 mm,越往两侧底部隆起越小。

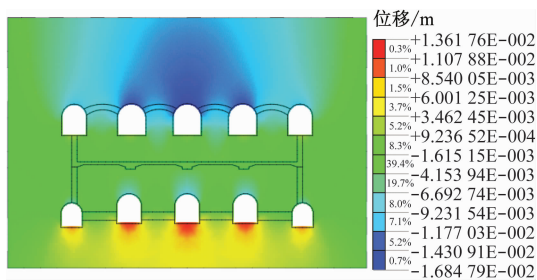


图3 阶段Ⅰ土体竖向位移云图

Fig.3 Contour map of soil vertical displacement of soil in Stage I

为了直观看出各施工阶段地面沉降变化规律,提取各阶段施工完成后的地面沉降,如图4所示。由图4可见:各施工阶段的地面沉降规律均满足正态分布,最大沉降位于车站中线处;随着施工的进行地面沉降逐渐增大,各施工阶段的最大沉降分别为7.57 mm、10.47 mm、16.30 mm、17.98 mm。

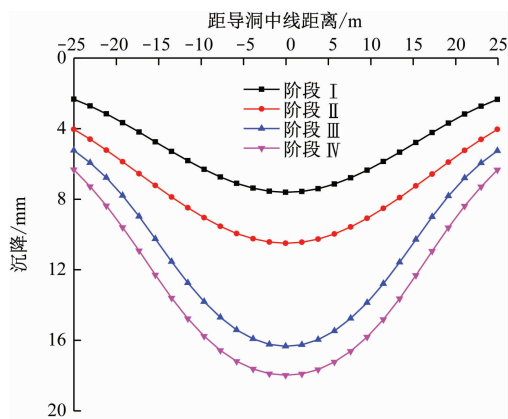


图4 不同施工阶段地面沉降曲线

Fig.4 Ground settlement curves at different construction stages

为了研究不同施工阶段对地面沉降的影响程度,表2给出了各施工阶段引起的地面沉降增量占

比。由图2可以看出:导洞开挖阶段对地面沉降的影响最大,占总沉降的42.1%;其次是扣拱施工阶段,地面沉降占总沉降的32.6%;桩梁施作及车站主体结构施工阶段对地面沉降的影响相对较小。由此可见,导洞施工及扣拱施工两阶段引起的地面沉降占总沉降的74.7%,控制这两阶段的施工沉降是控制总沉降的关键所在。

表2 各施工阶段地面沉降增量占比

Tab.2 Proportion of ground settlement increments in each construction stage

施工阶段	最大沉降/mm	沉降增量/mm	沉降增量占比/%
导洞开挖	7.57	7.57	42.1
桩梁施作	10.47	2.90	16.1
扣拱施工	16.34	5.87	32.6
主体结构施工	17.98	1.64	9.1

3 地面沉降影响因素研究

通过本文研究可知,导洞开挖及扣拱施工阶段对地面沉降的影响较大,因此对导洞开挖顺序、导洞开挖错距以及扣拱施工顺序等因素对地面沉降的影响进行分析。

3.1 上下层导洞开挖顺序对地面沉降的影响

为了研究上下层导洞开挖顺序对地面沉降的影响,分别计算先开挖下层导洞和先开挖上层导洞两种工况,上下层导洞开挖时均采用先两侧后中间的同步错距开挖方式。图5为两种导洞开挖工况施工完成后的地面沉降规律。由图5可以看出:两种开挖方式引起的地面沉降规律基本一致,均呈正态分布;先开挖下层导洞时地面最大沉降为7.5 mm,先开挖上层导洞时地面最大沉降为8.3 mm,先开挖上层导洞比先开挖下层导洞地面沉降增大大约11%。由此说明,先开挖下层导洞的施工顺序比先开挖上层导洞的施工顺序合理,实际施工中应先开挖下层导洞。

3.2 导洞开挖错距对地面沉降的影响

为了研究导洞开挖错距对地面沉降的影响,本文在先开挖下层导洞的基础上,设置导洞开挖错距5 m、10 m、15 m、20 m四种工况,单层导洞开挖施工顺序同上。图6给出了不同导洞错距下导洞开挖完成后的地面沉降规律。由图6可以看出:不同导洞开挖错距引起的地面沉降规律基本一致,均呈正态

