

拱盖法暗挖地铁车站风道接主体进洞技术方案分析*

马全武¹ 雷 刚² 刘明明³ 董亚男² 杨祉蕙²

(1. 青岛地铁集团有限公司, 266011, 青岛; 2. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 100037, 北京;
3. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 650051, 昆明//第一作者, 高级工程师)

摘 要 目的: 在施工过程中, 当风道等附属结构转入车站主体施工时, 两者连接处的受力复杂, 施工难度较大, 因此需对地铁车站风道接主体进洞技术方案进行研究, 选择一个合理的接口形式, 以保证施工工程的质量与安全。方法: 以青岛地铁某拱盖法施工车站工程为例, 采用 MIDAS GTS 软件建立风道接口有限元模型; 结合现场监测数据, 对比分析风道挑高半断面进洞方案、风道挑高全断面进洞方案、风道压低半断面进洞方案和风道压低全断面进洞方案的地面位移与支护结构应力。结果及结论: 风道压低与风道挑高方案相比, 风道压低方案的最大竖向位移为 8.40 mm, 风道挑高方案的最大竖向位移为 21.70 mm, 其是风道压低方案的 2.6 倍; 施工结束后, 风道压低方案的最终竖向位移为 1.34 mm, 风道挑高方案的最终竖向位移为 10.50 mm; 风道压低方案中, 全断面进洞方案的最终竖向位移为 1.42 mm, 半断面进洞方案的最终竖向位移为 1.26 mm。综合考虑 4 种方案的支护结构应力分析结果, 风道压低全断面接口方案的支护结构应力偏小且满足强度要求, 因此风道压低全断面接口方案为最优方案。

关键词 地铁; 车站; 拱盖法; 风道; 进洞方案

中图分类号 U231.3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.09.008

Technical Solution Analysis of Air Duct to Main Tunnel-Introduction Scheme at Arch-cover Method Excavated Metro Station

MA Quanwu, LEI Gang, LIU Mingming, DONG Ya'nan, YANG Zhihui

Abstract Objective: During construction, when auxiliary structures such as air ducts are transferred to the station main structure construction, the connection between them experiences complex forces and the construction faces significant challenges. Therefore, it is necessary to study the technical solutions of air duct to main tunnel-introduction scheme at metro station and an appropriate interface form is selected to ensure

the quality and safety of the construction project. Method: Taking a station project of Qingdao Metro constructed by arch-cover method as an example, the finite element model of air duct interface is established using MIDAS GTS software. With reference to field-measured data, the ground displacement and support structure stress of the following schemes are comparatively analyzed: air duct elevated half-section entry scheme, air duct elevated full-section entry scheme, air duct depressed half-section entry scheme, and air duct depressed full-section entry scheme. Result & Conclusion: Among the two depressed schemes and the two elevated schemes, the maximum vertical displacement of the former is 8.40 mm, while the maximum vertical displacement of the latter is 21.70 mm, about 2.6 times higher. After the construction is completed, the final vertical displacements are 1.34 mm for the depressed schemes and 10.50 mm for the elevated schemes. In the former, the final vertical displacement is 1.42 mm for the full-section entry scheme and 1.26 mm for the half-section entry scheme. Considering the stress analysis results of support structures for four schemes, the depressed full-section entry scheme exhibits lower support structure stress while meeting the strength requirements, making it the optimal solution.

Key words metro; station; arch-cover method; air duct; tunnel-introduction scheme

First-author's address Qingdao Metro Group Co., Ltd., 266011, Qingdao, China

在地铁建设中, 车站站点通常选址在人流量较大的区域, 为避免施工造成过多影响, 一般采用地下施工。暗挖法能够在不开挖地面的情况下, 采用地下挖洞的方式进行施工。暗挖法主要有 CD(中隔墙)法、双侧壁导坑法及 PBA(洞桩逆作)法等。近年来, 针对“上软下硬”地层的特殊施工区域发展出了暗挖拱盖法, 该方法能够充分发挥岩石地层的

* 青岛地铁科技创新基金项目(M4-ZH-2020-134); 广东省普通高校创新团队项目(2022KCXTD052); 北京市科技服务品牌机构建设创新基金项目(20220467086)

