

复杂环境下矿山法横向扩挖地铁车站的 受力特性研究*

胡瑞青^{1,2}

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安; 2. 陕西省铁道及地下交通工程重点实验室(中铁一院),
710043, 西安//工程师)

摘要 目的:为避免地铁车站修建时征地拆迁导致的巨额赔偿及工期延误,需研究分析建筑物下超大断面矿山法横向扩挖地铁车站的变形规律和受力特性。方法:依托成都地铁13号线新南门站矿山法横向扩挖盾构井工程,运用 MIDAS GTS 有限元程序分析研究矿山法横向拓展车站期间周边建筑物及扩挖结构的变形规律及受力特征,并针对性地提出安全控制措施。结果及结论:导洞开挖支护作业引起的建筑物沉降量最大,约占总沉降值的 55%;拆除临时支撑浇筑二次衬砌和破除洞口临时立柱引起的建筑物沉降量分别占总沉降值的 28% 和 17%,且其沉降变化速率较快;建筑物基础间最大差异沉降值为 1.6 mm,满足 0.2% I (I 为相邻基础中心距离)控制值要求;最大倾斜值为 0.000 13,远小于 0.003 的整体倾斜控制值。地面沉降呈“双漏斗”状,沉降最大值为 8.5 mm,沉降槽宽度为明挖车站结构外延 30.0 m;掌子面水平变形呈现出中间大、四周小的楔形分布规律,并关于掌子面中心线基本对称;二次衬砌结构弯矩极值位于洞口周边及板墙交接处,应力集中现象显著。

关键词 地铁车站;横向扩挖;变形规律;数值计算;受力特征
中图分类号 U455.41+1:U231+.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.12.021

Study on Force Characteristics of Metro Station Lateral Expansion Excavation Using Mining Method in Complex Environment

HU Ruiqing

Abstract Objective: To avoid substantial compensation and delays in construction caused by land acquisition and demolition during the construction of metro stations, it is essential to investigate and analyze the deformation law and force characteristics of metro station with laterally expanded super-large profile using the mining method excavating beneath buildings.

Method: Leveraging the mining method lateral expansion shield shaft engineering at Xinnanmen Station on Chengdu Met-

ro Line 13, the MIDAS GTS finite element method is employed to analyze and study the deformation law and force characteristics of surrounding structures and excavation structures during the lateral expansion of the station. Moreover, targeted safety control measures are put forward. **Result & Conclusion**: The building settlement caused by the excavation of pilot tunnel and support operation is the most significant, accounting for approximately 55% of the total settlement. The removal of temporary support, casting of secondary lining, and removal of temporary pillars at the tunnel entrance caused building settlements of 28% and 17% of the total settlement, respectively, with relatively rapid settlement change rates. The maximum differential settlement between building foundations is 1.6 mm, meeting the control value requirements of 0.2% I (where I is the center distance between adjacent foundations). The maximum inclination is 0.000 13, significantly lower than the overall inclination control value of 0.003. Land subsidence exhibited a 'double funnel' shape, with a maximum subsidence value of 8.5 mm and a trough width extending 30.0 m beyond the open-excavated station structure. The horizontal deformation of the working face presents a wedge-shaped distribution with a large deformation in the middle and smaller ones around it, exhibiting basic symmetry along the centerline of the working face. The maximum bending moment of the secondary lining structure occurs around the tunnel entrance and at slab-wall junction, demonstrating a significant stress concentration phenomenon.