分布;随着开挖错距的增大,地面沉降逐渐减小,四种工况的地面最大沉降分别为 8.43 mm、7.49 mm、6.99 mm、7.01 mm。

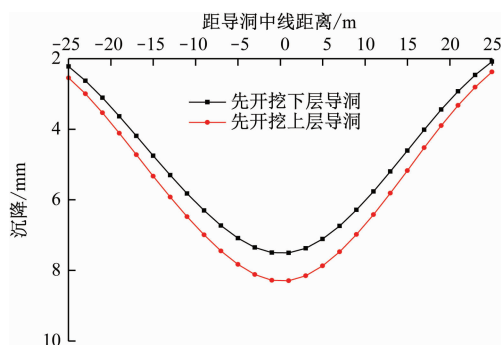


图 5 导洞开挖顺序引起的地面沉降对比曲线

Fig. 5 Comparison curves of ground settlement caused by the pilot tunnel excavation sequences

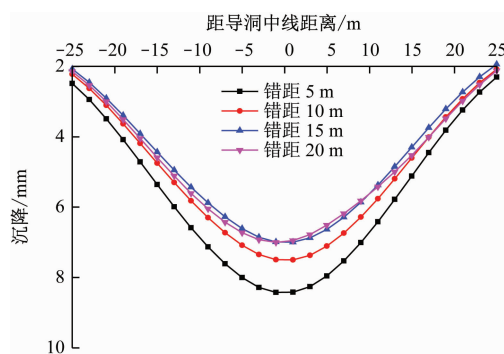


图 6 导洞开挖错距引起的地面沉降对比曲线

Fig. 6 Comparison curves of ground settlement caused by the staggered distance of pilot tunnel excavations

图 7 为地面最大沉降随导洞开挖错距的变化规律。由图 7 可以看出:随着导洞开挖错距的增大,地面最大沉降逐渐减小,且减小速度逐渐变缓;当开挖错距大于 15 m 时,地面沉降基本不再随开挖错距的增大而变化。究其原因因为开挖错距越大,各导洞施工对彼此的影响越小,导洞开挖引起的群洞效应越弱,当开挖错距达到一定程度基本不再产生群洞效应。实际施工中应根据工期及导洞间距等因素合理设置导洞开挖错距。

3.3 扣拱施工顺序对地面沉降的影响

扣拱施工对地面沉降的影响也较大。为了研究扣拱施工顺序对地面沉降的影响,本文扣拱施工顺序设置了四种工况。为了便于描述,对扣拱进行了编号,如图 8 所示。扣拱施工顺序工况设置见表 3。

图 9 为不同扣拱施工顺序工况下扣拱施工完成后的地面沉降曲线。由图 9 可以看出:不同扣拱施

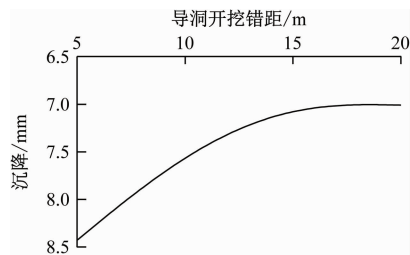


图 7 地面最大沉降随导洞开挖错距的变化规律

Fig. 7 Variation pattern of the maximum ground settlement with the staggered distance of pilot tunnel excavation

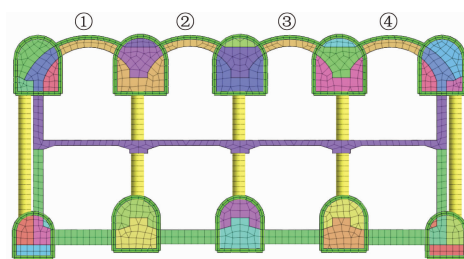


图 8 扣拱编号

Fig. 8 Number of arch closing

表 3 扣拱施工顺序工况设置

Tab. 3 Construction sequence setting of arch closing

工况	扣拱施工顺序
工况 1	扣拱①、②、③、④同时开挖
工况 2	先开挖扣拱①、④,其后开挖扣拱②、③
工况 3	先开挖扣拱②、③,其后开挖扣拱①、④
工况 4	先开挖扣拱①、④,其后开挖扣拱②,最后开挖扣拱③