自承力。但在施工过程中,当风道等附属结构转入车站主体施工时,其连接处受力复杂,施工难度较大。因此,为附属与主体结构连接处选择一个合理的接口形式可以保证施工工程的质量与安全。

目前,已有专家学者对地铁车站施工方面的问题进行了研究分析。文献[1]对双侧壁导坑法、中隔壁加台阶法及双层叠合初支拱盖法进行适应性研究,从安全性和经济性等多个指标比选出适用于层状岩地层的施工方法。文献[2]对拱盖法施工的力学特性进行了研究,并对施工工序进行了优化分析。文献[3]研究了对岩层质量较差的土层使用拱盖法施工时,其拱部的支护体系。文献[4]研究了拱盖法的施工工艺对施工周期的影响。文献[5]以实际工程为例,对车站主体和附属结构接口的开挖风险进行了研究,并分析了优化后的接口形式,发现采用优化后的接口形式能减少约 70% 的地面沉降和结构变形。

由此可见,目前对于拱盖法施工车站的研究主要集中在主体结构施工的力学行为分析及工序优化等方面,对车站主体与附属结构转换施工的研究较少。鉴于此,本文依托青岛某地铁车站工程,基于数值模拟计算,同时结合现场监测数据,对运用拱盖法施工的风道转车站主体施工接口方案进行研究。本文研究可为类似工程施工提供借鉴与参考。

1 工程概况

1.1 车站主体与风道概况

车站为地下两层标准岛式站台,采用复合式衬砌结构,车站全长 214.0 m,高为 17.9 m,跨度为 21.5 m,主体结构采用暗挖拱盖法施工。

风道结构段分为两部分,第一部分为横通道段,开挖宽度为 14.9 m,高为 16.5 m,此段出竖井后直行 4.0 m,再以中轴线半径为 12.3 m 向西转 90°后接入第二部分的连接段,然后接入车站主体,采用台阶法施工。

1.2 地质概况

根据地勘资料显示,拟建场地地形起伏较小,上覆主要为第四系人工填土层,其下为全新统冲洪积粉质黏土与中、粗砂层,下伏燕山晚期花岗岩。为方便模拟建模,将其简化为 5 层土体,从上往下依次为:人工填土层 3 m、粉质黏土层 3 m、强风化岩层 5 m、中风化岩层 2 m、第 5 层为微风化岩。结构

初期支护采用格栅钢架、钢筋网和 C35 喷射混凝土等,二次衬砌采用 C45 钢筋混凝土。结合地铁工程实际勘察报告,土层及支护结构主要物理学参数如表 1 所示。

表 1 土层及支护结构主要物理学参数
Tab.1 Main physical parameters of soil layers and supporting structures

名称	弹性模量/ GPa	重度/ (kN/m ³)	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
人工填土	0.006	17.5	0.40	26.8	15
粉质黏土	0.040	19.5	0.35	41.0	19
强风化岩	3.600	22.0	0.32	600.0	37
中风化岩	5.000	24.0	0.25	1 500.0	55
微风化岩	20.000	25.0	0.20	8 000.0	60
C35 混凝土	31.500	24.0	0.20	—	—
C45 混凝土	33.500	25.0	0.20	—	—
钢材	210.000	78.5	0.20	—	—

2 数值模型建立与分析点布置

2.1 方案设计与建模

地铁车站主体与风道结构的接口形式多样。根据相关研究,接口处采用弧形拱盖时,可以有效改善结构的受力与变形,故考虑风道原有拱顶形状、车站主体高度及施工便捷等因素后,将进洞时的风道断面设计为压低与挑高两种形式。同时,考虑到施工断面较大及工程成本等因素,将压低和挑高断面再细分为半断面进洞与全断面进洞,则本文共研究 4 种接口方案:风道挑高半断面进洞方案、风道挑高全断面进洞方案、风道压低半断面进洞方案和风道压低全断面进洞方案。风道接口方案示意图如图 1 所示。