Key words metro station; lateral expansion excavation; deformation law; numerical calculation; force characteristics

Author's address China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 710043, Xi'an, China

随着地铁线网的不断发展和完善,地铁新线建设环境日趋复杂。地铁车站施工受征地拆迁、地下

* 中铁第一勘察设计院集团有限公司科研开发项目(院科 19-52,院科 20-21,院科 20-53)

管线迁改和道路交通导改等条件制约,无法及时提供盾构施工场地条件,导致盾构区间与地铁车站施工在工期与施工组织方面的矛盾愈发显著。为解决车站工期滞后问题、提高盾构设备的利用率和节约工程投资,提出了“先隧后站”的施工方法。

针对盾构扩挖修建地铁车站的关键技术及施工力学特性,国内外大量专家学者进行了广泛而深入的研究。文献[1]综合运用预测地面沉降的经验公式、相关统计资料和规范及数值模拟方法,对洞桩法扩挖大直径盾构隧道修建地铁车站的过程进行了地面沉降分析。文献[2]分析了大盾构先行浅埋暗挖法扩挖车站可能存在的致险因素,并针对性地提出了风险处理对策。文献[3]采用有限元法数值模拟分析手段对盾构隧道基础上交叉中隔壁法修建三连拱地铁车站结构参数进行了研究。文献[4]利用地层-结构相互作用有限元法,结合大直径盾构隧道扩挖建造地铁车站的工程实践,探讨了非对称施工工况下的结构受力特点及相应的安全控制措施。

然而,既有研究对“先隧后站”扩挖修建地铁车站的关键技术探讨较多,而受现状道路宽度狭窄及站周征地拆迁困难导致地铁车站局部(超)大断面横向扩挖的关键技术研究甚少。本文运用 MIDAS GTS 有限元法分析研究了建筑物下超大断面矿山法横向扩挖地铁车站的变形规律和受力特征,以期后续类似复杂环境下地铁车站横向扩挖设计和施工提供理论依据和技术支撑。

1 工程概况

成都地铁 13 号线(以下简称“13 号线”)新南门站与已运营地铁 3 号线(以下简称“3 号线”)新南门站呈 T 型换乘。既有地铁 3 号线新南门站沿新南路南北向布置,而新建 13 号线新南门站位于新南路与致民路交叉路口东侧,沿致民路敷设。本站结构型式为双柱三跨现浇框架结构,地层从上至下依次为杂填土、松散卵石、稍密卵石、中密卵石、密实卵石和中风化泥岩。车站周边主要建筑物为凯莱国际寓所及四川建设人才大厦等。其中,四川建设人才大厦为地上 7 层无地下室的框架结构,基础为人工挖孔扩底墩;凯莱国际寓所为地上 6 层地下 2 层框架-剪力墙结构,采用筏板基础。新南门站总平面图如图 1 所示。

根据盾构工筹,13 号线新南门站两端为盾构吊出,其中车站大里程端盾构井紧邻四川建设人才大

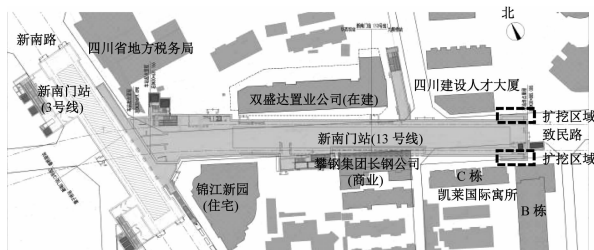
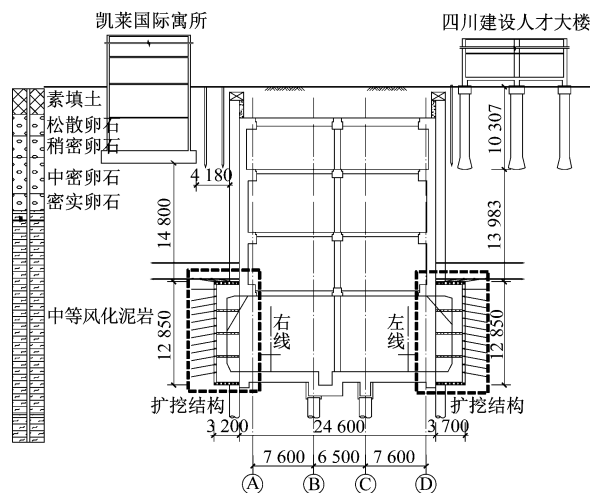