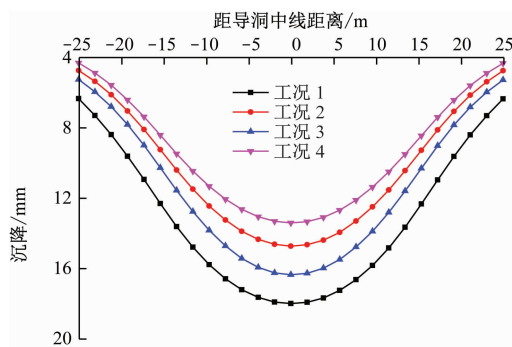


图 9 不同工况下扣拱施工完成后的地面沉降曲线对比

Fig. 9 Comparison curves of ground settlement after the completion of arch closing construction under different working conditions

工顺序工况下地面沉降规律基本一致,但地面沉降值略有差别,各工况下地面最大沉降分别为 17.98 mm、14.71 mm、16.34 mm、13.38 mm,说明扣拱施工顺序对地面沉降影响较大,其中先开挖两侧扣拱,再依次开挖中间扣拱引起的地面沉降最小,究

其因为两侧扣拱相距较远,开挖时彼此的影响较小,中间扣拱依次开挖对地层造成的扰动也较小。因此,在实际施工中为了有效控制地面沉降,扣拱施工应采用先两侧后中间的分步施工方式。

4 结论

1) 导洞开挖对其正上方地面沉降影响最大,且上方导洞开挖对地面沉降的影响大于下方导洞开挖,中间导洞开挖对地面沉降的影响大于两侧导洞开挖。

2) 各施工阶段的地面沉降规律均满足正态分布,最大沉降位于车站中线处,随着施工的进行地面沉降逐渐增大。导洞施工及扣拱施工两阶段引起的地面沉降占总沉降的 74.7%。

3) 车站负二层土体开挖后,桩在水平方向约束急剧减弱,从而导致桩水平变形增大,实际施工中土体开挖完成后应及时施作底板,防止桩的水平变形。

4) 先开挖下层导洞比先开挖上层导洞引起的地面沉降小,实际施工中应先开挖下层导洞。随着导洞开挖错距的增大,地面最大沉降逐渐减小,且减小速度逐渐变缓。当开挖错距大于 15 m 时,地面沉降基本不再随开挖错距的增大而变化。先开挖两侧扣拱,再依次开挖中间扣拱引起的地面沉降最小。

参考文献

- [1] 黄宏伟. 隧道及地下工程建设中的风险管理研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(1): 13.
HUANG Hongwei. State-of-the-art of the research on risk management in construction of tunnel and underground works [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 13.
- [2] 朱泽民. 地铁暗挖车站洞桩法(PBA)施工技术[J]. 隧道建设, 2006, 26(5): 63.
ZHU Zemin. Pile-beam-arch (PBA) construction technology for mined metro stations [J]. Tunnel Construction, 2006, 26

- (5): 63.
- [3] 黄瑞金. 地铁浅埋暗挖洞桩法车站扣拱施工技术[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(2): 268.
HUANG Ruijin. PBA method applied in the construction of arch in subway station [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(2): 268.
- [4] 刘维宁, 沈艳峰, 罗富荣. 北京地铁复一八线车站施工对环境影响的预测与分析[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 47.
LIU Weining, SHEN Yanfeng, LUO Furong. Prediction and analysis of effects during construction of subway station (on fu-ba line in Beijing) on environment [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(4): 47.
- [5] 高成雷. 浅埋暗挖洞桩法应用理论研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2002.
GAO Chenglei. A theoretical research on the practice of cavern-pile for shallow buried underground excavated tunnels [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002.
- [6] 易国华. 分离式车站洞桩法施工地层变形规律分析[J]. 隧道建设, 2008, 28(5): 548.
YI Guohua. Analysis of stratum deformation rules in separate metro stations constructed by pile-beam-arch method [J]. Tunnel Construction, 2008, 28(5): 548.
- [7] 申国奎. 地铁隧道区间“PBA”洞桩法施工对地表沉降影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
SHEN Guokui. Analysis of surface subsidence of metro tunneling with PBA drift-pile method [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [8] 牛晓凯, 张顶立, 刘美麟, 等. 新建地铁车站长距离密贴下穿既有隧道方案比选及实测变形分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊1): 270.
NIU Xiaokai, ZHANG Dingli, LIU Meilin, et al. Scheme comparison and measurement analysis of new-build subway station parallel under through existing tunnel in tight contact [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 270.

· 收稿日期:2022-11-14 修回日期:2022-12-15 出版日期:2025-01-10
Received:2022-11-14 Revised:2022-12-15 Published:2025-01-10
· 通信作者:周涛,高级工程师,254592570@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

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www. umt 1998. tongji. edu. cn