采用 MIDAS GTS 软件进行三维有限元模拟,考虑边界效应,有限元模型的整体尺寸取为 150 m × 90 m × 50 m,结构位于第 5 层微风化岩中。边界条件设置为:上边界为自由面、侧边界为法向约束、底部为法向和水平约束。设定地面水平均匀,不受地形影响,没有多余荷载,且不受地下水影响,土体材料选择摩尔-库伦本构模型模拟,混凝土等材料采用弹性材料模拟。施工阶段设置与实际施工工序一致,风道接口有限元模型如图 2 所示。

2.2 地面位移分析点设置

根据相关工程经验,沿着风道段和车站主体连

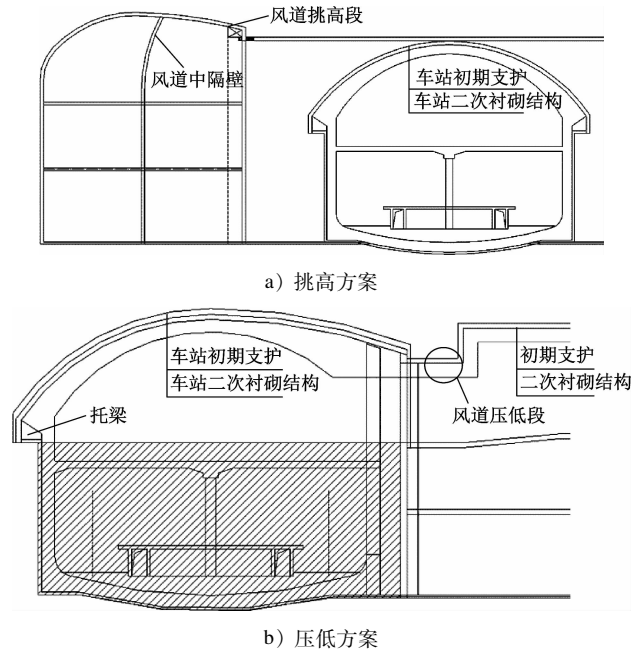


图 1 风道接口方案示意图

Fig. 1 Diagram of air duct interface schemes

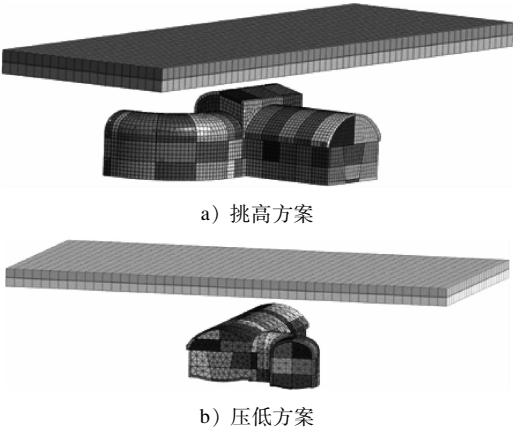


图 2 风道接口有限元模型

Fig. 2 Finite element model of air duct interface

接处正上方设置分析断面,记为 A 断面。在 A 断面上选取一系列的地面位移分析点,每两个分析点间距为 5 m,其位置示意图如图 3 所示。

3 计算结果分析

3.1 地面位移分析

各进洞施工方案包括风道与车站主体施工,两者均分为上、中、下 3 层进行开挖施工。将风道拱部、主体拱部、风道中层、主体中层、风道下层、主体下层、主体二次衬砌(以下简称“二衬”)与风道二衬施工完成这 8 个施工节点定为关键施工工序(工序 1—工序 8)。提取 4 种方案所有分析点在 8 个关键