图 1 新南门站总平面图

Fig. 1 General layout of Xinnanmen station

厦和凯莱国际寓所,地块产权不允许施工临时占地。为避让地块用地红线且满足盾构接收及解体吊装净空要求,车站大里程端站台层盾构井需矿山法横向扩挖,其扩挖断面尺寸为 3.70 m(宽)×12.85 m(高)×19.30 m(长),超前支护采用双排大管棚及注浆锚杆,初期支护采用喷锚构筑法施工,结构采用复合式衬砌结构形式,初期支护和二次衬砌间设置全封闭防水层。新南门站盾构井剖面如图 2 所示。



注:A、B、C、D 为车站轴号;尺寸单位为 mm。

图 2 13 号线新南门站盾构井剖面图

Fig. 2 Section of shield shaft at Xinnanmen station on Line 13

2 横向扩挖施工工序

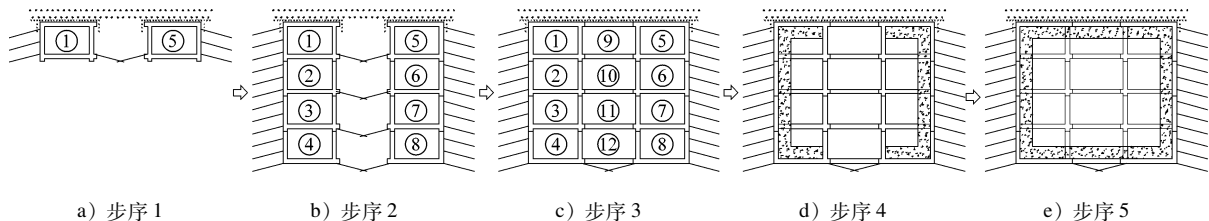
车站盾构井横向扩挖结构采用双侧壁导坑法施工,应严格按照“管超前、严注浆、短开挖、强支护、快封闭、勤量测”^[5]的原则进行开挖支护作业,其施工工序如图 3 所示,具体施工工序如下:

步序 1 打设超前大管棚及锚杆预注浆加固地层,待明挖主体结构浇筑完成并达到设计强度后破除①和⑤部主体结构围护桩,开挖①和⑤部并及时施作初期支护,打设边墙锁脚锚杆,左右洞室按要

求错开,开挖至端头后施作堵头墙,打设端墙锚杆。

步骤2 按照步骤1开挖支护顺序,依次施工②和⑥部、③和⑦部、④和⑧部。

步骤3 打设超前锚杆注浆加固地层,依次开挖⑨~⑫部并及时施作初期支护,开挖至端头后施作堵头墙,打设端墙锚杆。



注:①—⑫为扩挖导洞编号。

图3 矿山法横向扩挖盾构井施工工序图

Fig. 3 Construction process diagram of shield shaft horizontally expanded by mining method

3 矿山法横向扩挖数值分析

3.1 计算模型

运用有限元分析软件 MIDAS GTS 建立三维有限元模型,对复杂环境下超大断面矿山法横向扩挖地铁车站的变形规律及受力特征进行分析研究。计算模型横向宽度 x 取 150 m,纵向宽度 y 取 145 m,竖向高度 z 取 100 m。围岩、建筑物与地铁车站整体有限元模型如图 4 所示,建筑物与地铁车站空间相对位置关系如图 5 所示。车站围护桩、冠梁、抗拔桩、梁柱和大管棚均采用 1D 梁单元模拟,锚杆采用植入式梁单元模拟,车站及建筑物板墙、挡土墙、桩间网喷、初期支护和临时支撑采用 2D 板单元模拟,土体及建筑物基础采用 3D 实体单元模拟;计算

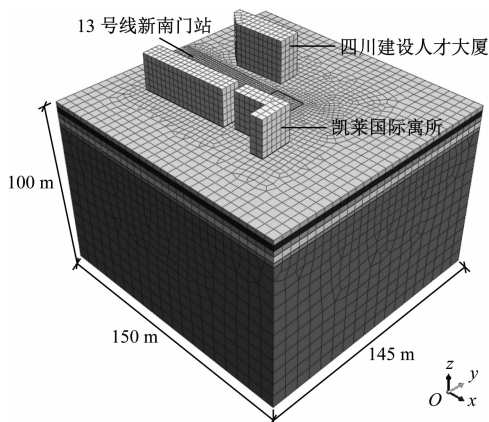


图4 围岩、建筑物及地铁车站整体有限元模型

Fig. 4 Integral finite element model of surrounding rock, buildings and metro station