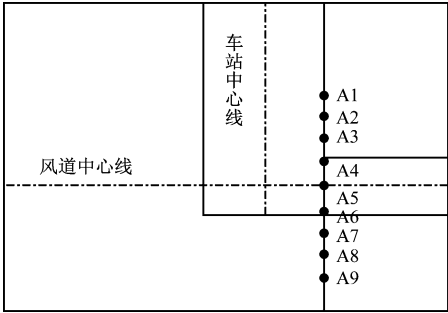


图 3 地面位移分析点位置示意图

Fig. 3 Diagram of analysis point position for land displacement

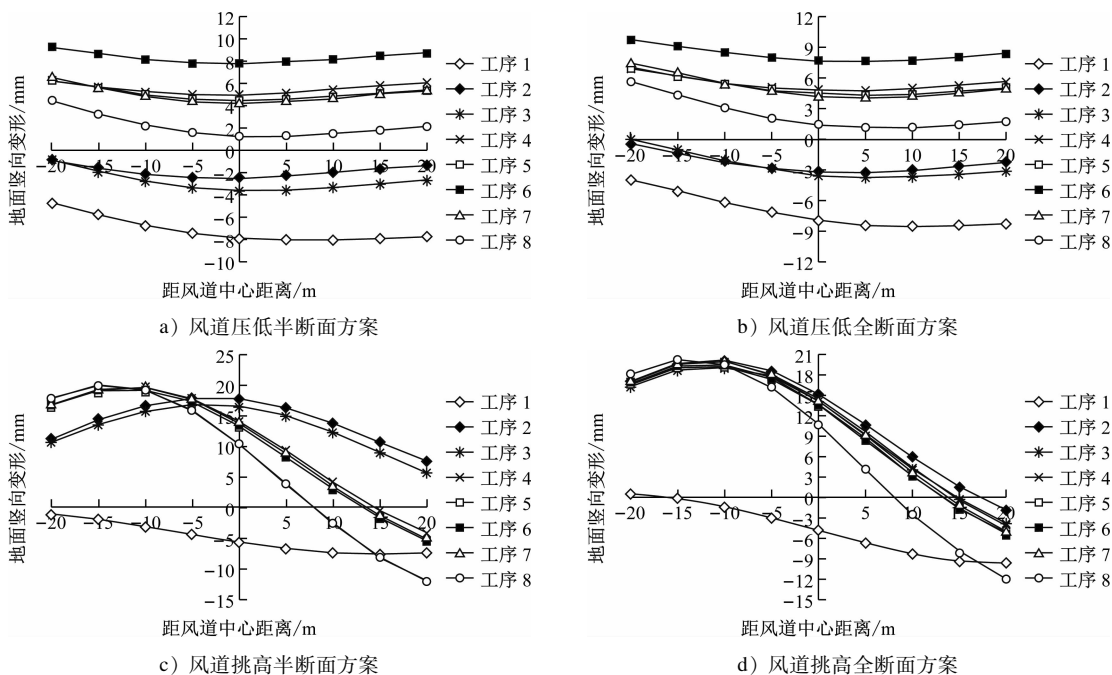
施工工序的地面竖向变形进行分析,如图 4 所示。

由图 4 a) 和图 4 b) 可知:在风道开始施工时,对 A 断面离风道中轴线越近的分析点的竖向位移影响较大,风道压低半断面与全断面方案的最大沉降值分别为 8.12 mm 和 8.53 mm;在主体下层开挖结束后,地面隆起值达到最大,风道压低半断面与全断面方案的最大隆起值分别为 9.19 mm 和 9.77 mm;施作二衬结构时,隆起变形有所减小,风道压低半断面与全断面方案的隆起变形最小值分别为 1.24 mm 和 1.11 mm。

分析两个方案隧道中轴线上的分析点可知:在风道段中部开挖结束前,半断面接口方案的地面沉降值与全断面接口方案的地面沉降值相差不大,因为在此阶段,全断面接口方案仅多开挖了半个压低面;主体中部开挖阶段,两个方案的竖向位移变化均最大,风道压低半断面与全断面方案的竖向位移值分别变化了 8.55 mm 和 8.31 mm,全断面方案比半断面方案的竖向位移变化小 3%;在后续的施工阶段,两种方案的竖向位移变化基本一致。

由图 4 c) 和图 4 d) 可知:在主体拱部二衬施作完成后,大部分分析点的地面竖向变形达到了峰值,风道压低半断面与全断面方案的最大隆起值分别为 17.75 mm、20.07 mm;在车站主体中层开挖完后,远离车站主体一端的 3 个分析点(A1—A3)的隆起值逐渐稳定;后续阶段,所有分析点的竖向位移变化均较小,仅在最后施作风道二衬结构时,竖向位移变化稍大。