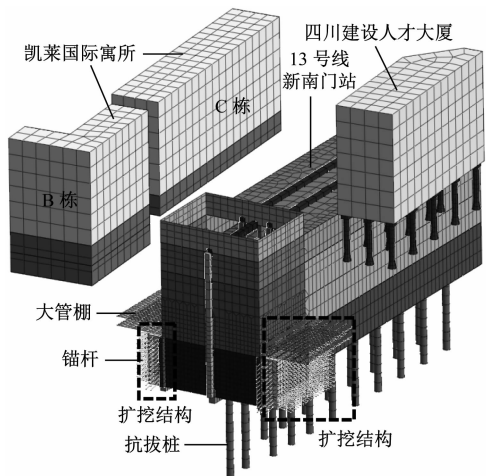


图5 建筑物与地铁车站空间相对位置关系图

Fig. 5 Relationship diagram of space relative position between buildings and metro station

s 分析时模型底部采用固定边界条件,模型四周采用法向约束边界,顶面采用自由变形边界^[6]。

3.2 计算参数

围护桩、冠梁、桩间网喷、挡土墙、主体结构梁柱板墙、横向扩挖支护结构及建筑物基础等采用线弹性本构模型,土体采用修正摩尔-库伦本构模型,考虑矿山法横向扩挖施工的时间效应,开挖和支护过程荷载释放率分别取 30% 和 70%^[7],土层和结构的基本物理力学参数如表 1 和表 2 所示。

3.3 计算结果分析

3.3.1 变形结果分析

图 6 为矿山法横向扩挖建筑物沉降变形曲线,

表 1 土层基本物理力学参数

Tab.1 Basic physical and mechanical parameters of soil layer

土层	厚度/ m	压缩模 量/MPa	重度/ (kN/m³)	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/(°)	泊松比
杂填土	2.75	5	18	0	10	0.35
松散卵石	3.00	20	20	0	30	0.25
稍密卵石	3.05	23	21	0	35	0.23
中密卵石	3.50	32	22	0	40	0.20
密实卵石	2.20	43	23	0	45	0.17
中风化岩	85.50	80	23	300	35	0.13

表 2 结构基本物理力学参数

Tab.2 Basic physical and mechanical parameters of structure

结构	弹性模量/ GPa	重度/ (kN/m³)	泊松比
围护桩、冠梁、挡土墙 抗拔桩	31.5	25.0	0.20
桩间网喷、初期支护 临时支撑	28.0	25.0	0.20
板、墙、梁、基础	31.5	25.0	0.20
中柱、扶壁柱	34.5	25.0	0.20
锚杆、大管棚	195.0	78.5	0.25

可以看到,矿山法横向扩挖引起的周边建筑物沉降变形规律基本相同,四川建设人才大厦及凯莱国际寓所沉降最大值分别为 4.0 mm、5.3 mm 及 4.2 mm,均满足建筑物沉降 20 mm 控制值要求。矿山法横向扩挖地铁车站导洞开挖支护作业引起的沉降量最大,约占总沉降值的 55%;拆除临时支撑浇筑二次衬砌及破除洞口临时立柱引起的沉降量分别约占总沉降值的 28% 和 17%,由建筑物沉降变形曲线可知拆除临时支撑浇筑二次衬砌和破除洞口临时立柱施工工序沉降变化速率较快,为矿山法横向扩挖施工的关键工序;为抑制拆撑及破除临时立柱施工期间拱顶应力释放导致的下沉变形,施工期间应加强关键工序的动态监测,必要时于横向扩挖二次衬砌顶、底板间设置临时竖撑。

矿山法横向扩挖建筑物基础差异沉降如图 7 所示,基础间最大差异沉降值为 1.6 mm,满足 0.2% l (相邻基础中心距离 l 为 9.0 m) 控制值要求。矿山法横向扩挖建筑物整体倾斜值如表 3 所示,最大倾斜值为 0.000 13,远小于 0.003 00 的整体倾斜控制值。

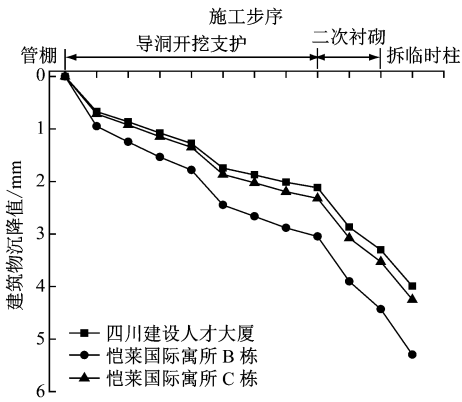


图 6 矿山法横向扩挖建筑物沉降变形曲线

Fig.6 Building settlement deformation curve of transverse expansion by mining method

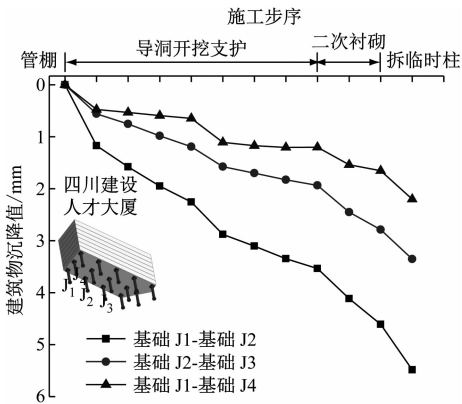


图 7 矿山法横向扩挖建筑物基础差异沉降曲线

Fig.7 Differential settlement curve of building foundation for horizontal expansion excavation by mining method

表 3 矿山法横向扩挖建筑物整体倾斜值

Tab.3 The overall inclination value of the building in the horizontal expansion of mining method

项目	建筑物		
	四川建设人才大厦	凯莱国际寓所	
		B 栋	C 栋
整体倾斜值	0.000 09	0.000 13	0.000 08

矿山法横向扩挖地面沉降变形云图如图 8 所示,可以看到,地面沉降呈“双漏斗”状,最大沉降值为 8.5 mm,沉降槽宽度约为明挖车站结构外轮廓外延 30.0 m。

矿山法横向扩挖掌子面水平变形云图如图 9 所示,可知掌子面水平变形呈现出中间大四周小的楔形分布规律,并对于掌子面中心线基本对称,最大水平位移为 1.6 mm,位于扩挖掌子面中部。

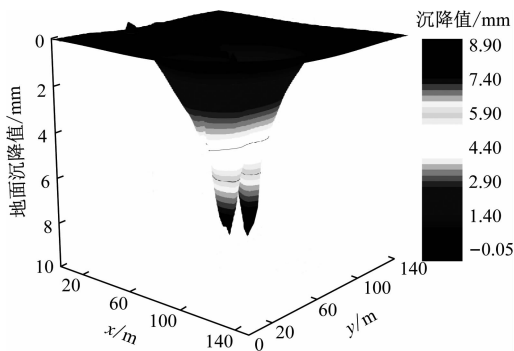


图8 矿山法横向扩挖地面沉降变形云图

Fig.8 Nephogram of land subsidence and deformation in the horizontal expansion by mining method