风道拱部开挖结束后,风道压低全断面方案的沉降值略小于风道压低半断面方案。在主体拱部二衬施工阶段,两个方案的竖向位移变化均最大,全断面方案比半断面方案的隆起量变化小 14%。主体拱部二衬结构完成后,两种方案的竖向位移变



注:距风道中心距离以风道左侧(A6—A9)为负,以风道右侧(A1—A4)为正。

图4 4种方案8个施工工序的地面竖向变形

Fig.4 Land vertical deformation of 8 construction processes in 4 schemes

化基本一致,这是因为在中部土体开挖前,风道压低半断面方案挑高段的剩余土体已经开挖结束,后续的施工工序在主体大拱盖的保护下是一样的,因此两种方案的竖向位移变化相差较小。

3.2 典型断面结构应力分析

为分析4种方案初期支护结构的受力情况,选取风道段、连接段与主体段典型断面,分别提取拱顶、拱脚及直墙中段的应力进行对比,如图5所示。

由图5 a)可知:在风道段断面处,风道压低和挑高断面方案的应力均相差较小,半断面方案基本均略小于全断面方案;与风道压低接口方案相比,风道挑高方案在拱顶、拱脚和直墙中段位置处的应力值平均减小了53.2%、14.2%和35.1%。

由图5 b)可知:在接口断面处,风道压低方案中,全断面接口方案拱顶位置处的应力比半断面接口方案相同位置处的应力减小了17.1%,其他位置处两种方案的应力均相差较小;风道挑高方案中,两种方案拱脚位置处的应力均偏小,半断面接口方案拱顶位置处的应力较全断面方案减小了9.4%;风道挑高方案在拱脚位置处的应力远小于风道压低方案相同位置处的应力,风道挑高方案在拱顶和直墙中段位置处的应力值平均减小了33.0%和62.1%。

由图5 c)可知:在主体结构断面处,各方案的

应力值相差不大,仅在拱顶位置处,风道压低全断面方案比半断面方案的应力减小了约11.9%;相比于风道挑高方案,风道压低方案的应力值在直墙中段和拱脚位置处平均减小了61.1%、40.0%;相比于风道压低方案,风道挑高方案在拱顶位置处的应力减小了约38.5%。综合考虑4种方案,风道压低全断面接口方案的支护结构应力偏小且满足强度要求,因此风道压低全断面接口方案为最优方案。

4 监测数据对比

在地铁车站施工结束后,提取全施工过程中(所有施工工序)车站主体与风道连接处正上方中轴线上监测点DBC01的实际监测数据,并将其与模拟计算值进行对比,如图6所示。由图6可知:模拟计算结果与现场监测数据的竖向位移变化规律基本一致;在车站全部施工结束后,竖向位移监测值为3.21 mm,模拟值为2.99 mm,二者仅相差6.5%,由此验证了模拟计算的准确性。

5 结语

本文依托青岛地铁某拱盖法施工车站工程,基于数值模拟与现场监测数据,研究了风道结构转入车站主体的进洞施工方案,通过对比地面位移与结构受力等指标,获得以下结论:

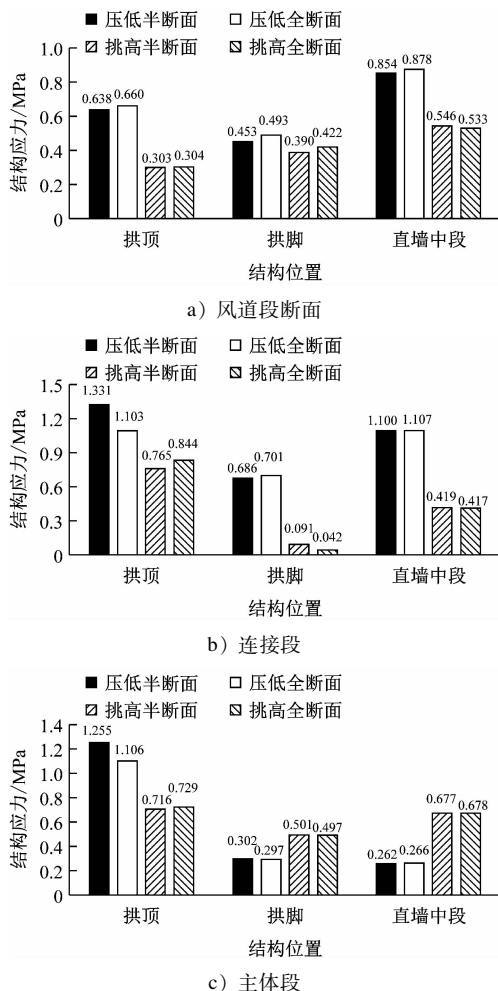


图5 4种方案3处典型断面的应力值对比

Fig.5 Comparison of stress values at 3 typical sections of 4 schemes

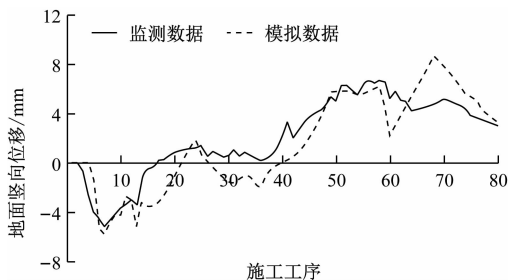


图6 实际监测数据与模拟数据时程曲线对比

Fig.6 Time-history curve comparison of field-measured and simulated data

1) 主体拱部和中层土体开挖施工阶段的地面竖向位移变化最大,故在实际施工中,此阶段应加强支护与监测频率。

2) 车站结构施工时比风道结构施工时的地面竖向位移变化大,说明洞室开挖跨度对地面位移有一定的影响。

3) 对比地面位移数据可知,风道压低全断面接口方案的竖向位移变形控制效果最好。

4) 各方案支护结构的应力均较小,综合考虑4种方案,风道压低全断面接口方案的支护结构应力偏小且满足强度要求,因此风道压低全断面接口方案为最优方案。

计算结果与现场地面位移监测数据均满足或远小于控制要求,说明拱盖法在“上软下硬”地层中有较好的适用性。此外,本文是根据实际的施工工序进行开挖模拟的,不同的开挖工序和支护设计对各方案的影响还需进一步研究。

参考文献

- [1] 张国华,陈海勇,邓昆,等.重庆地区层状岩地层超大断面暗挖地铁车站施工工法比选[J].城市轨道交通研究,2019,22(3):137.
ZHANG Guohua, CHEN Haiyong, DENG Kun, et al. Comparison of Chongqing Metro station construction method in super-large section tunnel of the stratigraphic strata[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(3): 137.
- [2] 孔超,高新强,姚勇,等.上软下硬复合地层初支拱盖法围岩变形与力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(增刊1):2634.
KONG Chao, GAO Xinqiang, YAO Yong, et al. The deformation and mechanical properties of surrounding rock of primary support arch-cover construction method in upper-soft and lower-hard stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S1): 2634.
- [3] 袁国栋,王渭明.含软弱夹层地铁车站拱盖-锚索-注浆组合支护体系研究[J].铁道建筑,2018,58(9):58.
YUAN Guodong, WANG Weiming. Study on arch cover-anchor cable-grouting combined support system of subway station with weak intercalation[J]. Railway Engineering, 2018, 58(9): 58.
- [4] 崔凌岳.典型岛礁地质条件下结合拱盖法施工理念的多层双侧壁导坑法应用[J].施工技术,2015,44(增刊2):415.
CUI Lingyue. Application of multi-layer double wall pilot tunnel method with arch cover construction idea under typical reef geological condition[J]. Construction Technology, 2015, 44(S2): 415.
- [5] 齐少轩,王非,朱培,等.喀斯特地貌区超浅埋拱盖法暗挖车站主体与附属结构接口优化设计[J].铁道建筑,2020,60(6):73.
QI Shaoxuan, WANG Fei, ZHU Pei, et al. Optimal design of interface between main body and subsidiary structure of super-shallow buried underground excavation station with arch-cover method in Karst landform[J]. Railway Engineering, 2020, 60(6): 73.

(收稿日期:2022-07-05)