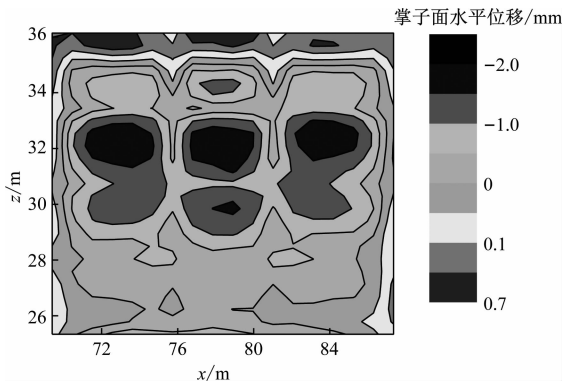


图9 矿山法横向扩挖掌子面水平变形云图

Fig.9 Nephogram of horizontal deformation of the face of the horizontal expansion excavation of the mining method

3.3.2 内力结果分析

矿山法横向扩挖二次衬砌结构正负弯矩极值分别为 +643.6 kNm 和 -628.9 kNm, 分别位于横向扩挖洞口周边及板墙交接处, 应力集中现象显著, 为抵抗横向扩挖洞口周边复杂的内力形式, 明挖车站扩挖洞口四周设置边梁边柱以增强板墙支撑约束, 板墙交接处通过设置腋角加大板墙厚度并增加配筋量以满足车站结构安全与正常使用要求。

4 结语

1) 导洞开挖支护作业引起的建筑物沉降量最大, 约占总沉降值的 55%; 拆除临时支撑浇筑二次衬砌和破除洞口临时立柱引起的沉降量分别约占总沉降极值的 28% 和 17%, 且其沉降变化速率较快, 为矿山法横向扩挖施工的关键工序。

2) 地面沉降呈“双漏斗”状, 地面沉降最大值为 8.5 mm, 沉降槽宽度约为明挖车站结构外轮廓外延 30.0 m, 应加强对沉降影响范围的监控量测。

3) 掌子面水平变形呈现出中间大四周小的楔形分布规律, 并对于掌子面中心线基本对称; 水平变形最大值为 1.6 mm, 位于扩挖掌子面中部, 施工期间应及时封闭补强。

4) 二次衬砌弯矩极值位于横向扩挖洞口周边及板墙交接处, 应力集中现象显著。

参考文献

- [1] 王芳, 贺少辉, 汪挺, 等. PBA 法扩挖大直径盾构隧道修建地铁车站地表沉降控制[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(1): 34.
WANG Fang, HE Shaohui, WANG Ting, et al. Control standard for ground surface settlement in enlarging shield tunnel by PBA method to build metro station[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(1): 34.
- [2] 高爱林, 金淮. 北京地铁区间大盾构先行浅埋暗挖法扩挖车站致险因素与对策[J]. 隧道建设, 2010, 30(5): 513.
GAO Ailin, JIN Huai. Risk factors and countermeasures for metro stations constructed by enlarging shield-bored tunnels[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(5): 513.
- [3] 林刚, 何川. 盾构隧道基础上修建三连拱地铁车站结构参数研究[J]. 铁道学报, 2003, 25(6): 93.
LIN Gang, HE Chuan. Study on structural parameters of the three-arch metro station Built on the basis of shield tunnels[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(6): 93.
- [4] 李兆平, 汪挺, 郑昊. 基于大直径盾构隧道扩挖地铁车站关键工况控制措施研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1869.
LI Zhaoping, WANG Ting, ZHENG Hao. Controlling measurements for metro station construction on enlarging large diameter shield tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9): 1869.
- [5] 杨秀敏, 张顶立, 房倩. 北京地铁车站浅埋暗挖法建造技术发展综述[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(4): 1.
YANG Xiumin, ZHANG Dingli, FANG Qian. Development of Beijing Subway station construction using shallow tunneling method[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(4): 1.
- [6] 胡瑞青, 戴志仁, 王立新, 等. 基于双层永久衬砌结构的桩基托换施工力学行为研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(5): 105.
HU Ruiqing, DAI Zhiren, WANG Lixin, et al. Study on mechanical behavior of pile foundation underpinning based on double layer permanent lining structure[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(5): 105.
- [7] 李洋. 西安地铁浅埋暗挖法施工地层变形研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
LI Yang. Research on stratum deformation of shallow-buried undercut metro tunnel in Xi'an[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.

(收稿日期: 2022-08-01)